



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”

**ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ POWDER-IN-TUBE ΚΑΙ
ΕΛΑΣΗ ΜΟΡΦΗΣ**

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΝΤΖΑΒΕΛΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Δ. Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”

**ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΚΚΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ POWDER-IN-TUBE ΚΑΙ
ΕΛΑΣΗ ΜΟΡΦΗΣ**

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Γ. ΚΑΝΤΖΑΒΕΛΟΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ. ΑΡΓΥΡΟΥΣΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----|
| Πρόλογος..... | i |
| Περίληψη..... | ii |
| Abstract..... | iii |
| 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 |
| 3.3.1.1. Αλουμίνιο (Al)..... | 19 |
| 3.3.1.2. Χαλκός (Cu)..... | 21 |
| 3.3.1.3. Μαγνήσιο (Mg) | 22 |
| 3.3.2. Κεραμικά | 24 |
| 3.3.2.1. Οξείδιο Μαγνησίου (MgO)..... | 27 |
| 3.3.2.2. Καρβίδιο Τιτανίου (TiC)..... | 29 |
| 3.3.3. Υπεραγωγοί..... | 31 |
| 3.3.3.1. Γενικά..... | 31 |
| 3.3.3.2. Διβορίδιο Μαγνησίου | 37 |
| 4. Πειραματική διαδικασία..... | 41 |
| 4.1. Σκοπός..... | 41 |
| 4.2. Διατάξεις..... | 41 |
| 4.3. Προετοιμασία και σχεδιασμός πειραμάτων..... | 45 |
| 4.4. Δοκιμή Εφελκυσμού χρησιμοποιούμενων μετάλλων..... | 49 |
| 4.5. Χαρακτηρισμός Δειγμάτων | 52 |
| 4.5.1. Οπτικό μικροσκόπιο (OM) | 52 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.2. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)..... | 53 |
| 4.5.3. Τεχνική Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD) | 55 |
| 4.5.4. Υπεραγώγιμες Μετρήσεις | 57 |
| 5. Υπολογιστική προσομοίωση..... | 58 |
| 5.1. Μοντελοποίηση Κατεργασιών και Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων | 58 |
| 5.2. Γενικά για τον Κώδικα LS-Dyna | 62 |
| 5.3. Μοντέλο και Δεδομένα | 64 |
| 6. Αποτελέσματα | 68 |
| 6.1. Πειραματικά | 68 |
| 6.2. Υπολογιστικά και σύγκριση με Πειραματικά | 83 |
| 6.3. Χαρακτηρισμοί..... | 87 |
| 6.3.1. Οπτική Μικροσκοπία (OM)..... | 87 |
| 6.3.2. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)..... | 100 |
| 6.3.3. Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ (XRD)..... | 131 |
| 6.3.4. Υπεραγώγιμες Μετρήσεις | 135 |
| 7. Τελικά Συμπεράσματα | 139 |
| 8. Βιβλιογραφία..... | 140 |

Πρόλογος

Η μεταπτυχιακή 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. Επιλέχθησαν 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. Για ακόμα καλύτερο έλεγχο της κατεργασίας, αυτή μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στον υπολογιστή. Τα συμπεράσματα προκύπτουν από τους χαρακτηρισμούς, τα μεγέθη που μετρήθηκαν κατά την έλαση μορφής και εξετάζεται κατά πόσο η αριθμητική προσομοίωση ανταποκρίνεται στα πειραματικά δεδομένα.

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 μεταπτυχιακής εργασίας, ενώ ως επιβλέπων καθηγητής, καθοδήγησε με προθυμία, έδωσε σημαντικές συμβουλές και παραχώρησε σημαντικά μέσα για την εκπόνησή της. Ευχαριστώ ιδιαίτερος επίσης τον Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την μοντελοποίηση και όχι μόνο της κατεργασίας και τον υπ. διδάκτορα Μανώλη Γκιθώνα για την βοήθεια και την συμπαράστασή του καθ’ όλη την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Παράλληλα δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τη βοήθεια του τεχνικού προσωπικού του εργαστηρίου κατά την εκτέλεση των πειραμάτων και την προθυμία τους να βοηθήσουν όποτε αυτό ήταν απαραίτητο, ιδιαίτερος του Νίκου Μελισσά και του Κώστα Κερασιώτη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Θ. Περράκη για την άμεση βοήθειά της και την διάθεση τού περιθλασιμέτρου ακτίνων-Χ.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή ΕΜΠ Δημήτριο Ι. Παντελή για την διάθεση τού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης και στην διδάκτορα Χαρά Σαράφογλου για την πολύτιμη βοήθεια και την άριστη συνεργασία που είχαμε.

Καντζάβελος Κωνσταντίνος

Αθήνα, Μάρτιος 2012

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναφέρεται στη μελέτη της έλασης μορφής κυλινδρικής διατομής όταν αυτή συνδυάζεται με τη μέθοδο “Powder-in-Tube”, των συνθηκών που επηρεάζουν αυτήν την κατεργασία διαμόρφωσης, της τελικής γεωμετρίας και μικροδομής των εξεταζόμενων δειγμάτων και του τρόπου μοντελοποίησής της. 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 κonioμεταλλουργίας. Για να είναι η εργασία όσο το δυνατόν πληρέστερη, μελετώνται τα χαρακτηριστικά των αντιπροσωπευτικών υλικών (μέταλλα, κεραμικά, υπεραγωγοί) που χρησιμοποιήθηκαν και κυρίως, οι εφαρμογές που έχουν στην βιομηχανία και την έρευνα. Από το τέταρτο κεφάλαιο αρχίζει η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, της προετοιμασίας και κατεργασίας των σκονών και των δοκιμίων και μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους χαρακτηρισμού που χρησιμοποιήσαμε. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση της μοντελοποίησης της κατεργασίας, παραθέτοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και το πρόγραμμα προσομοίωσης LS-Dyna, των συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν και των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν. Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων για διάφορα μεγέθη που αφορούν την έλαση μορφής σε συνδυασμό με την τελική γεωμετρία και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων τάσεων από τα πειράματα και την προσομοίωση. 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, στη συνέχεια πάρθηκαν φωτογραφίες και στοιχειομετρική ανάλυση από το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) και το μικροαναλυτή στοιχείων (EDAX) με κριτήριο την προσεκτικότερη ανάλυση της σκόνης και τέλος μελετήθηκαν για την υπεραγωγήμη σκόνη μας (MgB_2) η κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας (υπεραγωγιμες μετρήσεις) και τα κρυσταλλικά επίπεδα της δομής της μέσω του Περιθλασιμέτρου Ακτίνων-Χ (XRD).

Λέξεις Κλειδιά:

Έλαση μορφής, Μέθοδος “Powder-in-Tube” (PIT), Κonioμεταλλουργία, MgB_2 , Μορφοποίηση Υπεραγωγών, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, LS-Dyna.

Abstract

The present MsC Thesis is referring to the study of shape rolling (of cylindrical bars) when it is combined with the “Powder in Tube” technique, the factors that affect this deformation process, the final geometry and microstructure of the examined items and the way of its computational modeling. At start, the main features and mechanisms of shape rolling are indicated and then, a description of the PIT method is given, which is a technique of Powder Metallurgy. In order to have a complete project, the characteristics of the representative materials (metal, ceramic, superconductors) which were used are given, focusing on the applications they have in industrial and research level. From the fourth chapter starts an outline of the experimental procedure, the preparation and manufacturing of the powders and the samples, without forgetting to mention the used methods of characterization. In continue follows the analysis of the simulation of the process, arraying the finite element method and the simulation program LS-Dyna, with the used factors and its malfunctions. At chapter six, we show the results of many parameters that concern shape rolling, in combination with the final geometry of the samples, while a comparison between the experimental and computational results is made. At the end, for a more constant study of the whole process, it was necessary to characterize the samples, so that we could examine the microstructure of the final products. For this reason, the surface interface between matrix-powder was studied with optical microscope, the powder was examined also under scanning electron microscope (SEM) and EDAX, while the MgB_2 powder was further studied with superconductive measurements (critical temperature) and XRD.

Key Words:

Shape Rolling of Cylindrical Bars, “Powder-in-Tube” Technique, Powder Metallurgy (P/M), MgB_2 , Superconductors Shaping and Processing, Finite Element Method (FEM), LS-Dyna.

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 μελέτη λοιπόν της τεχνικής PIT με έλαση μορφής, εκτός από μαθηματική ανάλυση και πειραματική διαδικασία, απαιτεί σίγουρα και μοντελοποίηση κατά το δυνατόν. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και η πρόοδος των υπολογιστών έχει λύσει το πρόβλημα των πολλών υπολογισμών που απαιτούνται σε αυτήν την ανάλυση με πολλές παραμέτρους. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται πολλές αριθμητικές προσομοιώσεις για διαφόρων ειδών ελάσεις μορφής, όμως ο συνδυασμός της με την μορφοποίηση σκονών, εισάγει νέα κριτήρια που ακόμη και σήμερα δεν έχουν επιλυθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Επομένως επιλέχθηκε να γίνει προσομοίωση της κατεργασίας μας με τον κώδικα LS-Dyna, που δεν είναι εμπορικό πακέτο αποκλειστικά για κατεργασίες διαμόρφωσης, αλλά όντας πιο γενικό, δίνει την δυνατότητα εισαγωγής επιμέρους συνθηκών (τριβολογικών, παραμορφώσεων κλπ).

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 [1, 2, 3, 4, 14, 16, 17]

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 πλεονεκτημάτων).

Ψυχρή κατεργασία:

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

Θερμή κατεργασία:

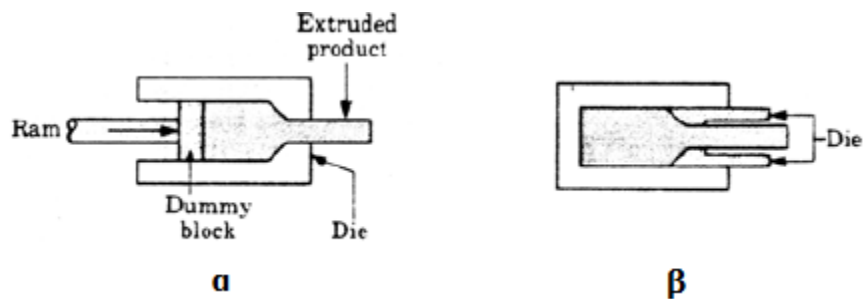
- ✓ Μικρότερες Τάσεις και επομένως Έργο κατεργασίας
- ✓ Ταχύτερη παραμόρφωση (λιγότερα πάσα)
- ✓ Δεν έχουμε φαινόμενα εργοσκλήρυνσης (αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο).

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

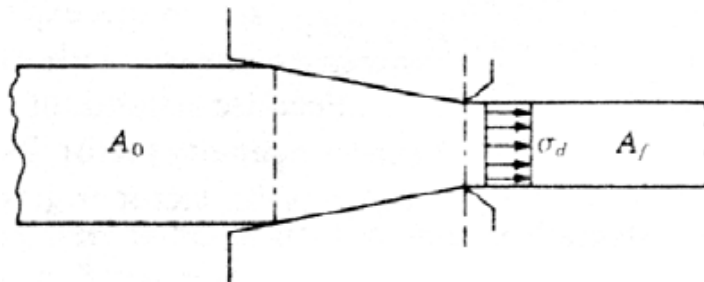
Η βασική μορφή της διέλασης είναι η πίεση τεμαχίου ώστε να διέλθει μέσα από το άνοιγμα μιας μήτρας. Ανάλογα με την κίνηση του τεμαχίου ως προς την μήτρα έχουμε την άμεση και την έμμεση διέλαση. Στην άμεση, το τεμάχιο σπρώχνεται από έμβολο και η μήτρα είναι ακίνητη, ενώ στην έμμεση η μήτρα κινείται ως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

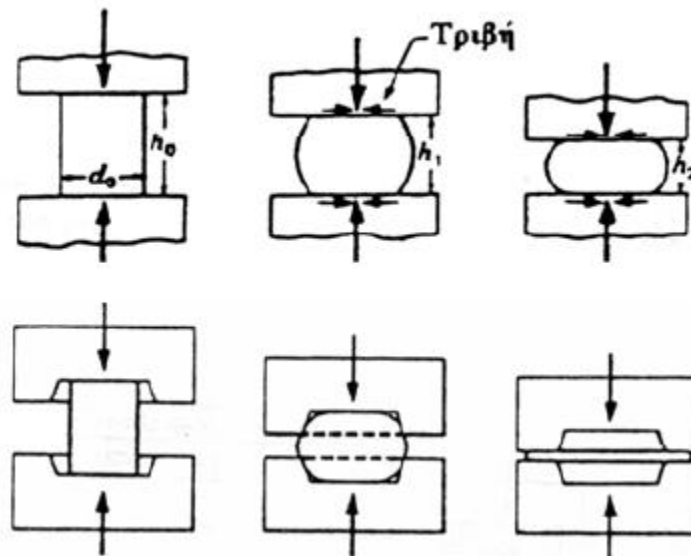


Σχ. 2.2: Σχηματική παράσταση Ολκής.

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.

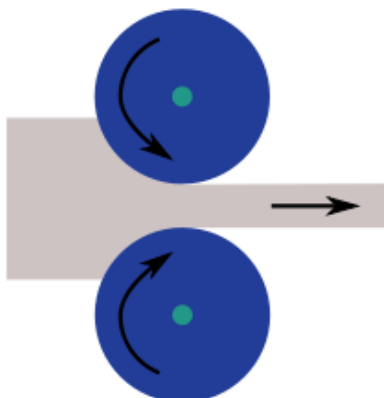
Πριν περάσουμε στην κατεργασία που μας αφορά, την έλαση, αξίζει να αναφερθούμε στην κατεργασιμότητα, την ικανότητα δηλαδή των υλικών να παραμορφώνονται πλαστικά. Η μηχανική κατεργασία βασίζεται ακριβώς σε αυτή την ιδιότητα των υλικών, να αλλάζουν σχήμα με πρόσδοση μηχανικού έργου, γεγονός που σε μικροσκοπική 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^{ου} αιώνα (1590 Βέλγιο και Αγγλία), και διακρίνεται σε:

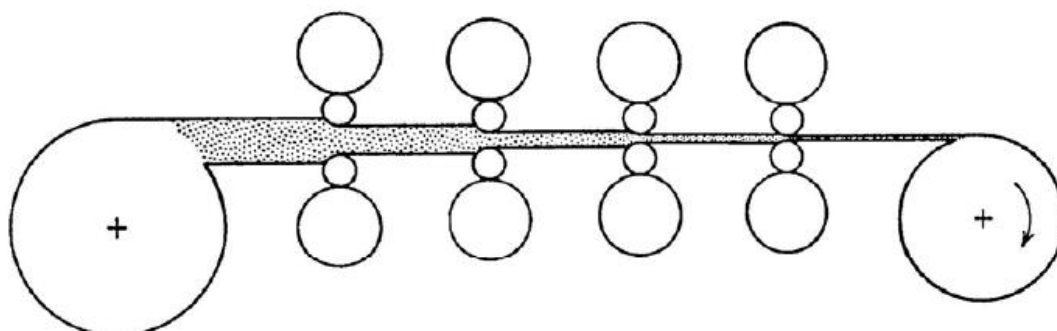
- Έλαση μπιγέτας (billet), όπου σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading)

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.

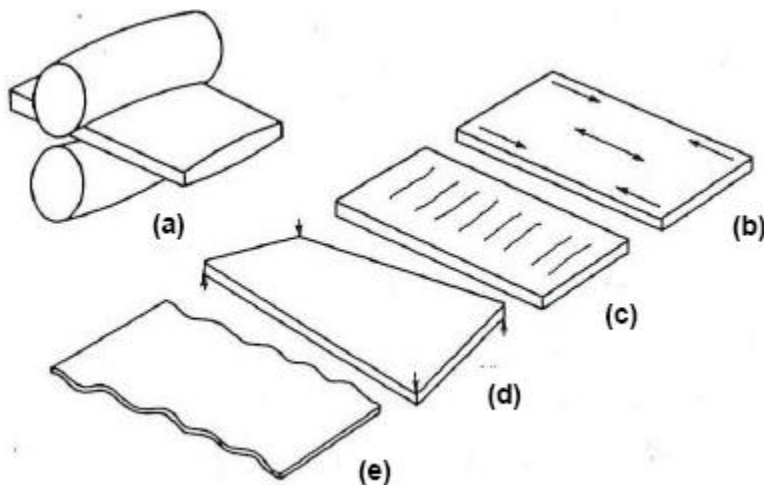
Παράλληλα αξίζει να αναφέρουμε ξανά ότι κατά την ψυχρή έλαση, που έγινε στην παρούσα εργασία, το υλικό δεν μπορεί να παραμορφωθεί γρήγορα ούτε πολύ, καθώς απαιτούνται πολλά πάσα και η τελική μείωση του πάχους (ή της διατομής) δεν ξεπερνά το 90%, λόγω ανισοτροπίας, εργοσκληρυνσης και μεγάλου έργου που 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:

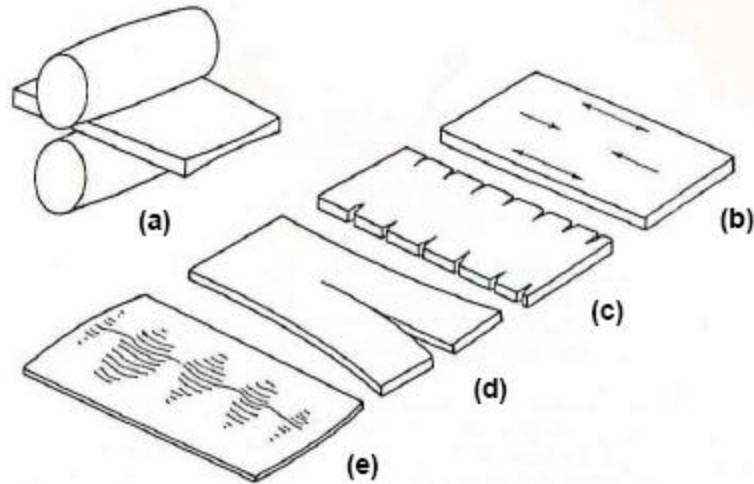
- (b) Παραμένουσες τάσεις, θλιπτικές στα άκρα και εφελκυστικές στο κέντρο
- (c) Ρωγμές στο κέντρο του ελάσματος (zipper breaks)
- (d) Στρέβλωση (warping)
- (e) Κυματισμούς στα άκρα (crepe-paper effect)



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

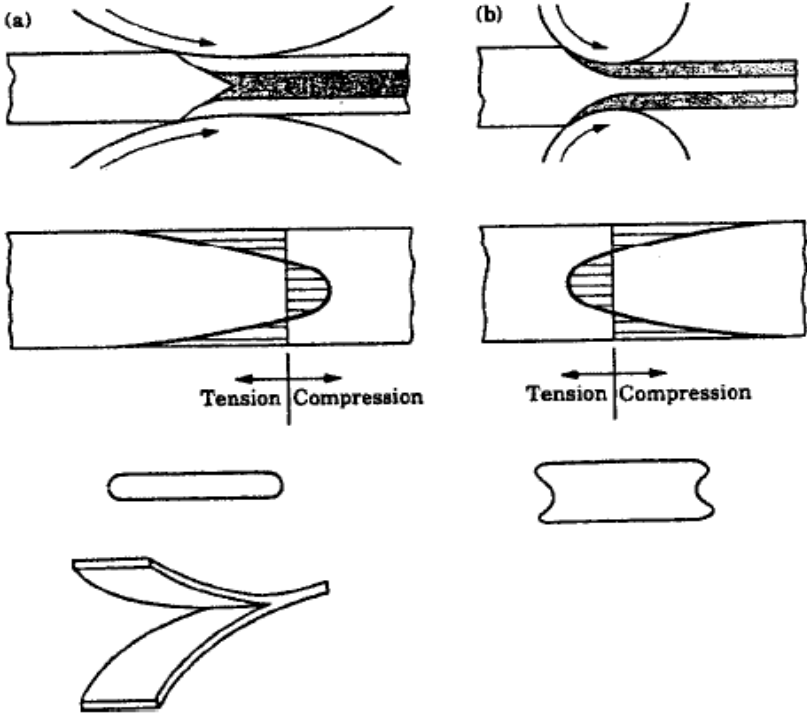
Με τον ίδιο τρόπο βλέπουμε (σχ. 2.7) ότι όταν το έλαστρο παραείναι «σφικτό» (a), μπορεί να έχουμε:

- (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)



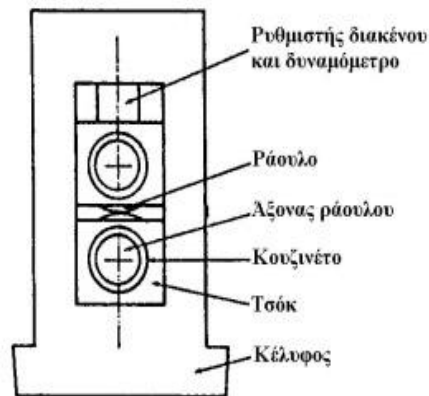
Σχ. 2.7: Ελαττώματα κατά την έλαση όταν τα έλαστρα είναι «σφικτά».

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.

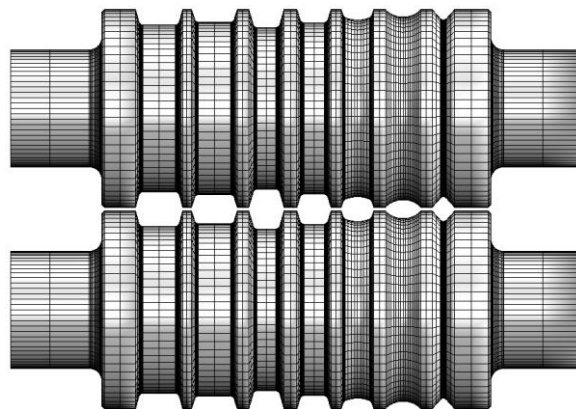
Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο (mill). Αποτελείται από τα ράουλα (rolls), οι άξονες των οποίων στρέφονται μέσα σε κουζινέτα (bearings), ενώ όλα μαζί είναι εγκατεστημένα σε ειδικό κέλυφος (housing) όπως βλέπουμε και στο σχήμα παρακάτω (σχ. 2.9).



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.



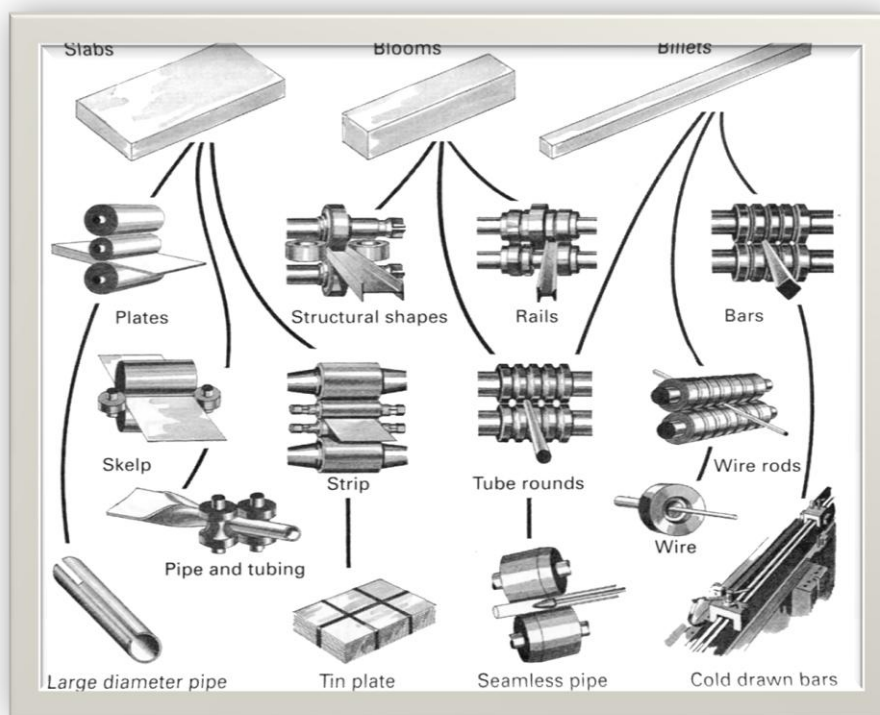
Σχ. 2.10: Τυπικό Ράουλο Μορφής με πολλές γεωμετρίες.

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.

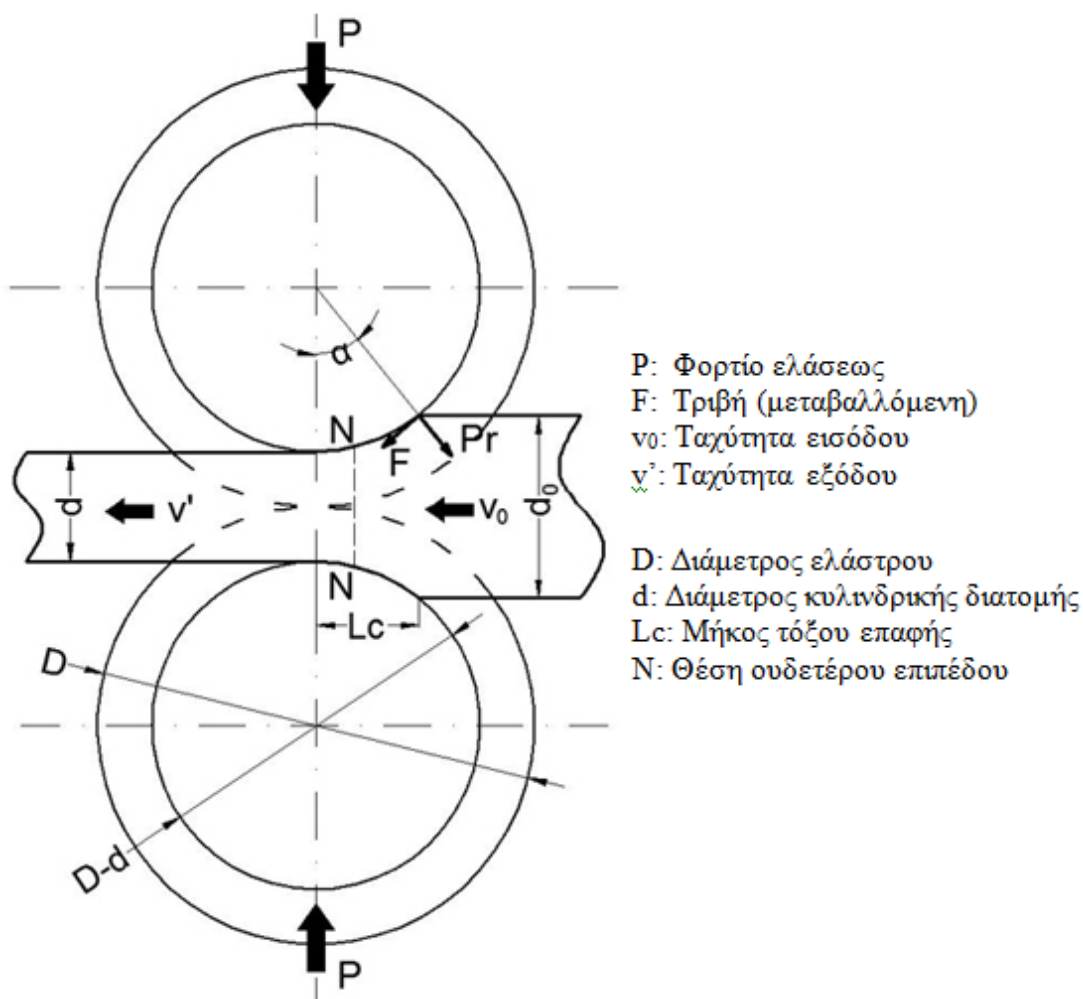
Χρησιμοποιείται για την παρασκευή δομικών ή μηχανολογικών εξαρτημάτων με ενιαία γεωμετρία στην διάμετρο, με πιο συνηθισμένες τις δοκούς κυλινδρικής, «H» και «T» διατομής. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε την έλαση μορφής ανάλογα με την γεωμετρία που έχει το κατεργασμένο κομμάτι, όπως βλέπουμε και στο παρακάτω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

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

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 επαναφορά.

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^ο να λαμβάνει υπόψιν του την τριβή και να είναι συνήθως ακριβέστερος (R η ακτίνα τού τυμπάνου).

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

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

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

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 οποιοδήποτε 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. Τα πρώτα 2 χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και μελετούνται παρακάτω (ενότητα 4.3). Ο σωλήνας πρέπει να έχει σχετικά χοντρό τοίχωμα (άνω του 1mm), ώστε να αντέξει τις πιέσεις της κατεργασίας, αφού η συμπίεση της σκόνης στο εσωτερικό είναι συνήθως δύσκολη.

Η κατεργασία, έλαση ή διέλαση, επιλέγεται βάσει του χρόνου, της ακρίβειας και των υλικών μας. Η έλαση (κυλινδρικές μορφής 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 κωνιομεταλλουργίας.

3.2. Κωνιομεταλλουργία

Η κωνιομεταλλουργία 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 συμπύεση σκόνης βολφραμίου (νηματίδια ηλεκτρικών λυχνιών) και σκληρών καρβιδίων (σκληρομέταλλα). Κατά την διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου αναπτύχθηκε περισσότερο η παραγωγή μεταλλικών αλλά και συνθέτων υλικών. Τις τελευταίες δεκαετίες η εξέλιξη της κωνιομεταλλουργίας 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 κωνιομεταλλουργία ανθεκτικών πολύπλοκων μορφών με ελάχιστο κόστος είναι:

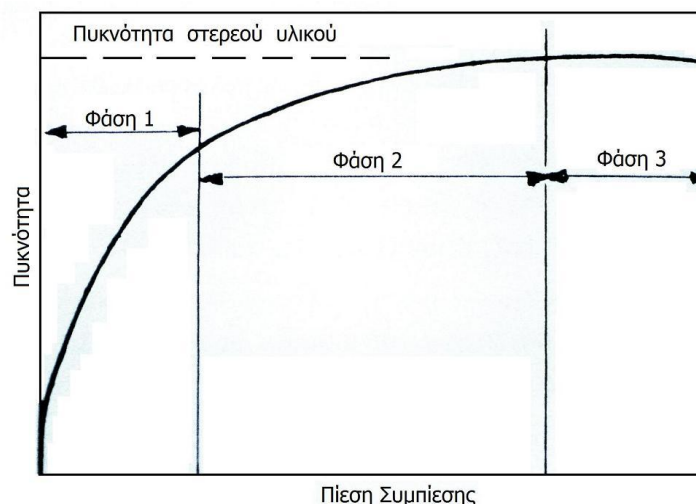
- Παραγωγή της σκόνης και τροφοδότησή της σε μία μήτρα
- Συμπύεσή της σε μια ορισμένη μορφή
- Θερμική κατεργασία (πυροσυσσωμάτωση)

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.

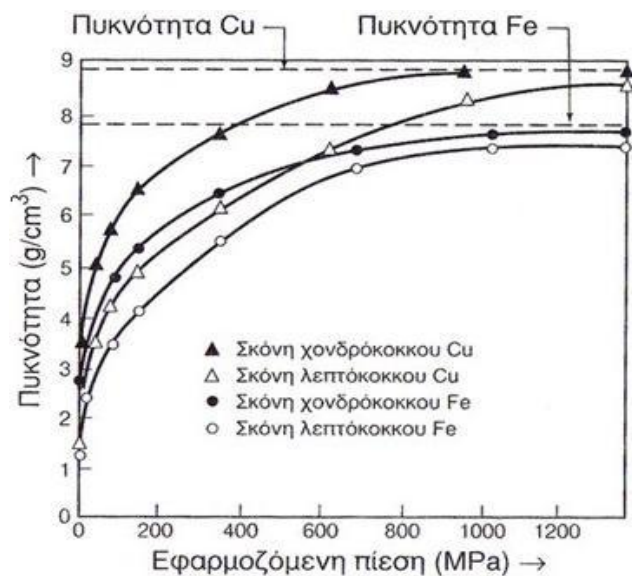
Στη μεταβατική φάση η συνένωση της σκόνης είναι το αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των κόκκων μεταξύ τους και της ανακατάταξής τους. Η κίνηση των κόκκων από

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 του 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 συμπέσμα. Για (φαινόμενη) πυκνότητα συμπέσματος 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 τού συμπιέσματος 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 τού τεμαχίου (μεταβλητό πορώδες ανάλογα με τις απαιτήσεις).

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

- Νηματοδίων 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 δούμε παρακάτω μερικά υλικά, αντιπροσωπευτικά από κάθε κατηγορία, 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 περισσότερων 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 καλοί αγωγοί θερμότητας και ηλεκτρισμού
- Είναι όλκιμα και επομένως κατεργάζονται εύκολα

- Είναι λευκού χρώματος (εκτός από Cu και Au) αφού ανακλούν όλα τα μήκη κύματος

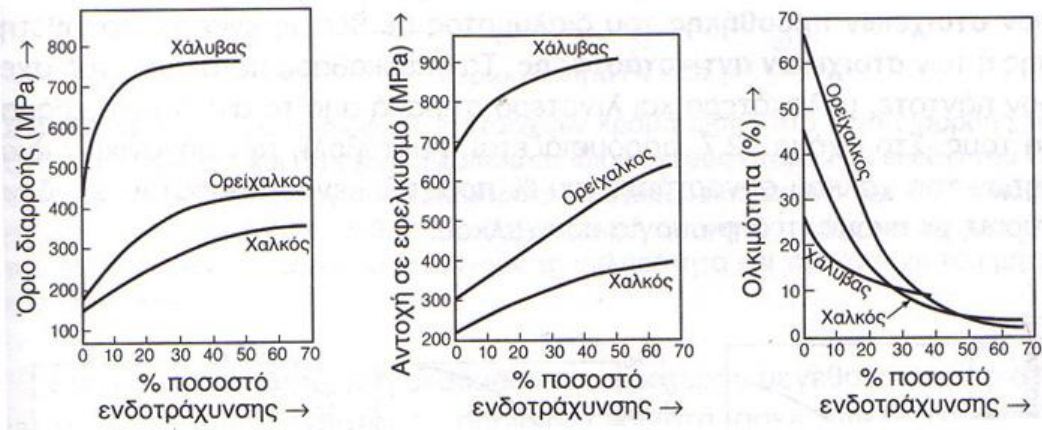
Οι μηχανικές ιδιότητες των μετάλλων δεν εξαρτώνται μόνο από το υλικό, αλλά και από το ποσοστό ενδοτράχυνσής τους. Εφόσον η παρούσα μελέτη αναφέρεται σε κατεργασία διαμόρφωσης, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε πιο διεξοδικά σε αυτό το φαινόμενο.

Η ενδοτράχυνση (ή εργοσκληρυνση) 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, επιμηκυνόμενοι 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 ιδιαίτερω, φαίνεται συνοπτικά για διάφορα υλικά στο παρακάτω σχήμα, συναρτήσε 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 αναλύονται τα μέταλλα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρούσα εργασία, καθώς και ο λόγος που επιλέχθηκαν.

3.3.1.1. 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 g/cm^3 . Το σημείο τήξης του είναι περίπου 660°C και το σημείο ζέσεως κοντά στους 2520°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 kg/m^3 στους 20°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 ενώσεων 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 | $2,7 \text{ g/cm}^3$ |
| Θερμοκρασία Τήξης | 660°C |
| Μέτρο Ελαστικότητας | 50-100 GPa |
| Μέτρο Διάτμησης | 26 GPa |
| Όριο Συμπιεστότητας | 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.

3.3.1.2. Χαλκός (Cu)

Ο Χαλκός (Cu), ήταν το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο σε καθαρή ή κραματική μορφή. Παρουσιάζει εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, γι' αυτό και η μισή περίπου παγκόσμια παραγωγή του χαλκού χρησιμοποιείται για την κατασκευή αγωγών, μετασχηματιστών, γεννητριών, ηλεκτρικών εξαρτημάτων κλπ. Κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα και είναι μέταλλο που μορφοποιείται εύκολα.

Οι κυριότερες ιδιότητες των κραμάτων του χαλκού φαίνονται παρακάτω:

Χαλκός

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού | 8,94 g/cm ³ |
| Θερμοκρασία Τήξης | 1085°C |
| Μέτρο Ελαστικότητας | 110-130 GPa |
| Μέτρο Διάτμησης | 48 GPa |
| Όριο Συμπιεστότητας | 140 GPa |

| | |
|---------------|-------------|
| Λόγος Poisson | 0,34 |
| Όριο Διαρροής | 100-500 MPa |
| Όριο Θραύσης | 200-700 MPa |

Ο χαλκός χρησιμοποιείται ιδιαίτερα κατά την μέθοδο PIT λόγω της υψηλής ολκιμότητας, της καλής αντοχής και της μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Έτσι γίνεται ιδανικός σε εφαρμογές που θέλουμε να κατασκευάσουμε καλώδια, όπως όταν μορφοποιούμε υπεραγωγούς, καθώς κάνει δυνατή την μεγάλη μείωση της διατομής του σωλήνα χωρίς να σπάσει (η συμπίεση βοηθιέται επιπλέον από το φαινόμενο της διδυμίας), αλλά είναι χρήσιμος και στο τελικό προϊόν αφού δεν χρειάζεται να αφαιρεθεί. Η χρήση του περιορίζεται βέβαια στο υλικό τού σωλήνα και εκεί μόνο όταν είναι απαραίτητος, όπως σε ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές εφαρμογές, καθώς αποτρεπτικοί παράγοντες για περαιτέρω χρησιμοποίησή του είναι το κόστος του και το υψηλό του βάρος.

3.3.1.3. Μαγνήσιο (Mg)

Το Μαγνήσιο (Mg) είναι μέταλλο που ανήκει στις αλκαλικές γαίες και ανακαλύφθηκε τον 18^ο αιώνα, παίρνοντας το όνομά του από την Μαγνησία της Θεσσαλίας. Αποτελεί περίπου το 3% του φλοιού της γης και λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας του, δεν βρίσκεται σε καθαρή μορφή στην φύση. Η χρήση του αυξήθηκε πολύ τις τελευταίες δεκαετίες, αφού μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, η παραγωγή του έπαψε να καθορίζεται μόνο από την πολεμική βιομηχανία.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων, με πυκνότητα μόλις 1,7 g/cm³. Κρυσταλλώνεται στο μεγίστης πυκνότητας εξαγωνικό σύστημα και λόγω τού ότι έχει μόνο τρία συστήματα ολίσθησης, είναι ελάχιστα όλκιμο και μορφοποιείται δύσκολα. Βέβαια η συμπίεση γίνεται κάπως ευκολότερη καθώς παρουσιάζει φαινόμενα διδυμίας (όπως ο χαλκός). Πάνω από τους 200°C, οι κατεργασίες διαμόρφωσης γίνονται ευκολότερες, αφού ενεργοποιούνται περισσότερα επίπεδα ολίσθησης. Η ηλεκτρική αγωγιμότητά του φτάνει το 60% του χαλκού ενώ έχει και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Στις συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες παρουσιάζει καλή αντοχή στην διάβρωση, λόγω του οξειδίου του (MgO), το οποίο αναφέρεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Η μηχανική του αντοχή είναι πολύ χαμηλή για μηχανολογικές εφαρμογές και γι' αυτό χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν υπό την μορφή των κραμάτων του, συνήθως με αλουμίνιο. Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθεί ότι την προηγούμενη δεκαετία, το 50% και πλέον της παγκόσμιας παραγωγής μαγνησίου χρησιμοποιήθηκε ως κραματικό στοιχείο του

αλουμινίου. Η μικρή πυκνότητα του μαγνησίου κάνει τα κράματά του κατάλληλα στην αεροναυπηγική, καθώς η ειδική μηχανική αντοχή τους (σ/ρ) είναι πολύ υψηλή, ενώ τέλος το μαγνήσιο βρίσκει χρήση και σε εφαρμογές απορρόφησης κραδασμών.

Για το καθαρό μαγνήσιο έχουμε τις παρακάτω ιδιότητες (το εύρος ορισμένων τιμών εξαρτάται από τον τρόπο παρασκευής):

Μαγνήσιο

| | |
|----------------------------|-------------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού | 1,738 g/cm ³ |
| Θερμοκρασία Τήξης | 650°C |
| Μέτρο Ελαστικότητας | 45 GPa |
| Μέτρο Διάτμησης | 17 GPa |
| Όριο Συμπιεστότητας | 45 GPa |
| Λόγος Poisson | 0,34 |
| Όριο Διαρροής | 20-100 MPa |
| Όριο Θραύσης | 80-180 MPa |

Η κονιομεταλλουργία γενικά βοηθάει στην παρασκευή μαγνησίου και κραμάτων του με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, με υψηλότερο κόστος βεβαίως, γι' αυτό και αποτελεί μέθοδο μορφοποίησης για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της κονιομεταλλουργίας όσον αφορά το μαγνήσιο είναι ο έλεγχος τού μεγέθους των κόκκων (μικρότερος κόκκος δίνει καλύτερη αντοχή) και η πιο ακριβής και εύκολη κατεργασιμότητα, καθώς όπως είπαμε τα δύο μειονεκτήματα του μαγνησίου είναι η μικρή μηχανική αντοχή και η χαμηλή κατεργασιμότητα, με την αντοχή συμβατικών κραμάτων μαγνησίου παραγόμενα μέσω κονιομεταλλουργίας να φτάνει τα 300 MPa.

Το μαγνήσιο κατά την μέθοδο PIT, δεν χρησιμοποιείται όπως τα υπόλοιπα μέταλλα ως υλικό του σωλήνα, αλλά βρίσκει εφαρμογές ως υλικό πλήρωσης του σωλήνα υπό την μορφή σκόνης ή νιφάδων, σε μεταλλουργικές, μηχανολογικές, χημικές και πυροτεχνικές, μόνο του ή μαζί με αλουμίνιο, με κύριο γνώμονα το μικρό του βάρος και την καλή απορρόφηση κραδασμών.

Όταν η μέθοδος PIT συνδυαστεί με την έλαση, μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη μικροδομή για το υλικό μας, όπως βλέπουμε στην βιβλιογραφία, καθώς οι πολύ μικροί κόκκοι συναρτήσκει των θερμοκρασιών που κυμαίνονται κοντά στους 300°C οδηγούν σε φαινόμενα υπερπλαστικότητας.

3.3.2. Κεραμικά

Σήμερα, με τον όρο κεραμικά χαρακτηρίζονται τα ανόργανα μη μεταλλικά υλικά που παράγονται με θερμική κατεργασία. Εκτός από τα παραδοσιακά κεραμικά που κατασκευάζονται από αργιλική πρώτη ύλη, στα κεραμικά περιλαμβάνονται πλέον διάφορα ορυκτά, πετρώματα, γυαλιά, οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, το τσιμέντο, το σκυρόδεμα και ανθρακούχα υλικά. Τα κεραμικά βρίσκουν πολλές εφαρμογές τον τελευταίο μισό αιώνα σε πυρηνικές, μαγνητικές, ηλεκτρονικές, οπτικές και βιοϊατρικές εφαρμογές. Στην μεγάλη εξάπλωση των κεραμικών σήμερα, που τείνουν πολλές φορές να αντικαθιστούν τα μέταλλα σε πολλές από τις χρήσεις τους, μεγάλο ρόλο έπαιξε η κonioμεταλλουργία, η οποία βελτίωσε αισθητά τις ιδιότητές τους.

Για την ανάπτυξη υλικών με ακόμα καλύτερες ιδιότητες, η προσοχή έχει στραφεί στα σύνθετα υλικά με κεραμική ενίσχυση και εκτός από αισθητά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή σε θερμικούς αιφνιδιασμούς. Τα κεραμικά αυτά είναι γνωστά με διάφορες ονομασίες (engineering, advanced, fine κλπ) και στην Ελλάδα ως προηγμένα κεραμικά. Τα προηγμένα κεραμικά (SiC, WC, TiC, TiN, Al₂O₃, ZrO₂, CBN, διαμάντι κ.ά.) χρησιμοποιούνται σε σχετικά καθαρή μορφή, λόγω των πολύ καλών φυσικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων. Ο συνδυασμός καλών ιδιοτήτων που έχουν οφείλεται επί τω πλείστω στην πολύ λεπτή και καλά ελεγχόμενη μικροδομή, την μεγάλη χημική καθαρότητα και στον μικρό αριθμό φάσεων.

Οι μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών εξαρτώνται από την ύπαρξη ισχυρών δεσμών οι οποίοι προσδίδουν στο πλέγμα μεγάλη αντίσταση έναντι της κίνησης των διαταραχών. Έτσι τα κεραμικά παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα και στιβαρότητα, υψηλό μέτρο ελαστικότητας, αλλά και μικρή δυσθραυστότητα λόγω της δυσκολίας μετακίνησης των διαταραχών μέσα στη δομή του υλικού. Ενώ λοιπόν η αστοχία των μετάλλων αποδίδεται κυρίως σε θραύση ή σε κόπωση, η αστοχία των κεραμικών υλικών οφείλεται στην ψαθυροποίησή τους.

Ειδικότερα, η σκληρότητα των κεραμικών μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του μέτρου ελαστικότητας. Η ανηγμένη σκληρότητα (H/E) για τα καθαρά μέταλλα είναι πολύ χαμηλή, για τα μεταλλικά κράματα της τάξης του 10⁻² και για τα κεραμικά περίπου 10⁻¹.

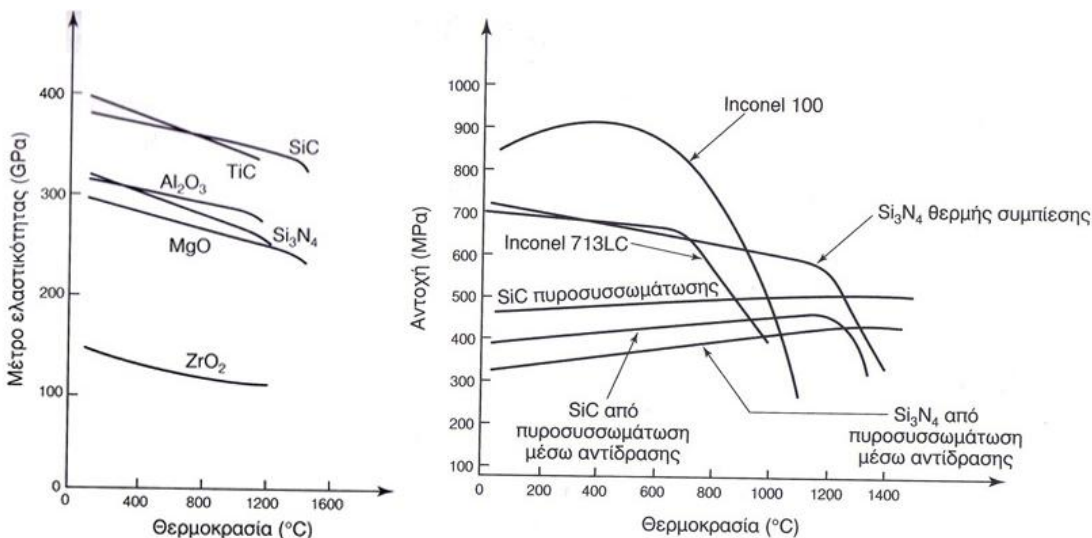
Το μέτρο ελαστικότητας των κεραμικών είναι υψηλότερο αυτού των μετάλλων και χάριν της χαμηλής σχετικά πυκνότητας, παρουσιάζουν πάρα πολύ υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ). Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό βέβαια επηρεάζονται από την παρουσία πόρων. Αυξημένο πορώδες (P) οδηγεί σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της μεγίστης αντοχής σε εφελκυσμό (σ_{TS}), όπως φαίνεται και από τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις:

$$E = E_0 (1 - 1,9 P + 0,9 P^2)$$

$$\sigma_{TS} = (\sigma_{TS})_0 e^{-nP}$$

όπου E_0 το μέτρο ελαστικότητας για μηδενικό πορώδες, $(\sigma_{TS})_0$ η αντοχή σε εφελκυσμό συμπαγούς υλικού ($P=0$) και n συντελεστής που συνήθως κυμαίνεται από 4 έως 7.

Στο παρακάτω σχήμα (σχ. 3.4) φαίνεται η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής διαφόρων κεραμικών από την θερμοκρασία. Γενικά παρατηρείται σταθερό μέτρο ελαστικότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και το ίδιο ισχύει και για την μηχανική αντοχή τους, σε αντίθεση με τα μέταλλα που ακόμα και τα καλύτερα υπερκράματα χάνουν την υψηλή αντοχή τους μετά τους 800°C περίπου, αν και παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή μέχρι αυτή την θερμοκρασία.



Σχ. 3.4: Η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας για τα κύρια προηγμένα κεραμικά και στην αντοχή για διάφορα κεραμικά και υπερκράματα.

Παράλληλα θα πρέπει να τονιστεί ότι η αντοχή των κεραμικών σε θλιπτικά φορτία είναι περίπου 15 φορές μεγαλύτερη από αυτήν σε εφελκυστικά, εν αντιθέσει με τα μέταλλα που έχουν περίπου ίδια. Αυτό συμβαίνει στα ψαθυρά υλικά, όπως τα κεραμικά, επειδή οι ρωγμές που είναι κάθετες στην διεύθυνση της καταπόνησης κλείνουν κατά την θλίψη. Αντίστοιχα, σε μια δοκιμή κάμψης (εφελκυσμός και θλίψη), παρατηρείται λίγο μεγαλύτερη αντοχή από ότι σε εφελκυσμό, κατά περίπου 1,7 φορές.

Τέλος, επειδή τα κεραμικά είναι εύθραυστα και έχουν σχεδόν πάντα πόρους, μικρορωγμές ή ακαθαρσίες, έχουν χαμηλή αντοχή σε θραύση και έτσι θα πρέπει να εξετάζεται η αρτιότητά τους μετά από κάθε χρήση.

Τα πλεονεκτήματα των κεραμικών καθορίζουν τις χρήσεις τους που περιλαμβάνουν κοπτικά εργαλεία, βιοϋλικά, εναλλάκτες, τμήματα αεριοστροβίλων, ημιαγωγούς, μονωτές κ.ά. Επειδή βεβαίως τα κεραμικά καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα χημικών συστάσεων και φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων, το σύνολο των παρακάτω πλεονεκτημάτων δεν χαρακτηρίζει όλα τα κεραμικά υλικά. Τα πλεονεκτηματά τους σε σχέση με τα μέταλλα είναι συνοπτικά:

- ✓ Υψηλό σημείο τήξης
- ✓ Σχετικά χαμηλή πυκνότητα
- ✓ Υψηλότατο μέτρο ελαστικότητας
- ✓ Χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- ✓ Καλή αντίσταση σε θλίψη
- ✓ Πολύ υψηλή σκληρότητα
- ✓ Βιοσυμβατότητα
- ✓ Πυρίμαχη, αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά

Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους εντοπίζονται σε:

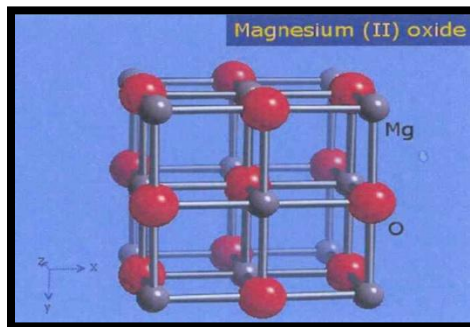
- ❖ Ευθραυστότητα
- ❖ Μικρή αντίσταση σε εφελκυσμό
- ❖ Υψηλό κόστος παραγωγής (για ορισμένα, κυρίως προηγμένα)
- ❖ Εύκολη διάδοση ρωγμών
- ❖ Μικρή αντοχή σε κόπωση, λυγισμό και κρούση
- ❖ Έλλειψη μη καταστροφικών δοκιμών για τον έλεγχό τους
- ❖ Μεγάλη επίδραση της μικροδομής και του πορώδους στις φυσικές ιδιότητές τους (εξειδικευμένος τρόπος παραγωγής).

Η μορφοποίηση των κεραμικών υλικών και ιδίως των προηγμένων που έχουν υψηλή θερμοκρασία τήξης (πάνω από 2000°C) καθιστά την χύτευσή τους οικονομικά ασύμφορη. Η έλλειψη πλαστικότητας επίσης, δεν επιτρέπει τη μορφοποίησή τους με κάποια από τις συνήθεις μεθόδους μορφοποίησης των μετάλλων. Η κωνιομεταλλουργία λοιπόν που είδαμε προηγουμένως, έδωσε για πολλά χρόνια λύση στο πρόβλημα μορφοποίησης των προηγμένων κεραμικών, ενώ τα τελευταία χρόνια γνώρισαν σημαντική ανάπτυξη και άλλες μη συμβατικές χημικές και θερμικές, μη συμβατικές μέθοδοι (πχ σύνδεση με αντίδραση).

3.3.2.1. Οξειδιο Μαγνησίου (MgO)

Το οξειδιο του Μαγνησίου (MgO), πιο γνωστό ως μαγνησίτης ή καυστική μαγνησία (caustic magnesia), αποτελεί το κύριο συστατικό των μαγνησιακών πυριμάχων, με υψηλό σημείο τήξεως (>2800°C) και μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και χημικές προσβολές. Είναι λευκού χρώματος και μπορεί να φτάσει εύκολα σε πολύ μικρή κοκκομετρία.

Η δομή του MgO είναι ίδια με του NaCl με διπλάσιο όμως φορτίο κάθε ατόμου, γι' αυτό έχει και πολύ ισχυρότερη δομή. Η τιμή του $a=4,20\text{\AA}$ μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την θεωρητική πυκνότητα $\rho=3,59\text{g/cm}^3$ (X-Ray Density), που αποτελεί και την μέγιστη πυκνότητα που μπορεί να αποκτήσει το περίκλαστο. Τιμές της τάξεως του 3,65 που έχουν αναφερθεί για αυστριακή δίπυρο μαγνησία οφείλονται στον διαλυμένο σίδηρο (4-8%) που περιέχουν. Το μέγεθος των κρυσταλλιτών εξαρτάται από την θερμοκρασία έψησης (αυξάνεται με άνοδο της θερμοκρασίας) και κυμαίνεται από 10 έως 50 μm .



Σχ. 3.5: Η κρυσταλλική δομή του MgO.

Το MgO παράγεται από βρουνερίτη (στερεό διάλυμα MgCO_3 & FeCO_3) ή βρουκίτη ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) και σημαντική βελτίωση στις ιδιότητές του έγινε όταν η παραγωγή τους άρχισε να γίνεται με βάση τους ελληνικούς μαγνησίτες (MgCO_3) που έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες χαμηλού σημείου τήξεως. Πλέον χρησιμοποιείται για την μαζική παραγωγή του οξειδίου του μαγνησίου ή συνθετική μαγνησία. Το MgO που προκύπτει από διασπάσεις των παραπάνω πρώτων υλών του και στη συνέχεια πυροσυσσωματώνεται στους 1800 °C για να πάρουμε την δίπυρη μαγνησία που είναι και η πλέον χρησιμοποιούμενη μορφή του MgO στην βιομηχανία.

Συνήθως το MgO μορφοποιείται πριν γίνει η τελική έψηση προς παραγωγή δίπυρης μαγνησίας, γιατί έχει πολύ καλή πλαστικότητα και εξαιρετικές ιδιότητες μορφοποιήσεως για κεραμικό υλικό. Η μορφοποίηση, που γίνεται συνήθως σε πρέσες, οδηγεί σε σημαντική μείωση του πορώδους. Ενδεικτικά για πορώδες 22% απαιτείται πίεση μεγαλύτερη από 300 MPa.

Παρακάτω βλέπουμε τις κυριότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τού οξειδίου του μαγνησίου:

Οξείδιο Μαγνησίου

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού | 3,58 g/cm ³ |
| Μοριακό Βάρος | 40,3 g/mol |
| Θερμοκρασία Τήξης | ~2850 °C |
| Μέτρο Ελαστικότητας | ~250 GPa |
| Μέτρο Διάτμησης | ~155 GPa |
| Όριο Συμπιεστότητας | ~160 GPa |
| Όριο Θραύσης σε Εφελκυσμό | ~300 MPa |
| Όριο Θραύσης σε Θλίψη | ~2500 MPa |

Οι γενικές εφαρμογές του περιλαμβάνουν χρήσεις στην μεταλλουργία και την τσιμεντοβιομηχανία (χωνευτήρια), την φαρμακοβιομηχανία (αντιόξινα), την βιομηχανία υάλου, ζάχαρης, λιπασμάτων κ.ά., ενώ η υψηλή πυριμαχικότητα το καθιστά ιδανικό για θερμικές επενδύσεις και μονώσεις.

Μια ιδιαίτερη εφαρμογή τού MgO έχει να κάνει με θωράκιση καλωδίων ρεύματος, καθώς αποτελεί άριστο μονωτή θερμοκρασίας και ηλεκτρισμού, ενώ παράλληλα είναι και αρκετά φθηνό. Η κυριότερη εφαρμογή σε θωράκιση καλωδίων είναι το μονωμένο καλώδιο χαλκού με μη οργανικό υλικό (Mineral-insulated copper-clad cable ή MICC), γνωστό και ως Pyro, από τον πρώτο κατασκευαστή, την Pyrottenax (του ομίλου Tico). Το «υπερμονωμένο» θα λέγαμε καλώδιο αποτελείται από σύρματα χαλκού τοποθετημένα μέσα σε σκόνη MgO που εξωτερικά περιβάλλεται επίσης από χαλκό (ή άλλο μέταλλο), όπως φαίνεται στο σχέδιο 3.6. Η κατασκευή του γίνεται με έλαση μορφής σε συνδυασμό με την μέθοδο PIT, αφού πριν μειωθεί στην επιθυμητή διάμετρο ο σωλήνας, έχει τοποθετηθεί και συμπιεστεί η σκόνη τού MgO μέσα στον μεταλλικό σωλήνα, με τα σύρματα του χαλκού να είναι ήδη μέσα στον σωλήνα. Στο τέλος η όλη κατασκευή καλύπτεται για περαιτέρω προστασία και μόνωση με πλαστικό, όπως τα συμβατικά καλώδια.



Σχ. 3.6: Υπερμονωμένο καλώδιο χαλκού με MgO (MICC ή Pyro).

Οι εφαρμογές του έχουν να κάνουν με εγκαταστάσεις όπου θέλουμε υπερπροστασία κυρίως από την φωτιά, τον ιονισμό και τον μαγνητισμό, όπως πυρηνικοί αντιδραστήρες, συστήματα πυροπροστασίας, μαγνητικά φίλτρα και καλώδια μεταφοράς δεδομένων. Παράλληλα, η μηχανική αντοχή του είναι πολύ μεγάλη και ένα καλώδιο τέτοιου είδους, τυπικής διαμέτρου στα 8-10mm αντέχει εύκολα χτυπήματα ακόμα και από σφυρί. Στα μειονεκτήματά του βέβαια, εκτός από το κόστος κατασκευής, είναι τα σημεία σύνδεσης και αλλαγής κατεύθυνσης (μικρότερη προστασία) και η μικρή παροχή τάσης (μέχρι 1000V).

3.3.2.2. Καρβίδιο Τιτανίου (TiC)

Το Καρβίδιο του Τιτανίου (TiC) είναι ένα εξαιρετικά σκληρό κεραμικό υλικό σε μορφή σκόνης, μαύρου χρώματος και η δομή του είναι όμοια με του MgO (σχ. 3.7). Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στην φθορά, την διάβρωση και την οξειδωση. Οι κυριότερες ιδιότητες τού TiC φαίνονται παρακάτω:

Καρβίδιο Τιτανίου

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού | 4,93 g/cm ³ |
| Μοριακό Βάρος | 59,9 g/mol |
| Θερμοκρασία Τήξης | ~3160 °C |
| Μέτρο Ελαστικότητας | ~440 GPa |
| Μέτρο Διάτμησης | ~150 GPa |

| | |
|---------------------------|-------------|
| Όριο Συμπιεστότητας | ~220 GPa |
| Όριο Θραύσης σε Εφελκυσμό | 120-200 MPa |
| Όριο Θραύσης σε Θλίψη | ~4000 MPa |



Σχ. 3.7: Η κρυσταλλική δομή του TiC.

Ως σκόνη, κατεργάζεται με μεθόδους κονιομεταλλουργίας και έχει τις αντιτριβικές εφαρμογές ως τις κυριότερες. Η πιο χαρακτηριστική από αυτές είναι τα κοπτικά εργαλεία, στα οποία χρησιμοποιείται ως επένδυση, βελτιώνοντας σημαντικότερα τις ιδιότητές τους. Άλλες εφαρμογές έχουν να κάνουν με ανάμειξη σε ένα ποσοστό της τάξης του 6-30% με άλλες σκόνες, βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή που έχει πάρει εμπορική υπόσταση κυρίως από την Toyota, έχει να κάνει με την κατασκευή στηριγμάτων μηχανολογικών εξαρτημάτων (πχ μηχανής αυτοκινήτου ή αεροπλάνου) από TiC λόγω εξαιρετων μηχανικών αντοχών. Επειδή όμως αυτό λιώνει στους 3160°C και παράλληλα μορφοποιείται πολύ δύσκολα, η πιο κατάλληλη μέθοδος για την κατασκευή του είναι η PIT, κατά την οποία σκόνη TiC εισάγεται μέσα σε μεταλλικό σωλήνα και συμπιέζεται με έλαση μορφής μέχρι το επιθυμητό μέγεθος και πορώδες. Επειδή όμως απαιτείται και μικρό σχετικά βάρος, το μέταλλο είναι συνήθως αλουμίνιο, ενώ η σκόνη TiC αναμειγνύεται με σκόνη ή νιφάδες αλουμινίου που σκοπό έχουν να διευκολύνουν την κατεργασία και να μειώσουν περαιτέρω το βάρος (περαιτέρω ανάλυση της εφαρμογής στην βιβλ. [24]).

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).

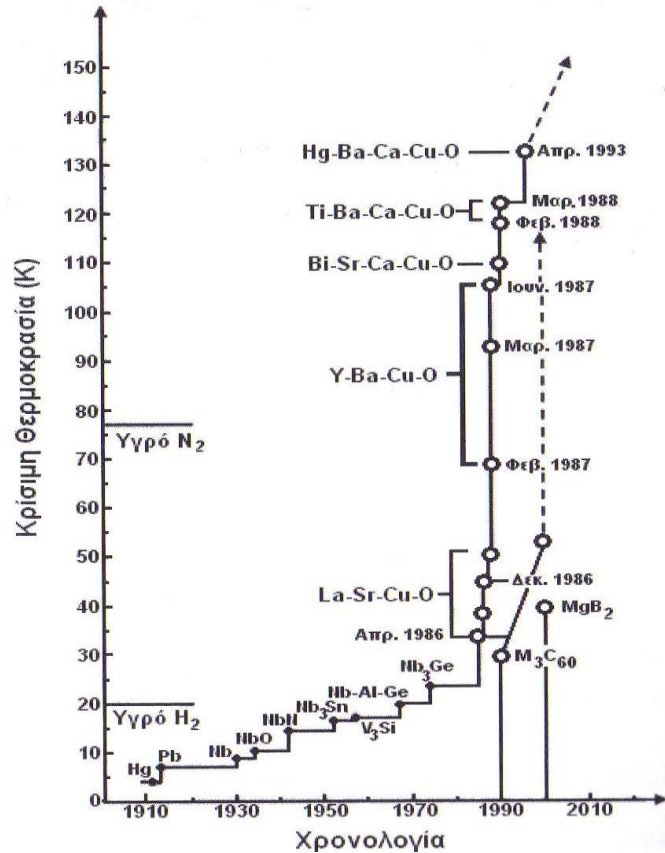
Από τότε μέχρι και τη δεκαετία του '80 το θέμα της υπεραγωγιμότητας επιβραδύνθηκε λόγω του ότι για να παρατηρηθεί το φαινόμενο αυτό, έπρεπε το υλικό να ψυχθεί σε περιοχές της τάξης των 2-7K με υγρό ήλιο, υλικό σπάνιο και πολύ ακριβό, ή με υγρό υδρογόνο, που όμως είναι ιδιαίτερος εκρηκτικό. Παράλληλα 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:

$YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO, $T_c = 90K$)

$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (BSCCO, $T_c = 110K$)

$Ti_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (TBCCO, $T_c = 125K$)

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ ($T_c = 135K$)



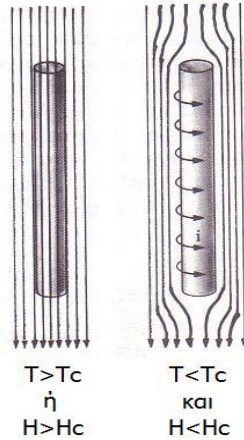
Σχ. 3.8: Χρονολόγιο της ανακάλυψης των κυριότερων υπεραγωγών.

Το διαμαγνητικό φαινόμενο που αναφέρθηκε παραπάνω, εμφανίζεται όταν ένα υλικό με υπεραγωγίμες 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 Φ 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:

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

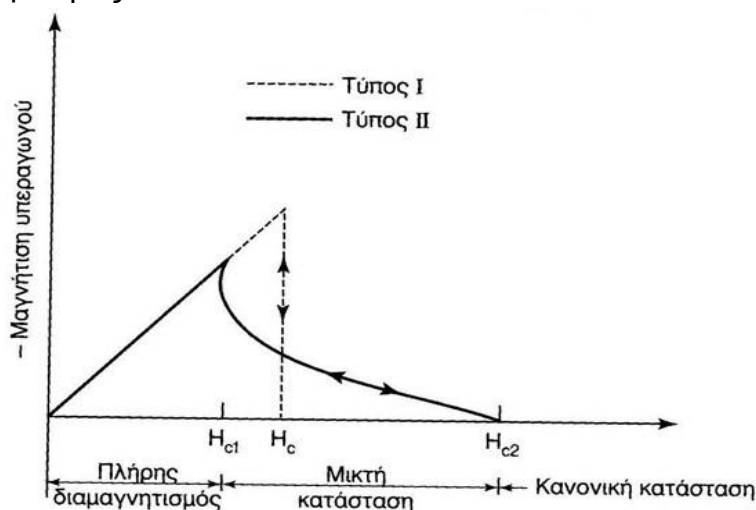
όπου H_0 η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε θερμοκρασία 0K.



Σχ. 3.9: 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.



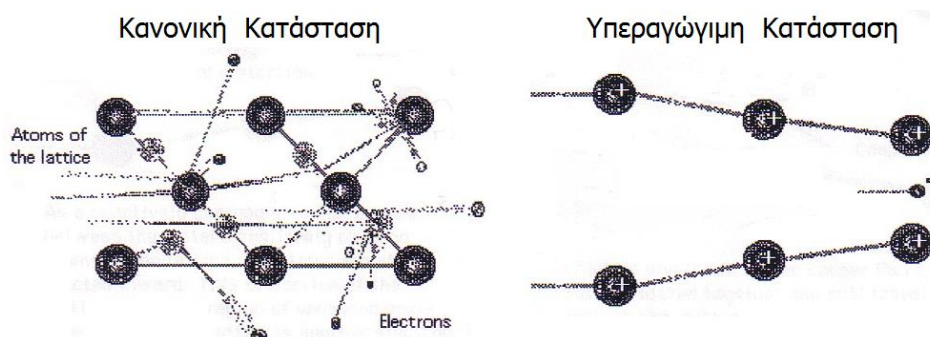
Σχ. 3.10: Καμπύλες μαγνήτισης για τους 2 τύπους υπεραγωγών, με την επιφάνεια κάτω από τις 2 καμπύλες μαγνήτισης να είναι ίδιες όταν έχουν ίδια διαφορά ελεύθερης ενέργειας μεταξύ υπεραγωγίμης και κανονικής κατάστασης.

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 μιας 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 Κελβίν 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 μονοκρύσταλλο 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. 3.11: Η αντίσταση που προβάλλει το πλέγμα στην κίνηση των ηλεκτρονίων στην κανονική κατάσταση και πως αυτό παραμορφώνεται στην υπεραγωγίμη.

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 υπεραγωγίμη οδό, πλησιάσει 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 υπεραγωγίμη κατάσταση. Ο σχηματισμός δηλαδή υπεραγωγίμων οδών κατά τις οποίες οι σκεδάσεις των ηλεκτρονίων είναι μηδαμινές, δεν είναι δυνατός σε όλα τα υλικά.

Η παραγωγή υπεραγωγίμων υλικών περνά από δύο διαδοχικές φάσεις: τη σύνθεση της υπεραγωγίμης σκόνης και την εν συνεχεία μορφοποίησή της προκειμένου να ληφθεί το προϊόν στην τελική του μορφή.

Η σύνθεση της υπεραγωγίμης σκόνης μπορεί να γίνει με μία από τις παρακάτω τεχνικές (περισσότερες πληροφορίες στην βιβλ. [2, 11, 14, 25]):

- Πυροσυσσωμάτωση σε στερεά κατάσταση (Sintering)
- Μέθοδος συγκαταβύθισης (Cop recitation method)
- Τεχνική Sol-Gel (Sol-Gel technique)

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 10^4A/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 υπεραγωγίου υλικού. Ακολουθεί μείωση διατομής με μηχανικές κατεργασίες έλασης ή διέλασης. Με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σε βιομηχανική κλίμακα υπεραγωγίου 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 και γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε:

- ✓ 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.

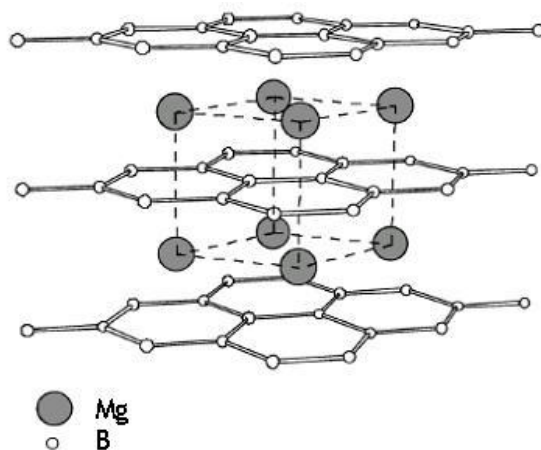
3.3.3.2. Διβορίδιο Μαγνησίου

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 οξείδιο. 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 αγώγιμη ηλεκτρονική πυκνότητα και η αγωγιμότητά του στην κανονική κατάσταση είναι μία με δύο τάξεις μαγνήτισης υψηλότερες για το MgB_2 απ' ότι των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στα καλώδια.

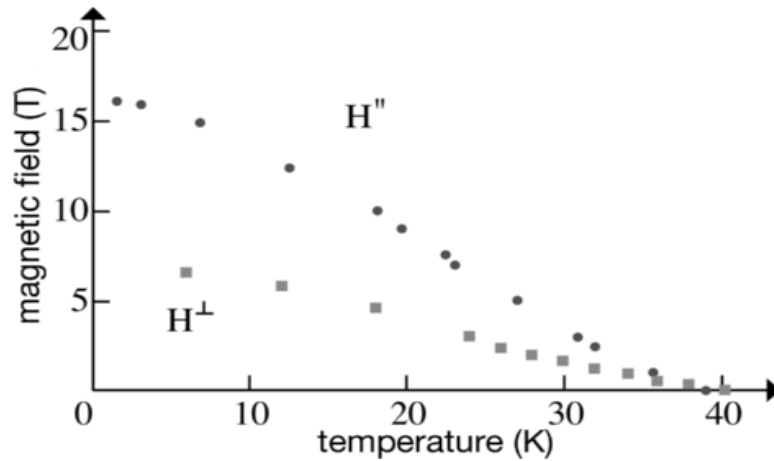
Αυτές οι ιδιότητες σε συνδυασμό με το μικρό κόστος, το μικρό βάρος, την σχετική ευκολία στην σύνθεσή του και στην δυνατότητα μορφοποίησης σε καλώδια και λεπτά υμένια, κάνουν το MgB_2 ελκυστικό για πολλές εφαρμογές αφήνοντας πολλές υποσχέσεις για ποικίλλες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας καθώς και ηλεκτρονικές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

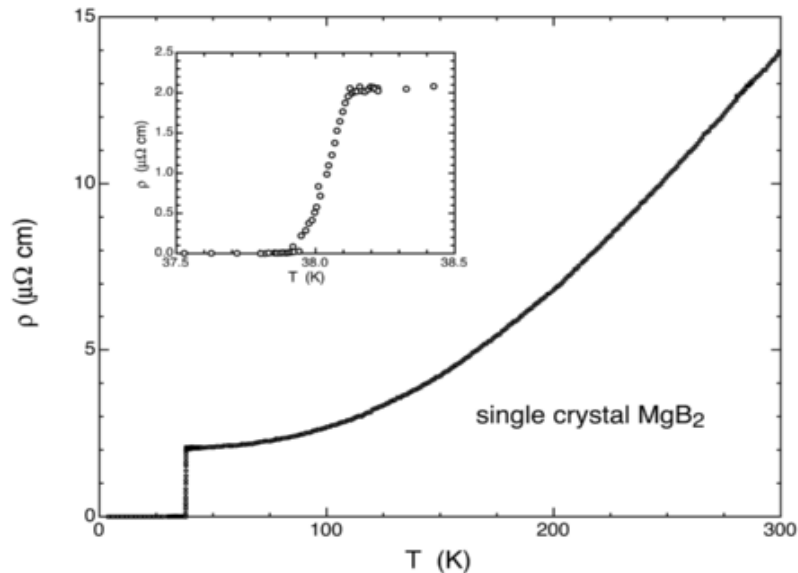


Σχ. 3.12: Σχηματική αναπαράσταση της κρυσταλλικής δομής του MgB_2 .

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 α είναι στη θερμοκρασία των 0K, $H_{c1}(0)\sim 0.35\text{T}$, ενώ το άνω κρίσιμο μαγνητικό πεδίο στους 0K 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 MgB_2 συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Σχ. 3.14: Ειδική αντίσταση του MgB_2 συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Οι ιδιότητες του MgB_2 , ειδικά οι μηχανικές, ποικίλουν αρκετά ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής της σκόνης. Συγκεντρωτικά, οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του MgB_2 φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Διβορίδιο Μαγνησίου

| | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Πυκνότητα Συμπαγούς Υλικού | $2,57 \text{ g/cm}^3$ |
| Μοριακό Βάρος | $45,93 \text{ g/mol}$ |
| Θερμοκρασία Τήξης | $\sim 830 \text{ }^\circ\text{C}$ |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 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_2 οφείλεται πρώτιστα στα διδιάστατα μεταλλικά επίπεδα του Βορίου ενώ η υψηλή T_c σχετίζεται με τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις ηλεκτρονίων-φωνονίων, τις υψηλές δονητικές ενέργειες των ελαφρών ατόμων του βορίου και την ύπαρξη και δεύτερου ενεργειακού χάσματος.

Το MgB_2 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_2 αφορούν ως επί τω πλείστω 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_2 . Οι περισσότερες χρησιμοποιούν έτοιμη σκόνη MgB_2 , 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_2 , είναι η αντίδραση που έχει με το νερό και 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 $Mg(OH)_2$, $MgCO_3$ και B_2O_3 . Η αντίδραση αυτή ακόμα, όταν έχει συμπιεστεί η σκόνη του υπεραγωγού, είναι εξώθερμη και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε έκρηξη. Μακροπρόθεσμα, το MgB_2 αντιδρά ακόμα και με τον αέρα, γι' αυτό στις εφαρμογές του απαιτείται καλή μόνωση (για περισσότερη ανάλυση, βλ. βιβλ. [28]).

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

4.1. Σκοπός

Γενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η όσο το δυνατόν πληρέστερη μελέτη της έλασης μορφής σε συνδυασμό με την μέθοδο PIT. Για αυτόν τον λόγο, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά υλικά από κάθε κατηγορία (κεραμικά και μέταλλα) και κατασκευάστηκαν δοκίμια βάσει των κυριότερων εφαρμογών που έχει το αντικείμενο της μελέτης μας στην βιομηχανία και την έρευνα. Όταν εξετάζουμε λοιπόν την μέθοδο PIT παράλληλα με την κατεργασία της έλασης μορφής, ο παραπάνω γενικότερος σκοπός μοιράζεται σε επιμέρους, δηλαδή σε ποιον βαθμό:

- ✓ Τα δοκίμια που σχεδιάστηκαν μπορούν να μορφοποιηθούν επιτυχώς με αυτήν την μεθοδολογία
- ✓ Οι τελικές γεωμετρίες, μικροδομές και ιδιότητές των δοκιμίων επηρεάζονται συναρτήσει των υλικών και των συνθηκών που χρησιμοποιούμε και τέλος
- ✓ Η μοντελοποίηση της όλης κατεργασίας ανταποκρίνεται στα πειραματικά δεδομένα.

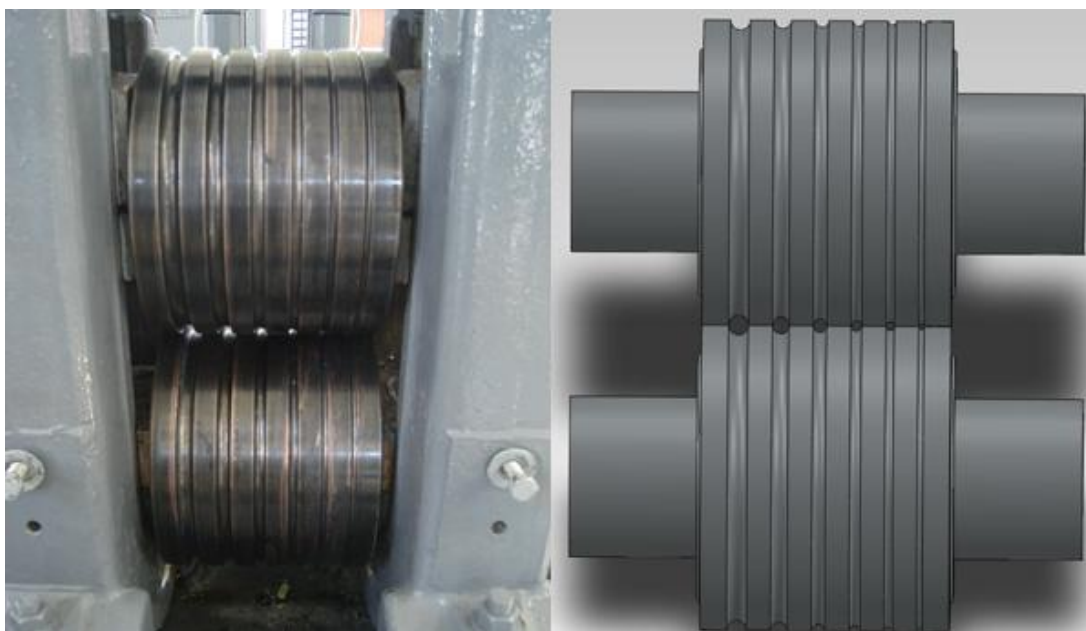
4.2. Διατάξεις

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: $d_1=15.5\text{mm}$, $d_2=13\text{mm}$, $d_3=10.5\text{mm}$, $d_4=8.5\text{mm}$, $d_5=6.5$, $d_6=5\text{mm}$. 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 ελαστρού.



Σχ. 4.2: Φωτογραφία (αριστερά) και σχεδίαση (δεξιά) της διάταξης των τυμπάνων με κυλινδρικές αυλακώσεις.

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), ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JEOL JSM 6390 (σχ. 4.5), διάταξη υπεραγώγιμων μετρήσεων και διάταξη XRD Bruker D-8 Focus, οι μεθοδολογίες των οποίων αναλύονται σε επόμενη ενότητα (4.5).



Σχ. 4.4: Φωτογραφία της διάταξης τού οπτικού μικροσκοπίου .



Σχ. 4.5: Φωτογραφία της διάταξης τού ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

4.3. Προετοιμασία και σχεδιασμός πειραμάτων

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο PIT και στη συνέχεια μορφοποιήθηκαν με έλαση μορφής ήταν σωληνοειδούς γεωμετρίας και όλα είχαν την παρακάτω δομή: μεταλλικό σωληνάκι (μήτρα) με ύψος $h=102\text{mm}$, βάθος για την πλήρωση με σκόνη $b=100\text{mm}$, εξωτερική διάμετρο 14mm και εσωτερική 11mm . Μόνη εξαίρεση στην παραπάνω δομή αποτέλεσε το 7^ο δοκίμιο, όπου για ερευνητικούς λόγους επιλέχθηκε εξωτερική διάμετρος 16mm , με όλες τις άλλες να παραμένουν ίδιες. Επομένως τα τοιχώματα ήταν για τον πάτο 2mm και για το περίβλημα $1,5\text{mm}$ ($2,5\text{mm}$ για το 7^ο δοκίμιο), ενώ η σκόνη καταλάμβανε όγκο $V = 10 \cdot \pi \cdot 1,1^2 / 4 = 9,5\text{cm}^3$. Κατασκευάστηκαν με διάτρηση σε τόρνο, στο μηχανουργείο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών της σχολής μηχανολόγων μηχανικών του ΕΜΠ (σχ. 4.6).



Σχ. 4.6: Φωτογραφία κατά την κατασκευή των δοκιμίων σε τόρνο.

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν να γεμίσουν με σκόνη και να μορφοποιηθούν στο έλαστρο μορφής σε διαδοχικά πάσα. Από τις 6 αυλακώσεις που είδαμε ότι έχουν τα ράουλά μας, το 1^ο ($15,5\text{mm}$) ήταν μεγαλύτερο από τα δοκίμια (πλην του 7^{ου} δοκιμίου), ενώ από τα αποτελέσματα που είχαμε μετά το 4^ο στη σειρά πάσο (5^ο του ελάστρου) κρίθηκε σκόπιμο να μην περάσουν τα δοκίμια από το τελευταίο πάσο. Έτσι πέρασαν το πολύ από 4 αυλακώσεις, ενώ σε αρκετά (κυρίως του αλουμινίου) τα δοκίμια διαλύθηκαν σε προηγούμενα πάσα.

Βάσει του σκοπού της εργασίας, επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικά υλικά για κάθε δοκίμιο (αναλύονται στην ενότητα 3.3). Η μεταλλική μήτρα ήταν από χαλκό ή από αλουμίνιο διαμόρφωσης, ενώ για το 8^ο δοκίμιο επιλέχθηκε χυτό αλουμίνιο («χελώνας»). Οι σκόνες κρίθηκε σκόπιμο να είναι μία υπεραγωγίμη (MgB_2), μία κεραμική (MgO), μία μεταλλική (Mg) και ένα μείγμα κεραμικής και μεταλλικής (TiC & Al). Οι σκόνες ήταν μικρής κοκκομετρίας, το πολύ $50\mu\text{m}$.

Η επιλογή των συνδυασμών έγινε ως εξής: Αρχικά είχαν επιλεγεί 3 σκόνες (εκτός της μεταλλικής) και 2 υλικά μήτρας (χωρίς το χυτό Al). Επομένως οι συνδυασμοί ήταν 6. Όμως στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί σωληνάκι αλουμινίου με παχύτερο τοίχωμα αλλά και διαφορετικό τύπου αλουμινίου, καθώς τα 3 σωληνάκια με το αλουμίνιο διαμόρφωσης πάχους 1,5mm δεν άντεξαν πάνω από 2 πάσα. Τέλος, δοκιμάστηκε δοκίμιο με μήτρα χαλκού και αμιγώς μεταλλική σκόνη (Mg) για λόγους πληρότητας της μελέτης.

Συνολικά είχαμε λοιπόν 9 δοκίμια:

| A/A | Σκόνη | Μήτρα |
|-----|------------------|------------|
| 1 | MgB ₂ | Cu |
| 2 | MgB ₂ | Al |
| 3 | MgO + | Cu |
| 4 | MgO + | Al |
| 5 | TiC+Al | Cu |
| 6 | TiC+Al | Al |
| 7 | TiC+Al | Al (2,5mm) |
| 8 | MgO + | Al (c) |
| 9 | Mg | Cu |

Το «+» στα δοκίμια με MgO υποδηλώνει ότι, εκτός της κεραμικής σκόνης, στο εσωτερικό του σωλήνα τοποθετήθηκε σύρμα χαλκού, h=60mm, d=2mm, και βάσει της πυκνότητας του Cu, η μάζα του ήταν 1,5g. Αυτό έγινε για να μελετήσουμε κατά πόσο είναι δυνατή η κατασκευή του καλωδίου Pyro (ενότητα 3.3) με αυτήν την μεθοδολογία. Το σύρμα Cu τοποθετήθηκε με δράπανο αφού είχε πληρωθεί με σκόνη ο σωλήνας, όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία (σχ. 4.7).



Σχ. 4.7: Φωτογραφία διάτρησης ορισμένων δοκιμών για τοποθέτηση σύρματος Cu και τελική μορφή.

Το μείγμα σκόνης TiC&Al με βάση την βιβλιογραφία [24] και την ενότητα 3.3, επιλέχθηκε να είναι με αναλογία μαζών TiC:Al 2:1 (πυκνότητα μείγματος ίση με $3,87\text{g/cm}^3$), με τις νιφάδες Al, όπως είδαμε και στη θεωρία, να υποβοηθούν τη μορφοποίηση της σκληρής σκόνης TiC και να μειώνουν το συνολικό βάρος. Από τα δοκίμια με σύρμα χαλκού επίσης αφαιρέθηκε ο όγκος και η μάζα του από τους τελικούς υπολογισμούς. Τα σωληνάκια τέλος πληρώθηκαν με σκόνη και συμπιέστηκαν με πίεση ασκούμενη από σφυρί, μέχρι να γεμίσουν σχεδόν πλήρως.

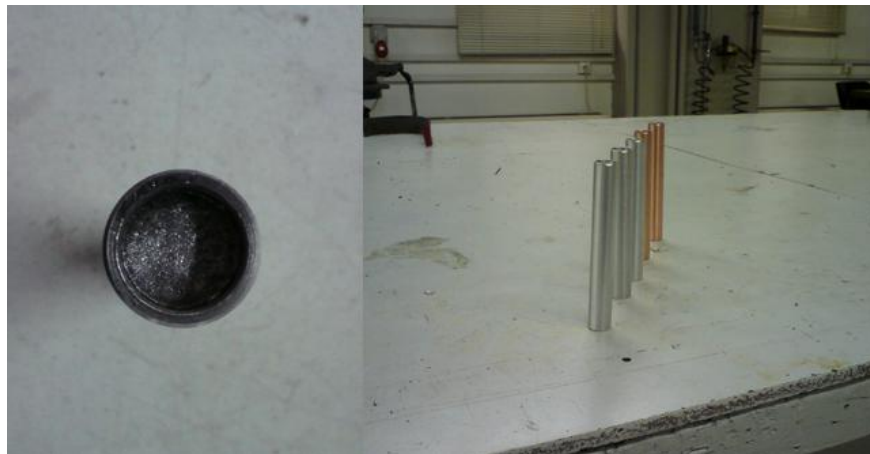
Από τους παρακάτω πίνακες (πυκνότητας σκονών και μετρήσεων βαρών), βλέπουμε την τελική δομή που έχουν τα δοκίμιά μας πριν τα μορφοποιήσουμε:

| A/A | Σκόνη | Μήτρα | Βάρος Αδειου Σωλήνα (g) | Αναμενόμενο Βάρος Σκόνης (g) | Τελικό Βάρος Σκόνης (g) | ΤΕΛ / ANAM % | Πορώδες |
|-----|------------------|------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------|---------|
| 1 | MgB ₂ | Cu | 56 | 24,4 | 16 | 66% | 34% |
| 2 | MgB ₂ | Al | 17,3 | 24,4 | 16 | 66% | 34% |
| 3 | MgO + | Cu | 55,8 | 34 | 7 | 21% | 79% |
| 4 | MgO + | Al | 17,9 | 34 | 7 | 21% | 79% |
| 5 | TiC+Al | Cu | 55,5 | 36,75 | 22 | 60% | 40% |
| 6 | TiC+Al | Al | 18,1 | 36,75 | 22 | 60% | 40% |
| 7 | TiC+Al | Al (2,5mm) | 34,1 | 36,75 | 22 | 60% | 40% |
| 8 | MgO + | Al (c) | 15,8 | 34 | 7 | 21% | 79% |
| 9 | Mg | Cu | 59,9 | 16,5 | 9,8 | 59% | 41% |

| Σκόνες | ρ συμπαγούς υλικού (g/cm^3) | ρ σωλήνα (g/cm^3) |
|------------------|---|-----------------------------------|
| MgB ₂ | 2,57 | 1,68 |
| MgO | 3,58 | 0,74 |
| TiC+Al | 3,87 (4,93 & 2,7 σε 2:1 κατά μάζα) | 2,32 |
| Mg | 1,738 | 1,03 |

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι μεγαλύτερη συμπίεση επετεύχθει αρχικά (με σφυρηλάτηση) στην σκόνη MgB₂, ενώ μικρότερη στο MgO, πιθανότατα λόγω κοκκομετρίας (βλ. ενότητα 3.2, σχ. 3.2), αφού η σκόνη MgB₂ είχε μέγεθος κόκκου

περίπου 50 μ m, ενώ η αντίστοιχη τού MgO γύρω στα 10 μ m (πούδρα). Κατά την σφυρηλάτηση της σκόνης μέσα στον σωλήνα, είχαμε λοιπόν μια αύξηση της πυκνότητας (σε σύγκριση με την πυκνότητα που θα είχαμε χωρίς την σφυρηλάτηση που κυμάνθηκε από 65% μέχρι 85%).



Σχ. 4.8: Φωτογραφία δείγματος Al-TiC&Al (δεξιά) και ορισμένα δοκίμια (αριστερά) πριν την μορφοποίηση.

Κατά την μορφοποίηση, είπαμε ότι τα δοκίμια πέρασαν από 4 το πολύ 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, ενώ η κατεργασία βιντεοσκοπείται.
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) και βάρους (W), καθώς και φωτογράφιση, όλα μετά από κάθε πάσο.
4. Κόψιμο δείγματος αν ήταν μετά το 2^ο πάσο και στο τέλος της κατεργασίας.



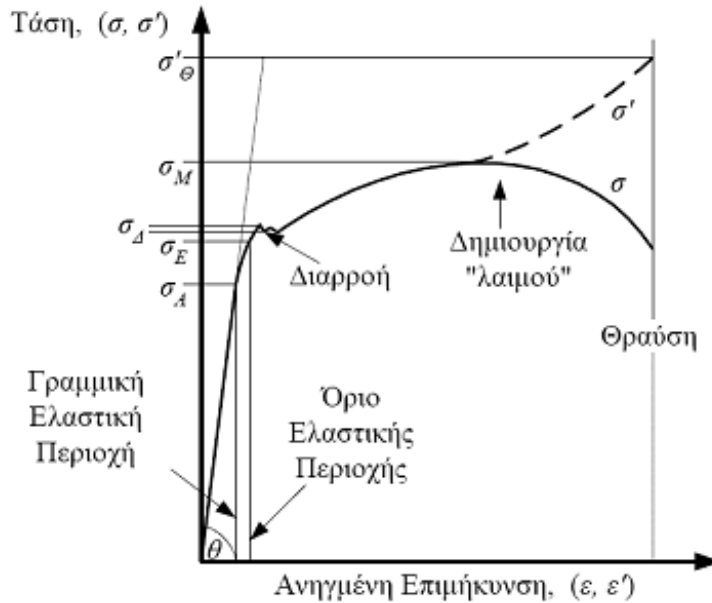
Σχ. 4.9: Φωτογραφία δοκιμίου μετά το πέρασμα ανάμεσα στα ράουλα, με τις προεξοχές που δημιουργούνται και πρέπει να αφαιρεθούν.

Τελικά, με βάση ποια δείγματα άντεξαν και τα 4 πάσα και ποια έσπασαν νωρίτερα, κόψαμε από τα δοκίμια στο 2^ο πάσο ή στο τέλος της κατεργασίας 9 δείγματα για το καθένα +4 για όσα άντεξαν μέχρι και το 3ο πάσο και βγήκαν σε συμπαγή μορφή +3 επιπλέον από το MgB₂ που προσβλήθηκαν με νερό μετά την μορφοποίηση με στόχο τον χαρακτηρισμό τους. Επομένως είχαμε σύνολο 16 δείγματα.

4.4. Δοκιμή Εφελκυσμού χρησιμοποιούμενων μετάλλων

Σκοπός της δοκιμής του εφελκυσμού είναι ο καθορισμός της συμπεριφοράς των υλικών όταν καταπονούνται σε εφελκυστικά φορτία και ο προσδιορισμός διαφόρων μηχανικών τους ιδιοτήτων όπως είναι η τάση αναλογίας, η τάση διαρροής, το μέτρο ελαστικότητας του Young, η ολκιμότητα, η επιμήκυνση θραύσης και άλλες. Επιπλέον σε μια τυπική δοκιμασία εφελκυσμού κατασκευάζουμε το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του εξεταζόμενου υλικού.

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την κλίση της ευθείας που έχει το διάγραμμα στην ελαστική περιοχή, ενώ η ολκιμότητα (επιμήκυνση θραύσης) από την σχέση $D = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100$, με l_o το αρχικό και l_f το τελικό μήκος (μήκος θραύσης). Οι τιμές προκύπτουν από το συμβατικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων, αλλά και οι πραγματικές τιμές δίνουν τις ίδιες μορφής διάγραμμα μέχρι την περιοχή του λαιμού ενώ οι σχέσεις που συνδέουν τα δύο αυτά μεγέθη είναι $\sigma' = \sigma(1 + \epsilon)$ & $\epsilon' = \ln(1 + \epsilon)$, αφού $\epsilon' = \ln(l_f - l_o)$.



Σχ. 4.10: Διάγραμμα συμβατικών(σ,ε) και πραγματικών(σ',ε') τάσεων-παραμορφώσεων.

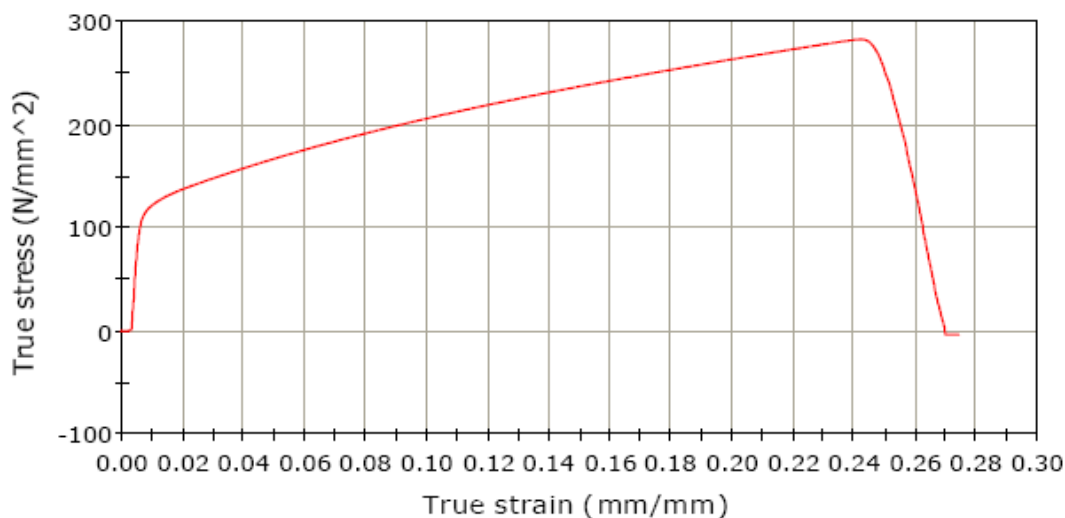
Για την παρούσα εργασία, έγινε χρήση της διάταξης μηχανικών δοκιμών INSTRON (σχ. 4.11), η οποία με χρήση του κατάλληλου λογισμικού (BlueHill) υπολογίζει αυτόματα τα παραπάνω μεγέθη και κατασκευάζει το επιθυμητό διάγραμμα. Αφού λοιπόν το δοκίμιο από το εκάστοτε υλικό τοποθετήθηκε στις αρπάγες και εισήχθησαν τα απαραίτητα δεδομένα στο πρόγραμμα (όπως η διατομή και το ενεργό μήκος), επιμηκύνθηκε με σταθερό ρυθμό (5mm/min) μέχρι την θραύση του.



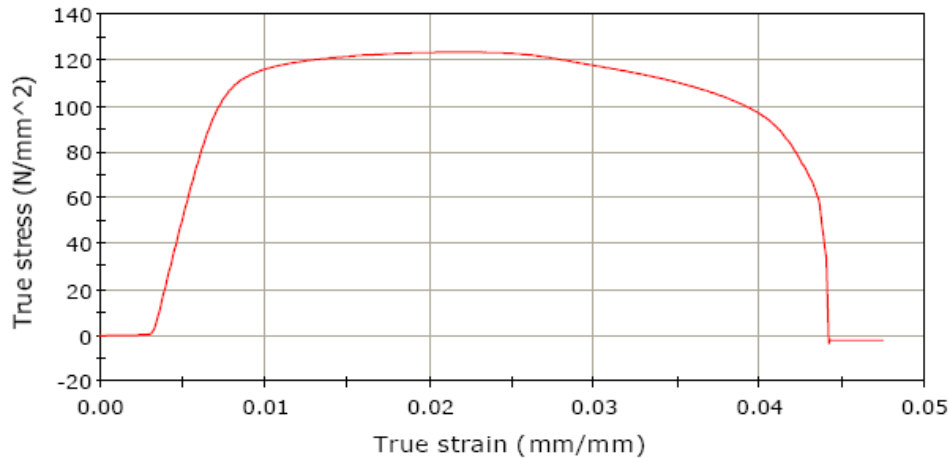
Σχ. 4.11: Φωτογραφία διάταξης μηχανικών δοκιμών (εφελκυσμού) INSTRON.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σαν μεταλλική μήτρα (για τον σωλήνα) ήταν χαλκός και αλουμίνιο. Καθώς το αλουμίνιο είναι πιο ψαθυρό και παρατηρήθηκε άμεση θραύση του σωλήνα μετά το πρώτο πάσο, έγινε δοκιμή χυτού αλουμινίου το οποίο είναι πιο όλκιμο, με ελαφρώς μόνο καλύτερα αποτελέσματα.

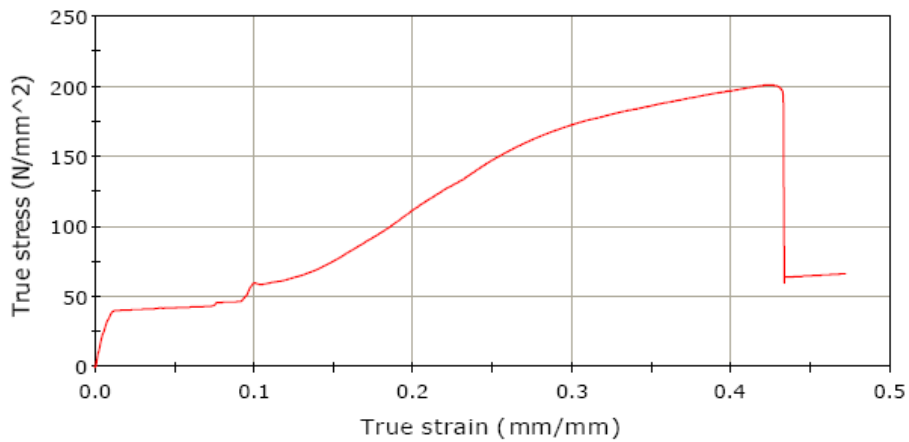
Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν βάσει των διαγραμμάτων πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων της δοκιμής εφελκυσμού δίδονται παρακάτω:



Σχ. 4.12: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για τον χρησιμοποιούμενο Cu.



Σχ. 4.13: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το χρησιμοποιούμενο Al



Σχ. 4.14: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το χρησιμοποιούμενο χυτό Al.

| | Cu | Al | Al χυτό |
|---------------------|--------|-------|---------|
| Μέτρο Young (GPa) | 105 | 65 | 45 |
| Τάση Διαρροής (MPa) | 120 | 110 | 40 |
| Τάση Θραύσης (MPa) | 290 | 125 | 200 |
| Ολκιμότητα % | 31,00% | 5,13% | 41,91% |

Βλέπουμε ότι η ολκιμότητα του χυτού αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του αλουμινίου διαμόρφωσης και είναι ακόμα και μεγαλύτερη και από αυτήν του χαλκού. Όμως η τάση διαρροής του είναι πολύ μικρή, γι' αυτό όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα, δεν προσέφερε σημαντική βελτίωση της κατεργασιμότητας. Ο χαλκός, με καλή ολκιμότητα και υψηλές τάσης διαρροής και θραύσης ήταν η αποτελεσματικότερη μήτρα, όπως εξάλλου ήταν αναμενόμενο.

4.5. 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 του τελικού προϊόντος, αναγκαστικά λοιπόν με καταστροφικές μεθόδους (αφού αφαιρέθηκε δείγμα).

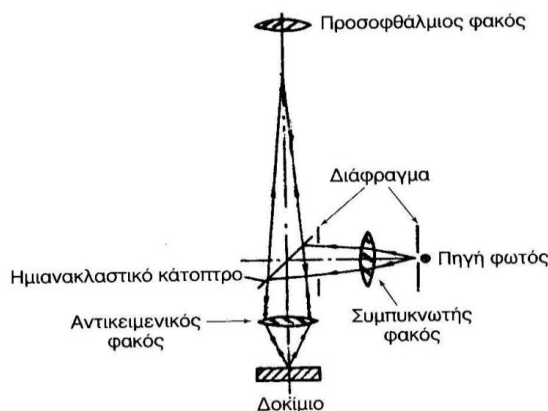
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

- Οπτική Μικροσκοπία (ΟΜ): με κύριο γνώμονα την μελέτη της διεπιφάνειας μήτρας-σκόνης και μια γενική αρχική παρατήρηση.
- Ηλεκτρονική Μικροσκοπία (SEM): με κριτήριο την προσεκτικότερη μελέτη της σκόνης.
- Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD): Μελέτη των κρυσταλλικών επιπέδων της δομής για την υπεραγώγιμη σκόνη μας (MgB_2).
- Υπεραγώγιμες Μετρήσεις: Μέτρηση της κρίσιμης θερμοκρασίας και του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου υπεραγωγιμότητας.

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

4.5.1. Οπτικό μικροσκόπιο (ΟΜ)

Για τα οπτικά μικροσκόπια, η μέγιστη μεγεθυντική ικανότητα είναι περίπου $\times 1000$ ($\sim 200\text{nm}$) 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. 4.15: 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.

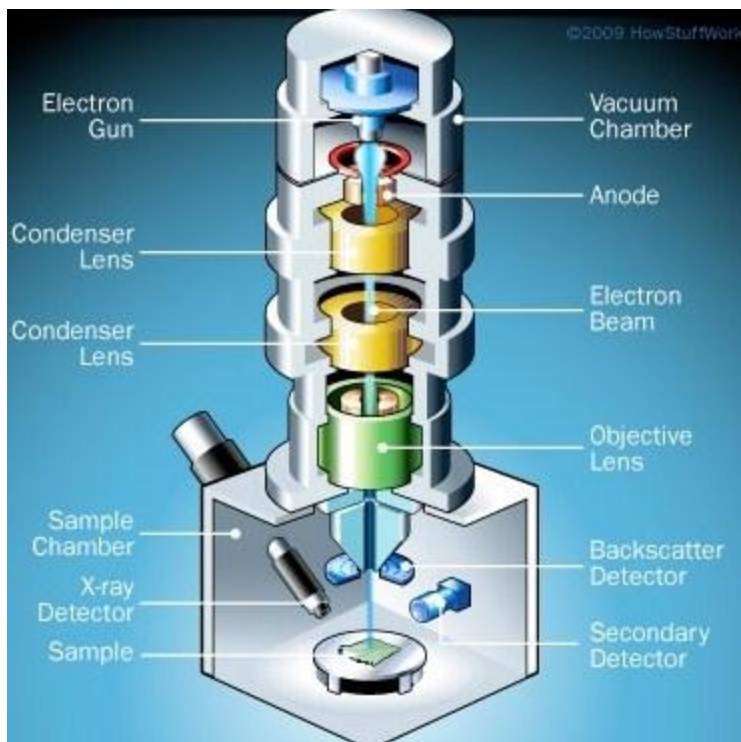
4.5.2. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών και για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της (EDAX) υπό παρατήρησης εικόνας σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης.

Μια ηλεκτρονική δέσμη μικρής διαμέτρου σαρώνει (scan) μια ορθογώνια περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου. Συγχρόνως και σε απόλυτο συγχρονισμό σαρώνεται μια αντίστοιχη επιφάνεια φθορίζουσας οθόνης που βρίσκεται στο άκρο ενός καθοδικού σωλήνα (Cathode Ray Tube – CTR). Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή και οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφάνειας. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών από τις ακτίνες X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εξέταση ενός αντικειμένου στο SEM είναι η ηλεκτρική του αγωγιμότητα, αλλιώς θα είχαμε θέρμανση του υλικού και φαινόμενα φθορισμού. Εάν το προς εξέταση δείγμα έχει μονωτικό χαρακτήρα συνήθως επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα αγώγιμου υλικού (π.χ. χρυσού επιστρώματος), ενώ μπορεί να γίνει χρήση και διαφόρων αγώγιμων ταινιών στο κάτω μέρος του δοκιμίου.

Οι εφαρμογές του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης αφορούν οτιδήποτε σχετίζεται με τη σύσταση και την μορφολογία της μικροδομής. Η ευκολία και η ταχύτητα εξαγωγής συμπερασμάτων όσον αφορά τις φάσεις, την γεωμετρία, τις επιφανειακές επικαλύψεις και την διάβρωση του υλικού προς μελέτη, το κάνουν απαραίτητο όργανο έρευνας με εύρος εφαρμογών που ξεκινά από την μεταλλοτεχνία και καταλήγει μέχρι και στα βιολογικά υλικά. Αξίζει λοιπόν να δούμε πως λειτουργεί (σχ. 4.16.).



Σχ. 4.16: Διάγραμμα λειτουργίας ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Η διάταξη αποτελείται από πηγή ηλεκτρονίων (ηλεκτρονιοβόλο) που δημιουργεί την αρχική δέσμη που εστιάζεται και οδεύει προς την επιφάνεια του υλικού. Η στήλη της παραγωγής των ηλεκτρονίων λειτουργεί σε συνθήκες κενού ($<10^{-3}$ Pa) χάριν δύο αντλιών κενού, τόσο για τη σωστή καθοδήγηση της πρωτογενούς ακτινοβολίας και την αποφυγή συγκρούσεων με τα μόρια του αέρα ή της υγρασίας, όσο και για την ικανοποιητική ποιότητα του εμφανιζόμενου στην οθόνη ειδώλου. Παράλληλα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην διάταξη, το κενό είναι απαραίτητο για να μην έχουμε ανάφλεξη του νήματος.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων παράγεται στο ανώτερο μέρος του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, ύστερα από τη θέρμανση κοντά στους 2500°C (φαινόμενο Joule) λεπτού νήματος βολφραμίου διαμέτρου $0,25\text{nm}$ και παραγωγή ηλεκτρονιακού νέφους. Το νήμα περιβάλλεται από έναν αρνητικά φορτισμένο κύλινδρο και έτσι τα ηλεκτρόνια οδηγούνται σε μία κηλίδα συγκεκριμένης διαμέτρου ($0,4\text{--}5\text{nm}$). Στη συνέχεια ακολουθούν μια κατακόρυφη πορεία χάριν της μεγάλης διαφοράς δυναμικού ($1\text{--}40\text{kV}$), διαμέσου της οπτικής στήλης του μικροσκοπίου και εστιάζεται με τη βοήθεια κυλινδρικών ηλεκτρομαγνητικών φακών στο παρατηρούμενο δείγμα. Οι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί -δηλαδή σωληνοειδή πηνία- είναι η μόνη εφαρμόσιμη λύση παρ' όλες τις ατέλειες (χρωματική & σφαιρική εκτροπή) λόγω σπειροειδούς κίνησης των ηλεκτρονίων, καθώς τα τελευταία δεν διαθλώνται σε γυάλινους φακούς. Μετά την αλληλεπίδραση της δέσμης με το δοκίμιο, παράγονται δευτερογενή ηλεκτρόνια, τα

οποία συλλέγονται από ειδικούς ανιχνευτές και μετατρέπονται σε σήμα που μπορεί να ληφθεί από το σύστημα. Δύο συγκεντρωτικοί φακοί βρίσκονται στο πάνω μέρος της στήλης και ένας στο κάτω μέρος, λίγο πάνω από το δοκίμιο για την τελική εστίαση της δέσμης στο αντικείμενο.

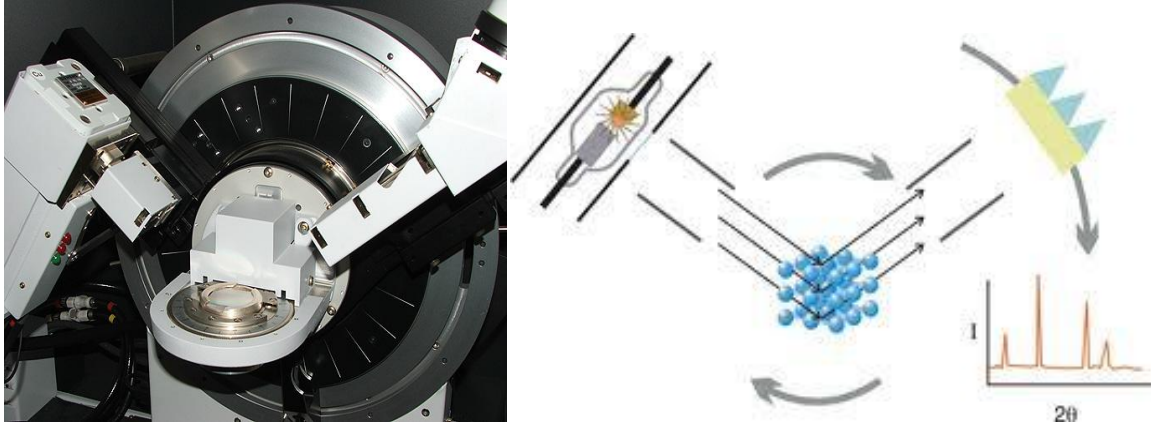
Η διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου και άρα η ποιότητα εικόνας του δοκιμίου που θα προκύψει στο τέλος εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και το σχήμα της διατομής της δέσμης, με το μικρότερο και το κυλινδρικό να αποτελούν τις ιδανικές συνθήκες, ενώ και η μεγαλύτερη ένταση της δέσμης των ηλεκτρονίων επηρεάζει θετικά το τελικό αποτέλεσμα.

Αφού λοιπόν η δέσμη οδηγηθεί στο δοκίμιο, είναι απαραίτητο να σαρώσουμε την επιφάνεια και αυτό γίνεται με την βοήθεια πηνίων σάρωσης. Αυτά ενεργοποιούνται από την μεταβαλλόμενη τάση που παράγει η γεννήτρια σάρωσης, ενώ παράλληλα η ίδια τάση εφαρμόζεται και στους ακροδέκτες του καθοδικού σωλήνα της οθόνης, έτσι ώστε το σχήμα μετακίνησης της δέσμης των ηλεκτρονίων να αναπαράγεται με ακρίβεια από την απόκλιση του φωτεινού σημείου επί της οθόνης.

Τέλος, η διάταξη του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου αποτελείται από μια σειρά ανιχνευτών και ενισχυτών, που μετατρέπουν σε τάση τα ηλεκτρόνια και την ακτινοβολία που προκύπτουν κατά την αλληλεπίδραση της δέσμης των ηλεκτρονίων με το αντικείμενο. Με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος του καθοδικού σωλήνα και άρα την ένταση της φωτεινής κηλίδας στην οθόνη. Η τοπογραφία του δοκιμίου είναι ακριβώς οι χιλιάδες κηλίδες διαφορετικής έντασης πάνω στην οθόνη που διαδέχονται ταχύτατα η μία την άλλη.

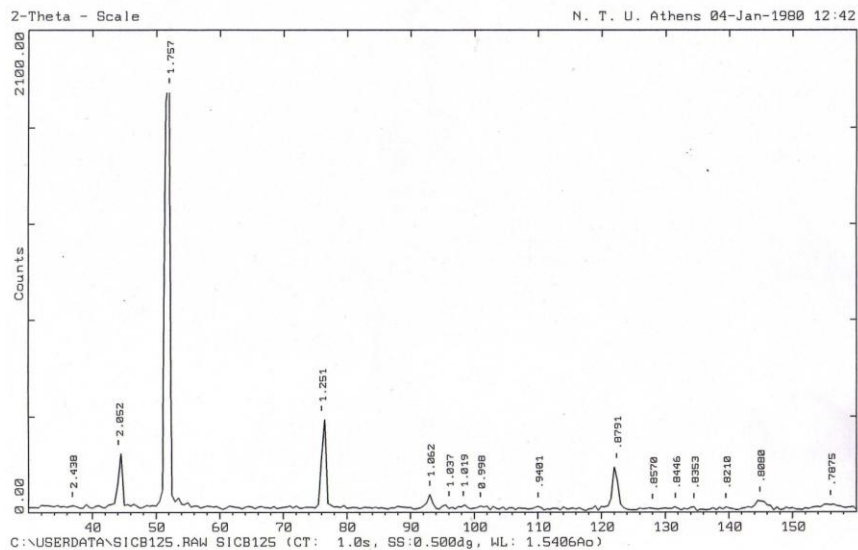
4.5.3. Τεχνική Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD)

Η εξαγωγή συμπερασμάτων για τον προσανατολισμό των κρυσταλλινών ενός υλικού κατά την τεχνική XRD γίνεται με αρκετές μεθόδους. Η πλέον κλασσική μέθοδος Περίθλασιμετρίας πολυκρυσταλλικών υλικών είναι των Debye-Scherrer (μέθοδος DS). Σύμφωνα με αυτήν, η μονοχρωματική ακτινοβολία Χ που προσπίπτει σε περιστρεφόμενο δοκίμιο κατά γωνία θ περιθλάται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε κρυσταλλικό επίπεδο (100, 110 κλπ), σύμφωνα πάντα με τη συνθήκη Bragg, η οποία είναι $n\lambda = 2d\sin\theta$, όπου n είναι η τάξη της περίθλασης, λ το μήκος κύματος, θ η γωνιά περίθλασης και d η διαπλεγματική απόσταση.



Σχ. 4.17: Τυπική διάταξη και διάγραμμα λειτουργίας της τεχνικής περίθλασης ακτίνων Χ.

Έτσι λοιπόν το αποτέλεσμα μιας μέτρησης XRD είναι ένα διάγραμμα, το οποίο δείχνει τις παρούσες φάσεις (θέση της κορυφής), την συγκέντρωση των φάσεων (ύψος κορυφής), το περιεχόμενο της άμορφης φάσης (βάθος) και το μέγεθος των κρυσταλλιτών (εύρος κορυφής). Μεγάλοι κρυσταλλίτες δίνουν οξείες κορυφές, ενώ το εύρος μεγαλώνει όσο το μέγεθος των κρυσταλλιτών μικραίνει. Ένα τυπικό διάγραμμα μέτρησης XRD φαίνεται παρακάτω (σχ. 4.18) για κράμα Ni-SiC:



Σχ. 4.18: Τυπικό διάγραμμα της τεχνικής περίθλασης ακτίνων Χ.

Γενικά, στο διάγραμμα περίθλασης ακτίνων Χ κάθε κορυφή αυτού αντιστοιχεί σε γωνία 2θ , στην οποία υφίσταται μέγιστη ανάκλαση, δηλαδή ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg για μια οικογένεια πλεγματικών επιπέδων. Οι γωνίες 2θ (γωνία περιστροφής του ανιχνευτή) των ανακλάσεων εξαρτώνται από το σχήμα και το μέγεθος της μοναδιαίας κυψελίδας του υλικού, δηλαδή τα προσδιοριζόμενα μήκη d είναι χαρακτηριστικά για κάθε υλικό. Επιπλέον, οι εντάσεις των κορυφών του διαγράμματος εξαρτώνται από το

είδος και τη θέση των ατόμων στη μοναδιαία κυψελίδα, καθώς και από την ικανότητα σκέδασης της ακτινοβολίας.

Η μέθοδος XRD αποτελεί την βασικότερη τεχνική ανάλυσης της κρυσταλλικής δομής και του χαρακτηρισμού υλικών, καθώς παρέχει ποιοτική και ποσοτική ανάλυση φάσεων, αλλά και ανίχνευση του κρυσταλλογραφικού ιστού.

4.5.4. Υπεραγώγιμες Μετρήσεις

Τα μεγέθη που κυρίως μας αφορούν στην μέτρηση της υπεραγωγιμότητας τού υλικού μας είναι η κρίσιμη θερμοκρασία T_c και το κρίσιμο μαγνητικό πεδίο H_c , το άνω H_{c1} και το κάτω H_{c2} (ενότητα 3.3.3). Έτσι, ήταν απαραίτητο να δούμε με ποιον τρόπο η κατεργασία (έλαση) που υπέστη το υλικό επηρέασε αυτά τα δύο μεγέθη.

Η T_c των υπεραγωγών, επομένως και τού MgB_2 , εξαρτάται από την υδροστατική πίεση που του ασκείται: έχει βρεθεί πως αυξανόμενης της υδροστατικής πίεσης η T_c μειώνεται χωρίς ωστόσο να υπάρχει συμφωνία για τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της σχέσης. Σε ένα ιστροπικά ομογενές δείγμα η μείωση αυτή περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{dT_c}{dP} = -1.11 \pm 0.02 \frac{K}{GPa}$$

Έτσι βλέπουμε πως στο MgB_2 η κρίσιμη θερμοκρασία πέφτει όσο μεγαλύτερη πίεση του ασκείται. Αντίστοιχα, το H_c επίσης μειώνεται αυξανόμενης της πίεσης.

Επομένως, η συμπίεση, αν και απαραίτητη για την μορφοποίηση του υλικού μας, επιδρά αρνητικά στην υπεραγωγιμότητα. Γι' αυτό είναι σημαντικό, όχι μόνο από θέμα ενέργειας, αλλά και καλύτερων ιδιοτήτων τού υλικού, να έχουμε όσο το δυνατόν βέλτιστη κατεργασία, με το μικρότερο δυνατό έργο συμπίεσης.

5. Υπολογιστική προσομοίωση [11, 12, 16, 17, 19, 29-33, 42, 43]

5.1. Μοντελοποίηση Κατεργασιών και Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Η εξέλιξη της μοντελοποίησης των κατεργασιών ήταν επιτακτική ανάγκη καθώς η εξαγωγή συμπερασμάτων από αναλυτικά και εμπειρικά μοντέλα περιοριζόταν σε πολύ απλά προβλήματα με πολλές παραδοχές και η πειραματική μέθοδος ήταν χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος για την εξαγωγή επαρκών συμπερασμάτων. Έτσι από τη δεκαετία του '50 και μετά, όπου και με τη βοήθεια των υπολογιστών οι μαθηματικές πράξεις μπορούσαν να γίνουν γρηγορότερα, παρουσιάστηκαν οι πρώτες αριθμητικές μέθοδοι μοντελοποίησης των κατεργασιών και τα τελευταία χρόνια άρχισε να χρησιμοποιείται και η μοντελοποίηση με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Με τον όρο μοντελοποίηση καλούμε την διαδικασία κατά την οποία προβλέπουμε τις φυσικές συμπεριφορές ενός προβλήματος με την εισαγωγή κάποιων γνωστών συνθηκών και με χρήση κάποιων μαθηματικών σχέσεων. Στις κατεργασίες, η μοντελοποίηση αρχικά περιορίστηκε από τη μικρή ισχύ της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) του υπολογιστή και την πληθώρα των πράξεων που απαιτούνται σε απλές εφαρμογές, διδιάστατες και με πολλές οριακές συνθήκες. Έτσι μόνο τα τελευταία χρόνια έγινε δυνατό να προσομοιωθεί τρισδιάστατα η κατεργασία. Χάριν της μοντελοποίησης μπορούμε όχι μόνο να αναπαραστήσουμε μια κατεργασία και την ελέγχουμε, αλλά να την βελτιστοποιήσουμε, με δοκιμές που κοστίζουν πλέον μόνο χρόνο επεξεργασίας σε υπολογιστή.

Στις κατεργασίες λοιπόν τα διάφορα μοντέλα που χρησιμοποιούνται προσπαθούν να συνδέσουν το αίτιο, δηλαδή τους παράγοντες και τις συνθήκες της κατεργασίας, με το αποτέλεσμα, δηλαδή τις δυνάμεις, τις τάσεις τις θερμοκρασίες που θα αναπτυχθούν κ.ά. Υπάρχουν αρκετά αριθμητικά μοντέλα, όπως των συνοριακών στοιχείων, των πεπερασμένων διαφορών και φυσικά των πεπερασμένων στοιχείων.

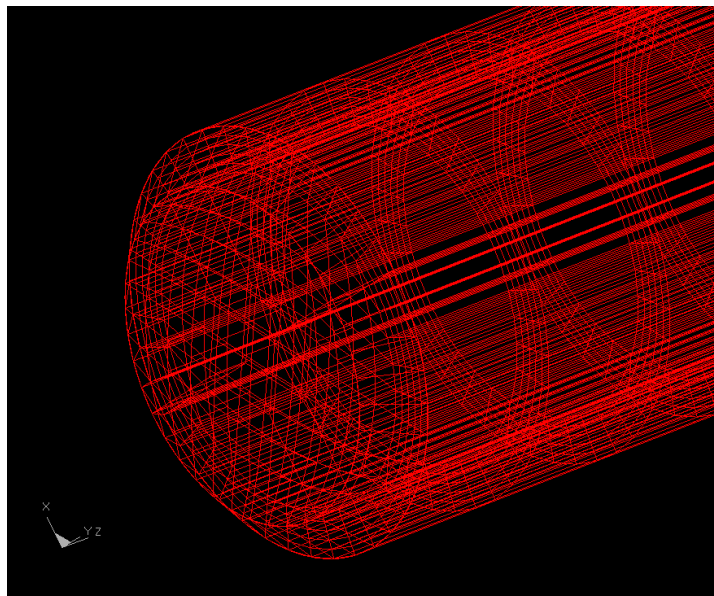


Σχ. 5.1: Τυπικός τρόπος μοντελοποίησης κατεργασίας διαμόρφωσης.

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM)

Το αριθμητικό μοντέλο που συναντάται κυρίως στις κατεργασίες είναι των πεπερασμένων στοιχείων, για την μοντελοποίηση συνεχών μέσων που συναντούνται σε αυτές (τεμάχια, εργαλεία κλπ). Η μέθοδος αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για επίλυση τασικών πεδίων σε προβλήματα μηχανικής, εξελίχθηκε και πλέον αναλύει προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ρευστομηχανικής κ.ά. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προοδευτικά βρήκε εφαρμογή στις κατεργασίες, είτε κοπής είτε διαμόρφωσης.

Η μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά με τη διακριτοποίηση των συνεχών μέσων της κατεργασίας. Ο χώρος που αυτά καταλαμβάνουν χωρίζεται σε τετράγωνα ή σε τρίγωνα (σε διδιάστατο πρόβλημα, στο τρισδιάστατο έχουμε ανάλογο πλέγμα) και ενώνονται αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία με κόμβους. Οι κόμβοι μας δίνουν πληροφορίες για το μέγεθος ή τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και ο βαθμός ελευθερίας τους προσδιορίζεται από τον αριθμό των μεγεθών που αναφέρονται σε αυτούς, δηλαδή των αγνώστων. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι πάντα ομοιόμορφο. Ειδικά σήμερα μπορούν να κατασκευαστούν πλέγματα πυκνότερα σε περιοχές του χώρου μοντελοποίησης που μας ενδιαφέρουν περισσότερο και αραιότερα σε περιοχές μικρού ενδιαφέροντος, με χρήση ειδικών αλγορίθμων.



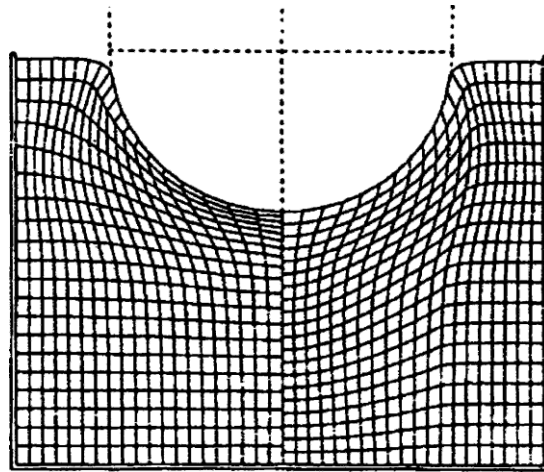
Σχ. 5.2: Τρόπος μοντελοποίησης κυλινδρικού τεμαχίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στη συνέχεια δίνονται ιδιότητες στα στοιχεία ανάλογα με τις ιδιότητες του μέσου που μοντελοποιούν και δίνονται οριακές συνθήκες στους κόμβους. Τέλος λύνονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που είναι σε μητρική μορφή, και υπολογίζονται οι τιμές κάθε

βαθμού ελευθερίας. Προφανώς όσο περισσότερους κόμβους έχουμε, τόσο πιο καλά προσεγγίζεται το πραγματικό πρόβλημα που έχει απείρους (θεωρητικά). Βέβαια ο υπολογισμός κάθε πεπερασμένου στοιχείου απαιτεί υπολογιστικό χρόνο και έτσι δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε υπερβολικά τον αριθμό των κόμβων αν θέλουμε να έχουμε αποτέλεσμα σε λογικό χρόνο. Η χρήση του υπολογιστή επιβάλλεται για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με τη FEM και εκτός των γρήγορων υπολογισμών, μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε πιο παραστατική μορφή.

Πιο συγκεκριμένα για τις κατεργασίες, δεν είναι πλέον απαραίτητος ο προγραμματισμός όλης της παραπάνω διαδικασίας, καθώς κυκλοφορούν αξιόπιστοι εμπορικοί κώδικες που είναι συμβατοί με προσωπικούς υπολογιστές. Ο γενικός τρόπος λειτουργίας τους περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του προβλήματος ανάλογα με τις απλοποιήσεις, τις οριακές συνθήκες και τα μεγέθη προς μοντελοποίηση (αυτά που αφορούν τον χρήστη, όπως οι μηχανικές τάσεις), ακολουθεί η μοντελοποίηση του προβλήματος με διακριτοποίηση του χώρου και των μέσων (τεμάχιο, εργαλείο κλπ) ανάλογα με τις ιδιότητες και τις αρχικές συνθήκες και τέλος κατασκευάζονται τα απαραίτητα μητρώα που θα επιλυθούν με τις παραμέτρους που επιθυμεί ο χρήστης. Το παραπάνω κομμάτι συνήθως αναφέρεται ως προεπεξεργασία (pre-processing). Η επίλυση των μητρώων αναφέρεται συνήθως ως solver και η προβολή των αποτελεσμάτων και ενδεχομένως η επεξεργασία τους ως μετεπεξεργασία (post-processing).

Για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση των μέσων μεταξύ τους και που υπολογίζουν τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν, εφαρμόζονται συνήθως δύο αριθμητικοί τρόποι: Οι μοντελοποιήσεις του Lagrange και του Euler. Η μέθοδος Lagrange χρησιμοποιείται κυρίως στα προβλήματα με μηχανικά στερεά και έτσι προτιμάται για την μοντελοποίηση των κατεργασιών κοπής και στις περισσότερες διαμόρφωσης, όπου τα κομμάτια πλεγματοποιούνται ακριβώς στα όριά τους, με το μοντέλο του υλικού να είναι ελαστοπλαστικό, πλαστικό ή ρευστοπλαστικό και εξηγεί επαρκώς τα τασικά και θερμικά φαινόμενα. Η μέθοδος Euler μοντελοποιεί καλύτερα περιπτώσεις που έχουμε ροή ρευστού σε μεγάλο χώρο καθώς πλεγματοποιείται όλος ο χώρος. Φυσικά, παρόλο που με τη μέθοδο Lagrange έχουμε ακριβέστερη εικόνα της κατεργασίας, παρουσιάζεται πρόβλημα από την μεγάλη πλαστική παραμόρφωση (η οποία παραμορφώνει υπερβολικά το πλέγμα) και έτσι απαιτείται συνεχής επαναπροσδιορισμός του πλέγματος, αν αυτό είναι δυνατό. Μία άλλη λύση λοιπόν που μελετάται είναι η χρήση συνδυαστικού μοντέλου Lagrange και Euler, το μοντέλο Arbitrary Lagrangian - Eulerian (ALE), με το πλέγμα να κινείται στο χώρο, κάτι που απαιτεί μεγάλη ακρίβεια και χρόνο υπολογισμών (σχ. 5.3). Σήμερα πάντως χρησιμοποιείται κυρίως η βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου Lagrange, κατά την οποία το πλέγμα κινείται μαζί με το τεμάχιο.



Σχ. 5.3 Σύγκριση πλέγματος με τη μέθοδο Lagrange (αριστερά) και τη μέθοδο ALE (δεξιά).

Τα εμπορικά πακέτα που διατίθενται σήμερα μπορεί να απλοποιούν κατά πολύ τη μοντελοποίηση των κατεργασιών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εφόσον μπορούν να λύσουν μη-γραμμικά προβλήματα, όπως είναι τα θερμοδυναμικά, τα οποία είναι πρακτικά αδύνατο να λυθούν με θεωρητικά μοντέλα και εμπειρικούς τύπους με αποδεκτή ακρίβεια. Όμως οι παραδοχές που κάνουν καθώς και οι τρόποι επίλυσης δεν είναι εύκολο τις περισσότερες φορές να εξεταστούν, πόσο μάλλον να διαφοροποιηθούν, από τον χρήστη, κάτι που κάνει το αποτέλεσμα του προγράμματος αρκετά αμφισβητήσιμο. Οι πηγές αυτών των ενδεχομένων λαθών κατά την μοντελοποίηση μια κατεργασίας μπορεί να προκύψουν από:

- Ανεπαρκή καταχώρηση δεδομένων.
- Υπερβολικές απλοποιήσεις και παραδοχές.
- Λανθασμένες οριακές συνθήκες.
- Αριθμητικές στρογγυλοποιήσεις.
- Προβληματική προσαρμογή του πλέγματος.

Το αρχαιότερο εν ενεργεία εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, είναι το NASTRAN, ενώ η συστηματική παράθεση των σημερινών υπαρχόντων προγραμμάτων και των δυνατοτήτων τους, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα ογκώδες εγχειρίδιο. Άλλα γενικής χρήσης παρόμοια προγράμματα είναι τα εξής: ABAQUS, ALGOR, ANSYS, SOLVIA, κλπ. Εξειδικευμένα προγράμματα για συνδυασμένη κινηματική και ελαστική ανάλυση μηχανισμών είναι: ADAMS, DADS.

Για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS DYNA, το οποίο διαθέτει το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών. Η επιλογή του έγινε με γνώμονα τις τεράστιες δυνατότητες που δίνει για μοντελοποίηση οποιασδήποτε μορφοποίησης αναλόγως των συνθηκών, των γεωμετριών και των υλικών. Πρόκειται για ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί EXPLICIT κώδικα και ειδικεύεται στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα

πλαστικής παραμόρφωσης). Η Εταιρεία κατασκευής είναι η LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION. Η τρέχουσα έκδοση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε, ήταν η 971. Αξίζει να δούμε τώρα κάποια γενικά στοιχεία του κώδικα LS-Dyna.

5.2. Γενικά για τον Κώδικα LS-Dyna

Γενικά η διαδικασία κατάστρωσης και επίλυσης ενός προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια Η/Υ σε σύστημα CAE (Computer Aided Engineering), όπως είναι το LS-DYNA, στο οποίο μοντελοποιήθηκε η υπό μελέτη κατεργασία έλασης μορφής, περιέχει 3 στάδια, την προεπεξεργασία, την επίλυση και την Μετεπεξεργασία, τα οποία θα δούμε συγκεκριμένα για το LS-Dyna, αν και οι αρχές που διέπουν κάθε φάση είναι ίδιες για κάθε εμπορικό κώδικα.

Προεπεξεργασία

Η προεπεξεργασία αναλαμβάνει να ετοιμάσει τα δεδομένα για την επίλυση. Δηλαδή, θα ετοιμάσει κάποια μητρικά μεγέθη τα οποία η διαδικασία της επίλυσης θα τα χρησιμοποιήσει για να επιλύσει το πρόβλημα. Ο προεπεξεργαστής μπορεί να αντλήσει δεδομένα από ένα αρχείο δεδομένων ή μπορεί να καταστρώσει το πρόβλημα κατά την εκτέλεση, συνήθως με την βοήθεια κάποιου γραφικού περιβάλλοντος ή με την βοήθεια γραμμών εντολών. Ο προεπεξεργαστής, δηλαδή, ετοιμάζει τις δομές των δεδομένων όπως τις χρειάζεται ο επεξεργαστής για να κάνει την επίλυση.

Για να είναι πλήρες το μοντέλο θα πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

1. Ορίζεται πλήρως η γεωμετρία, δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις,
2. Δηλώνεται το υλικό, ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται το μοντέλο, καθώς και οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες,
3. Διακριτοποιείται η κατασκευή με πεπερασμένα στοιχεία και δηλώνονται οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων,
4. Ορίζονται οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός του άλλου, αλλά και κυρίως για να μελετηθούν τα φαινόμενα (τάσεις, τριβές κλπ) από τις επαφές αυτές.
5. Προσδιορίζονται οι αρχικές οριακές συνθήκες (π.χ. αρχική ταχύτητα).

Επίλυση

Η επίλυση αναφέρεται στη μεθοδολογία/διαδικασία που περιγράφει η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των προβλημάτων. Αν για παράδειγμα πρόκειται για προβλήματα γραμμικής συμπεριφοράς, τότε η επίλυση είναι η κατάστρωση των πινάκων $[K]$, $[u]$ και $[F]$ από τα δεδομένα κόμβων-στοιχείων-φορτίσεων-δεσμεύσεων, και η επίλυση του συστήματος εξισώσεων. Η διαδικασία του υπολογισμού των παραγώγων μεγεθών (π.χ. τάσεις), μπορεί να ανήκει στην διαδικασία

της επίλυσης αλλά και της μετεπεξεργασίας, για την οποία θα γίνει αναφορά στη συνέχεια. Οι ρουτίνες που περιέχονται στο στάδιο της επίλυσης κάνουν γενικά απλές πράξεις πινάκων, όπως πολλαπλασιασμούς, αντιστροφές, κλπ. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην διαδικασία της επίλυσης παρουσιάζεται στην κατάστρωση του πίνακα [K] καθώς και στην επίλυση του συστήματος εξισώσεων.

Μετεπεξεργασία

Αφού γίνει η επίλυση, ακολουθεί η μετεπεξεργασία που στην ουσία είναι η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της επίλυσης. Αρχικά γίνονται υπολογισμοί παραγώγων μεγεθών. Έπειτα το πρόγραμμα μπορεί να εξαγάγει τα αποτελέσματα είτε στην οθόνη, είτε σε αρχείο, είτε να αναλάβει την γραφική έξοδο των αποτελεσμάτων.

Ο τρόπος που γίνεται η μετατροπή σε ηλεκτρονική μορφή των δεδομένων που μας αφορούν, καθώς και η ροή του, φαίνεται παρακάτω:

Τα δεδομένα σώζονται από τον preprocessor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου *.fmb στο οποίο περιέχεται όλο το μοντέλο το οποίο θα επιλυθεί με πεπερασμένα στοιχεία από το LSDYNA, και ανά πάσα στιγμή μπορούμε να επέμβουμε και να το τροποποιήσουμε. Επίσης εκτός από το αρχείο *.fmb μπορεί να τα εξάγει και σαν αρχείο κειμένου τύπου *.dyn. Το αρχείο αυτό μπορεί να αναγνωσθεί από οποιονδήποτε editor (πχ Notepad), και ως εκ τούτου να τροποποιηθεί από τον χρήστη, και περιέχει σε μορφή ASCII όσα στοιχεία χρειάζεται ο κώδικας του LSDYNA για να προσομοιώσει την κατεργασία. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον χρήστη όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι σχετικά απλές και μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον editor, δίχως να χρειαστεί να επανέλθει στο περιβάλλον του pre-processor μέσα από το αντίστοιχο αρχείο *.fmb. Το αρχείο *.dyn είναι αυτό που στην συνέχεια επεξεργάζεται το πρόγραμμα για την επίλυση του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο SOLVER του LS-DYNA που αποτελεί και τον κυρίως κώδικα του προγράμματος. Όταν η επίλυση ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα παρουσιάζει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Τα αρχεία αυτά είναι τύπου *.d3plot και *.graph και χρησιμοποιούνται από τον post-processor και graph-processor (POST-GL εταιρείας ETA) αντίστοιχα, για να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη με μορφή γραφημάτων για τις δυνάμεις και τάσεις, αλλά και τα ίδια τα animation, για την ακριβή προσομοίωση της κατεργασίας.

5.3. Μοντέλο και Δεδομένα

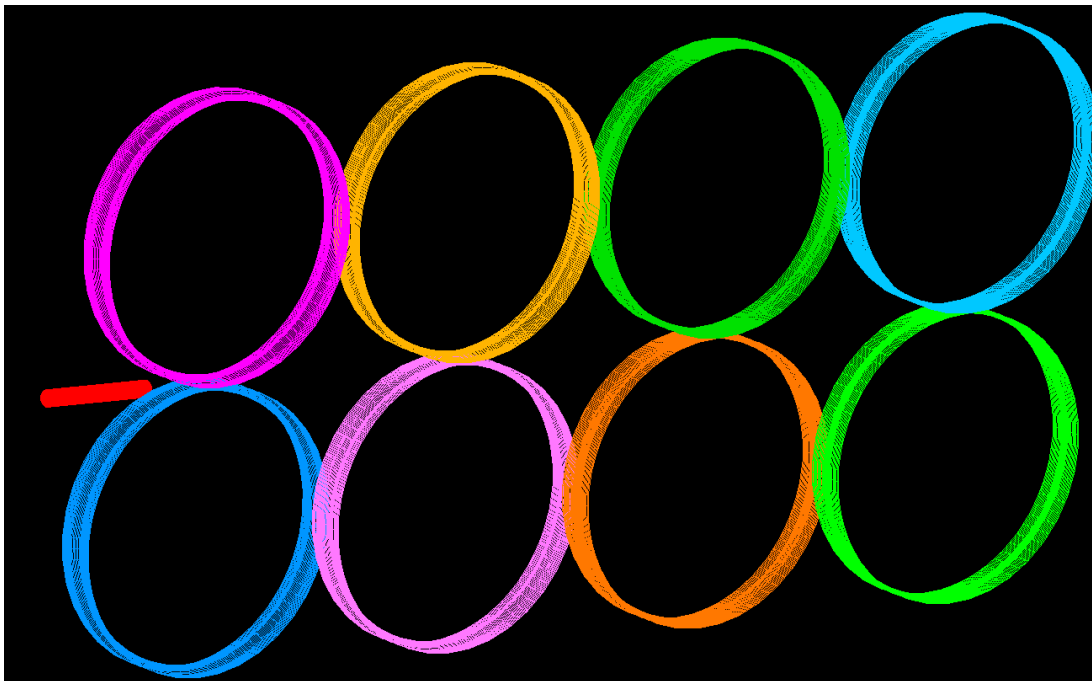
Ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας ήταν η αριθμητική προσομοίωση της έλασης μορφής, κυρίως των τάσεων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την κατεργασία και όχι τόσο της τελικής μορφής (γεωμετρίας τού δοκιμίου), η οποία στο πρόγραμμα σχετίζεται με ιδανικές συνθήκες, κάτι που δεν συμβαίνει με την πραγματικότητα. Για να φτάσουμε στην τελική μορφή του μοντέλου μας όμως, υπήρξαν ορισμένα προβλήματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω και εξηγούν εν μέρει την τελική δομή του μοντέλου μας (τα προβλήματα αυτά παρουσιάζονται συνήθως και στην βιβλιογραφία, κάνοντας επιτακτική την περαιτέρω μελέτη του τρόπου μοντελοποίησης της έλασης γενικά):

Προβλήματα

Ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την μοντελοποίηση ήταν ο τρόπος προσομοίωσης του υλικού, που είναι σκόνη. Σύμφωνα με διάφορες προσπάθειες που αναφέρονται στην βιβλιογραφία, οι πιο καλές μοντελοποιήσεις για το LS-Dyna ήταν τα υλικά 5.1 (Soil and Foam), 7.1 (Blatz-Ko), 25.1 (Geological-Cap-Model), Hysteric Soil (79.1), Brittle Damage (96.1) και Modified Drucker Prager (193.1). Όμως, αν και δοκιμάστηκαν όλα, μόνο με το 25.1 το μοντέλο μας μπορούσε να τρέξει μέχρι το τέλος χωρίς προβλήματα υπερβολικής παραμόρφωσης και κολλήματος του προγράμματος. Όπως είδαμε, κύριο μέλημά μας ήταν η μοντελοποίηση να μπορεί να προβλέψει με σχετική ακρίβεια τις τάσεις και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται και όχι τόσο την τελική μορφή και γεωμετρία του δοκιμίου. Το μοντέλο του υλικού αυτού δίνει σχετικά ακριβή αποτελέσματα ως προς την τελική παραμόρφωση, ενώ ως προς τις δυνάμεις παρουσιάζει δεδομένα τα οποία αν και δεν ταιριάζουν απόλυτα με τα πειραματικά, είναι αναμενόμενα.

Το σημαντικότερο όμως πρόβλημα είχε να κάνει με την πολυπλοκότητα τού μοντέλου, τον μεγάλο αριθμό κόμβων (>20.000) και τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, παρ' όλο που κατέληξε το τελικό μοντέλο σε αυτόν τον αριθμό μετά από πολλές απλοποιήσεις (ενδεικτικά, τα μοντέλα ακριβείας περιείχαν πάνω από 80.000 στοιχεία). Η πολύπλοκη γεωμετρία επίσης των ραούλων δεν ευνόησε ιδιαίτερα την επίλυση τού προβλήματος και το remeshing (επαναπροσδιορισμός πλέγματος) που έχει το πρόγραμμα ως επιλογή επίσης δεν βοήθησε. Άμεσο αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η παραμόρφωση να γίνεται μη ελέγξιμη, ιδιαίτερα μετά το πρώτο πάσο και το πρόγραμμα να αδυνατεί να συνεχίσει την επίλυση. Επομένως αναγκαστικά επιλέξαμε να γίνει το πέρασμα από το κάθε πάσο ξεχωριστά, παρ' όλο που έτσι χάνουμε σε ακρίβεια στις διαστάσεις του σωλήνα μετά από κάθε πάσο (ελαστική επαναφορά) και τις παραμένουσες τάσεις.

Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στην κατά μέρη ανάλυση της όλης κατεργασίας, ενώ το μοντέλο είχε αρχικά σχεδιαστεί όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχ. 5.4). Γενικά πάντως, κρίνοντας εκ του αποτελέσματος, δεν είχαμε σημαντική αλλοίωση των τελικών αποτελεσμάτων.



Σχ. 5.4: Αρχική σχεδίαση μοντέλου έλασης μορφής στο LS-Dyna.

Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρειάζονται κυρίως για την μοντελοποίηση της έλασης είναι:

✓ Η Γεωμετρία τεμαχίου και τυμπάνων καθώς και ο τρόπος διακριτοποίησης: Τα σώματα που περιλαμβάνονται στην κατεργασία σχεδιάζονται με όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση των πραγματικών διαστάσεων. Εφόσον έχουμε κυλινδρικές επιφάνειες πρέπει να πούμε ότι η σχεδίαση και κυρίως η διακριτοποίηση οφείλουν να είναι αναλυτικές, με πολλά πεπερασμένα στοιχεία, καθώς οι κυκλικές επιφάνειες προσεγγίζονται με πολυγωνικές. Στην παρούσα μοντελοποίηση, κάθε κύκλος αποτελείτο από 360 γραμμές για το τεμάχιο και 36 γραμμές για τα ράουλα (μας ενδιέφερε προφανώς η ακρίβεια στο τεμάχιο). Επίσης, η διακριτοποίηση άλλαξε αρκετές φορές μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη από πλευράς χρόνου και αποτελεσμάτων και αυτό γιατί η απλή διακριτοποίηση ενδέχεται εκτός από μη ακριβή αποτελέσματα να οδηγήσει και σε μη δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος.

✓ Τα Υλικά τεμαχίου και τυμπάνων: Τα δεδομένα για τα υλικά εισάγονται με βάση ένα αρχικό προσχέδιο υλικού (εν είδει βιβλιοθήκης, με 200 περίπου προσχέδια), το

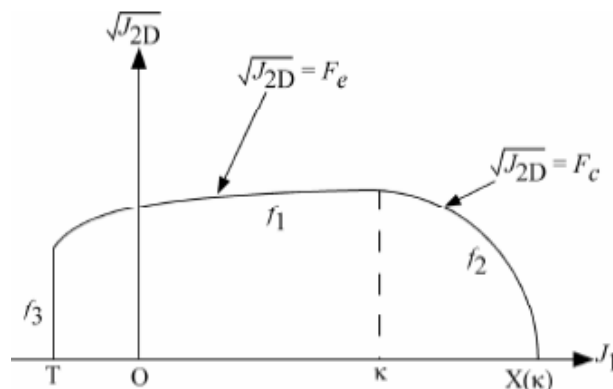
οποίο επιλέγεται με βάση το είδος του υλικού. Για τα μέταλλα της μήτρας επιλέχθηκε το 24.1 (piecewise linear plasticity) το οποίο απαιτεί τις βασικές ιδιότητες του μετάλλου όπως αυτά δόθηκαν στην ενότητα 3.3 αλλά και ορισμένες τιμές από το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων (ενότητα 4.2).

Για την σκόνη έγινε όπως προείπαμε απλή μοντελοποίηση, με δεδομένα μόνο το όριο συμπίεσότητας, την πυκνότητα, τον συντελεστή σκλήρυνσης (σχετίζεται και με το πορώδες), το μέτρο διάτμησης και το όριο διαρροής (τα δεδομένα δίνονται στην ενότητα 3.3). Γενικά στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η μοντελοποίηση κοκκωδών υλικών είναι δυσχερής, όχι μόνο στο LS-Dyna. Γι' αυτό, καλό είναι να γίνεται πρώτα μια μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της σκόνης σε συμπίεση και εφελκυσμό με πολλές δοκιμές και στη συνέχεια να επιλέγεται το προσχέδιο του υλικού που ταιριάζει καλύτερα.

Τα κριτήρια διαρροής για την μοντελοποίηση των υλικών, βάσει της προεπιλογής του υλικού, αφού καθορίζει ο κώδικας μόνος του ποιο μοντέλο ακολουθεί, δεν μπορεί να επέμβει ο χρήστης εφόσον επιλέξει το υλικό (πχ 24.1 ή 25.1), είναι τα ακόλουθα:

Για το μέταλλο: Γενικά ο κώδικας, όταν έχει συμβατικές τριαξονικές καταπονήσεις σε ισότροπα υλικά χρησιμοποιεί το κριτήριο του Tresca στην γενικά μορφή $\sigma_1 - \sigma_3 = C$, και έτσι με το μέτρο διάτμησης και το όριο διαρροής σε εφελκυσμό λύνει το πρόβλημα.

Για την σκόνη: Εφόσον χρησιμοποιήσαμε το Geological-Cap-Model, η μορφή της εξίσωσης του κριτηρίου είναι $\sigma = C^*(\varepsilon - \varepsilon^P)$ ή, εφόσον $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^P$ (η παραμόρφωση χωρίζεται σε ελαστικής και πλαστικής περιοχής), $\sigma = C^*\varepsilon^e$. Το "Cap-Model" αποτελεί ένα πολυεπίπεδο (multisurface) μοντέλο πλαστικότητας (σχ. 5.5), που χαρακτηρίζεται από μια επιφάνεια (περιοχή) διατμητικής θραύσης (f_1), μια επιφάνεια παραμορφωσιακής σκλήρυνσης (f_2) (με παράμετρο σκλήρυνσης k) και μια επιφάνεια τάσης αποκοπής (f_3). Περισσότερη ανάλυση στην βιβλιογραφία [33].



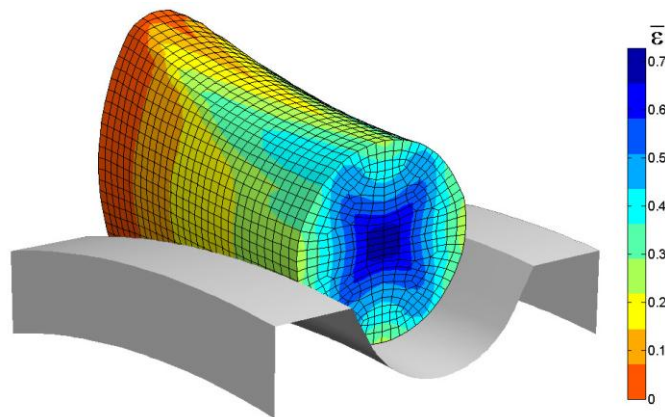
Σχ. 5.5: Επιφάνεια διαρροής για το μοντέλο προσομοίωσης της σκόνης «Cap-Model».

✓ Οι Συνθήκες Επαφής (Contacts) μεταξύ τεμαχίου και τυμπάνου, αλλά και μεταξύ των υλικών του τεμαχίου αν αποτελείται από περισσότερα, όπως στην περίπτωση μας (μήτρα-σκόνη): Ως είδος επαφής που επιλύεται σχετικά γρήγορα και με αξιόπιστα αποτελέσματα επιλέχθηκε το «nodes to surface», ενώ για τους συντελεστές τριβής

μεταξύ των διεπιφανειών έγινε επιλογή βάσει της βιβλιογραφίας (για μικρή λίπανση και ταχύτητα).

✓ Οι Αρχικές Συνθήκες, όπως η ταχύτητα περιστροφής των τυμπάνων και η θερμοκρασία. Στο LS-Dyna δεν έχει μεγάλη σημασία αν η ταχύτητα είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή. Γενικά προτιμάται μεγάλη ταχύτητα για να γίνει η κατεργασία γρήγορα, καθώς δεν υπολογίζονται αδρανειακά φαινόμενα. Η επίλυση γίνεται με βάση τον χρόνο του βήματος που κάνει τους υπολογισμούς. Αυτό που απαιτεί μεγάλη προσοχή είναι το τεμάχιο να έχει μια αρχική ταχύτητα πολύ κοντά (αν όχι ίδια) με την γραμμική ταχύτητα περιστροφής των ραούλων. Τέλος, η αρχική θερμοκρασία επιλέχθηκε να είναι στους 20°C για όλα τα σώματα της κατεργασίας, καθώς έχουμε ψυχρή έλαση.

Το τελευταίο πράμα που ορίζουμε είναι τα αποτελέσματα που θέλουμε να μας δώσει το πρόγραμμα και εμείς ενδιαφερόμαστε για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις.



Σχ. 5.6 : Τυπική παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου έλασης μορφής στο LS-Dyna.

Συνοπτικά, οι παραδοχές που έγιναν κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου ήταν:

- Δεν ελήφθησαν υπόψιν οι ατέλειες του τεμαχίου και των τυμπάνων στην γεωμετρία.
- Τα υλικά θεωρήθηκαν ιδανικά, απολύτως ισοτροπικά και χωρίς παραμένουσες τάσεις.
- Η ελαστική επαναφορά που είχε το τεμάχιο μετά από κάθε πάσο, αν και μικρή, δεν μοντελοποιήθηκε.
- Θεωρήθηκε ότι δεν υπήρχε απώλεια υλικού, είτε μετάλλου (προεξοχές) είτε σκόνης, έστω και αν ήταν μικρή στην πραγματικότητα.
- Ορισμένες μη γραμμικές παράμετροι (εσωτερικές τριβές, θερμοκοί συντελεστές, μεταλλικοί δεσμοί κ.ά.) είναι δύσκολο να προσομοιωθούν από οποιοδήποτε μοντέλο.

6. Αποτελέσματα

6.1. Πειραματικά

Αρχικά παρατίθενται οι φωτογραφίες και πίνακες που αφορούν την τελική γεωμετρία τού δοκιμίου και την συμπίεση της σκόνης. Όπως είπαμε, ορισμένα δοκίμια, ιδίως αυτά με αλουμίνιο, δεν έβγαιναν σε συμπαγή μορφή (έσπαγαν ανοίγοντας στη μέση συνήθως) και επομένως δεν συνεχιζόταν η κατεργασία, ούτε μπορούσαμε να πάρουμε όλες τις μετρήσεις που θέλαμε. Οι φωτογραφίες που ακολουθούν είναι ενδεικτικές κυρίως της τελικής μορφής που είχαν τα δοκίμιά μας μετά την κατεργασία.

1^ο δοκίμιο, Cu-MgB₂

Η κατεργασία για το πρώτο δοκίμιο δεν εξελίχθηκε ομαλά, καθώς η σκόνη φαίνεται να είναι πολύ δύσκολη στην κατεργασία, με το έλαστρο να δοκιμάζεται περισσότερο από κάθε άλλο υλικό, τα ράουλα να χάνουν έστω και για λίγο την θέση τους (με άμεση συνέπεια την γεωμετρία του τελικού δοκιμίου) και τα μετρητικά (δυναμόμετρο και ροπόμετρο) να φθάνουν στις μέγιστες τιμές τους. Τελικά μετά το 3^ο πάσο, η μήτρα άνοιξε και παρ' όλο που η σκόνη είχε συμπιεστεί καλά και είχαμε ελάχιστη διαρροή, κρίθηκε σκόπιμο να μην περάσει και από 4^ο πάσο.



Σχ. 6.1: Το 1ο δοκίμιο μετά το 3ο πάσο.

2^ο δοκίμιο, Al-MgB₂

Το δεύτερο δοκίμιο δεν είχε καλύτερη τύχη, καθώς το αλουμίνιο δεν άντεξε από το πρώτο πάσο και άνοιξε (κροκοδειλίαση). Η σκόνη βέβαια συμπίεστηκε έστω και μετά από ένα πάσο και έτσι δεν χάθηκε πολλή.



Σχ. 6.2: Το 2ο δοκίμιο μετά το 1ο πάσο (κροκοδειλίαση).

3^ο δοκίμιο, Cu-MgO

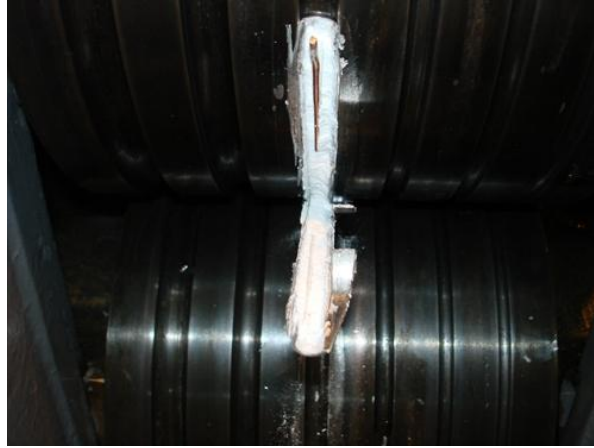
Σε αντίθεση με τα πρώτα 2 δοκίμια, εδώ όλα εξελίχθηκαν ομαλά, με άκρως αποδεκτή δομή (μετά την αφαίρεση των προεξοχών βεβαίως) τού δοκιμίου μας μετά από 4 πάσα. Το χάλκινο σύρμα στο εσωτερικό είναι σχεδόν άθικτο και στο κέντρο ακόμα του σωλήνα.



Σχ. 6.3: Το 3ο δοκίμιο μετά το 4ο πάσο.

4^ο δοκίμιο, Al-MgO

Η μήτρα αλουμινίου είχε αρκετά προβλήματα όπως έχουμε ήδη πει και έτσι μετά το 2^ο πάσο το δοκίμιο άνοιξε πάλι στην μέση και κόλλησε μάλιστα και στα τύμπανα. Το πρόβλημα ήταν εμφανώς η μήτρα και όχι η σκόνη.



Σχ. 6.4: Το 4ο δοκίμιο μετά το 2ο πάσο.

5^ο δοκίμιο, Cu-TiC&Al

Η προσθήκη σκόνης αλουμινίου εμφανώς διευκόλυνε την κατεργασία, με πολύ καλά αποτελέσματα τελικής δομής.



Σχ. 6.5: Το 5ο δοκίμιο μετά το 4ο πάσο.

6^ο δοκίμιο, Al-TiC&Al

Χωρίς να περιμένουμε κάτι διαφορετικό μετά την αποτυχία μορφοποίησης των σωλήνων με μήτρα αλουμινίου, το 6^ο δοκίμιο δεν άντεξε τις αναπτυσσόμενες τάσεις και άνοιξε. Η σκόνη TiC&Al βλέπουμε ότι δεν έχει γίνει ομοιογενής σε καμία περίπτωση μετά από 1 πάσο.



Σχ. 6.6: Το 6ο δοκίμιο μετά το 1ο πάσο.

7^ο δοκίμιο, Al(2.5mm)-TiC&Al

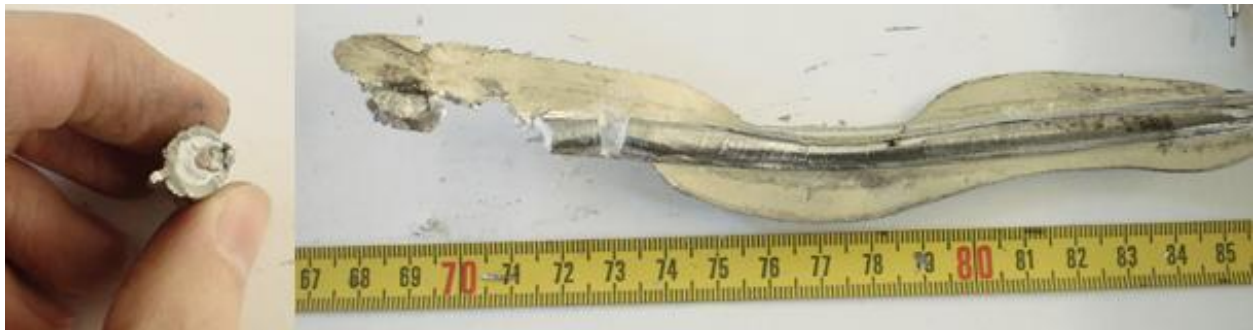
Παρόλο που αυξήσαμε κατά 1mm το πάχος του τοιχώματος της μήτρας, το αλουμίνιο για άλλη μια φορά δεν άντεξε. Απλώς κατάφερε να περάσει από το 1^ο πάσο, στο 2^ο απλώς πέρασε οριακά πριν ανοίξει και στο 3^ο πάσο φυσιολογικά έσπασε.



Σχ. 6.7: Το 7ο δοκίμιο μετά το 3ο πάσο.

8^ο δοκίμιο, Al(c)-TiC&Al

Η χρήση πιο μαλακού αλουμινίου έφερε μια βελτίωση στην διαδικασία, όμως και πάλι μετά το 2^ο πάσο η δομή του είχε αλλοιωθεί αισθητά, ενώ στο 3^ο πάσο το δοκίμιο κυριολεκτικά διαλύθηκε.



Σχ. 6.8: Το 8ο δοκίμιο μετά το 2ο (αριστερά) και το 3ο (δεξιά) πάσο.

9^ο δοκίμιο, Cu-Mg

Τα πράγματα με σκόνη από μαλακό μέταλλο (Mg) εξελίχθηκαν ομαλά, με μόνο σημείο αναφοράς, την μικρή πρόσφυση που παρουσίαζε η διμεταλλική επιφάνεια μετά το 4^ο πάσο. Το Μαγνήσιο πήρε σχεδόν απολύτως συμπαγή μορφή.

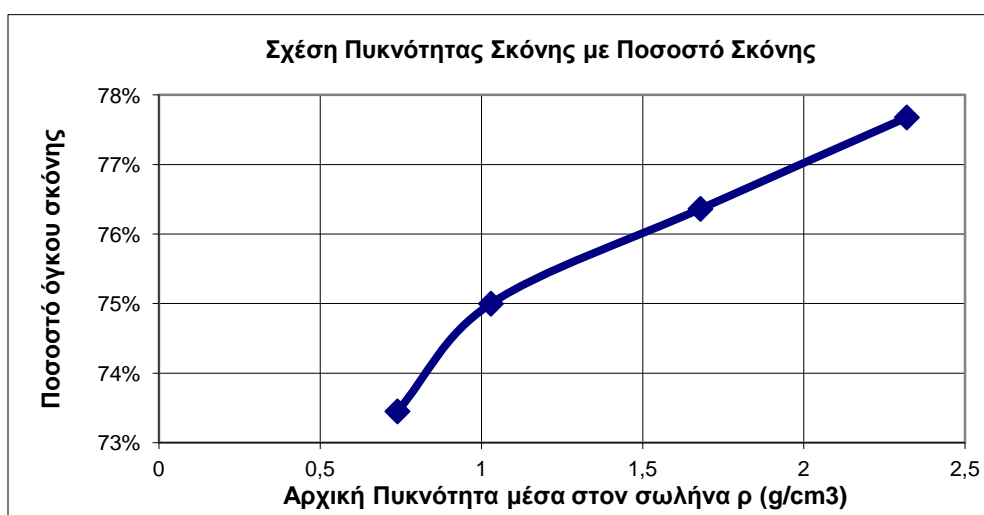


Σχ. 6.9: Το 9ο δοκίμιο μετά το 3ο (αριστερά) και το 4ο (δεξιά) πάσο.

Ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα που αφορούν την τελική γεωμετρία των δοκιμίων μας.

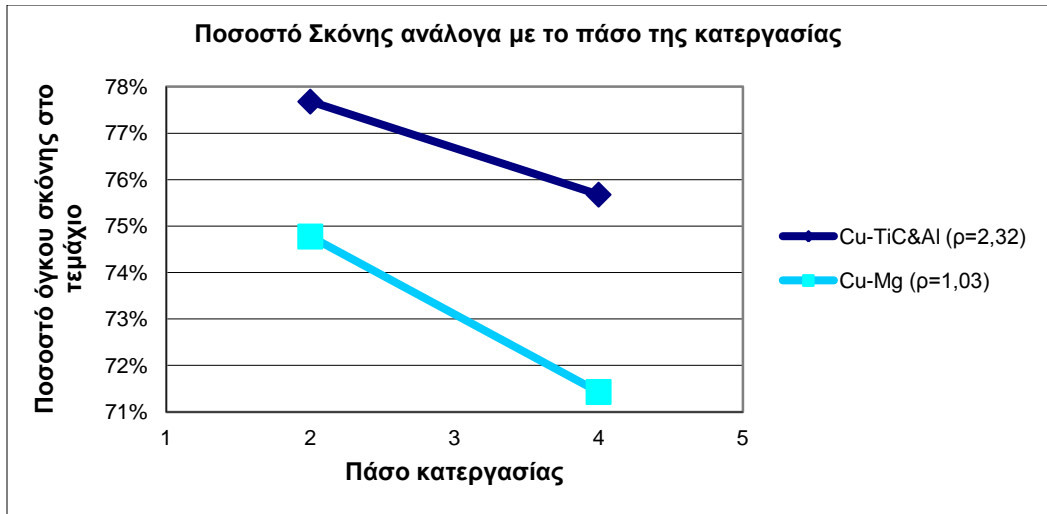
Οι μετρήσεις για τον πρώτο πίνακα αφορούν το 2ο πάσο της κατεργασίας.

| | Πάχος τοιχώματος (mm) | Διάμετρος Περιοχής Σκόνης (mm) | Ποσοστό όγκου σκόνης στην διάμετρο % | Αρχική πυκνότητα σωλήνα (g/cm ³) |
|---------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| CuMgO | 1,5 | 8,3 | 73,45% | 0,74 |
| CuMg | 1,4 | 8,3 | 74,77% | 1,03 |
| CuMgB2 | 1,3 | 8,4 | 76,36% | 1,68 |
| CuTiCAI | 1,25 | 8,7 | 77,68% | 2,32 |
| AlMgO | 1,4 | 8,3 | 74,77% | 0,74 |



Βλέπουμε ότι το ποσοστό του όγκου της σκόνης (βάσει της επιφάνειας που βλέπουμε) αυξάνεται όσο πιο συμπιεσμένο είναι το δοκίμιό μας πριν την κατεργασία, γεγονός αναμενόμενο.

| | Πάχος τοιχώματος (mm) | Διάμετρος Περιοχής Σκόνης (mm) | Ποσοστό σκόνης στην διάμετρο % | Αρχική πυκνότητα σωλήνα (g/cm ³) |
|-----------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| 2oCuTiCAI | 1,25 | 8,7 | 77,68% | 2,32 |
| 4oCuTiCAI | 0,9 | 5,6 | 75,68% | 2,32 |
| 2oCuMg | 1,4 | 8,3 | 74,77% | 1,03 |
| 4oCuMg | 1,1 | 5,5 | 71,43% | 1,03 |

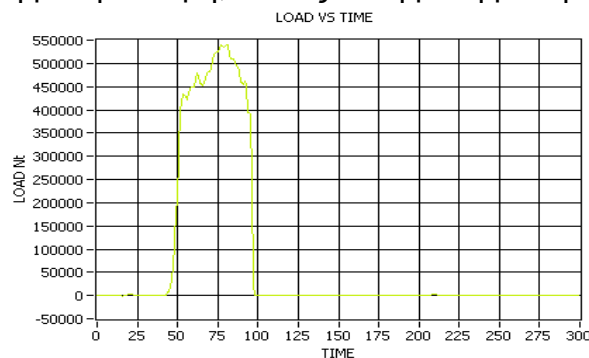


Παρατηρούμε ότι το ποσοστό κατεργασίας (αριθμός πάσων) επηρεάζει περισσότερο το δοκίμιο στο οποίο η σκόνη παρουσιάζει μικρότερη πυκνότητα. Τέλος παρατηρούμε ότι παρ' όλο που αφαιρέθηκαν μετά από κάθε πάσο οι μεταλλικές προεξοχές, η σκόνη που χάθηκε ήταν περισσότερη και έτσι είχαμε μείωση του ποσοστού σκόνης στην επιφάνεια που μετρήσαμε για κάθε τεμάχιο μετά από 2 πάσα ακόμη.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα από όλα τα δοκίμια και την επεξεργασία τους για να βρεθούν και άλλα μεγέθη που μας αφορούν, όπως η μέση πραγματική τάση, η παραμόρφωση ϵ και η μέση ισχύς.

Η τάση υπολογίστηκε με βάση την προβολή της επιφάνειας στο κάθετο επίπεδο όπου ασκείται η δύναμη διαμόρφωσης, η οποία επιφάνεια είναι $A=Lc \cdot dn$. Η πραγματική τάση προσεγγίστηκε αφαιρώντας την επιφάνεια κάθε φορά των προεξοχών που σχηματίζονταν μετά από κάθε πάσο. Έτσι, μετά το 1^ο πάσο η τάση που υπολογίστηκε διαιρέθηκε με τον συντελεστή 1,3, ενώ για τα επόμενα πάσα με συντελεστή 2, αφού η επιφάνεια των προεξοχών ήταν περίπου όση και της επιφάνειας A.

Τα δεδομένα που παίρναμε είχαν διαγραμματική μορφή (σχ. 6.10) και βρισκόταν κάθε φορά η μέγιστη και η μέση δύναμη, καθώς και η μέση ροπή.



Σχ. 6.10: Τυπική μορφή λήψης δεδομένων για την δύναμη και την ροπή κατά το πείραμα.

Κάθε δοκίμιο παρατίθεται λόγω χώρου σε 2 πίνακες, ενώ τα κενά κελιά σημαίνει ότι το δοκίμιο έχει σπάσει.

| [δοκ. 1] Cu-MgB ₂ | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| Αρχικό | | 14,00 | 102,00 | 71,00 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13,00 | 13,10 | 112,00 | 69,10 | 230,00 | 216,00 | 271,40 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,50 | 11,00 | 132,00 | 63,40 | 1200,00 | 1200,00 | 1800,00 |
| 3 ^ο Πάσο | 8,50 | 8,90 | 161,00 | 51,60 | 1200,00 | 1200,00 | 1800,00 |
| 4 ^ο Πάσο | 6,50 | | | | | | |

| [δοκ. 1] Cu-MgB ₂ | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|---------------------------------|----------------------------|--|-------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------|
| Αρχικό | | | | 0,00 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 1559,60 | 1199,69 | 0,07 | 1,16 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,27 | 181,36 | 6616,51 | 3308,25 | 0,25 | 10,47 |
| 3 ^ο Πάσο | 17,01 | 144,59 | 8299,12 | 4149,56 | 0,39 | 10,31 |
| 4 ^ο Πάσο | | | | | | |

| [δοκ.2] Al-MgB ₂ | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|--------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 33,3 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,3 | 104 | 32,6 | 236 | 220 | 280 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | | | | | | |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | | | | | | |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | | | | | | |

| [δοκ.2] Al-MgB ₂ | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|--------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0,00 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 1588,48 | 1221,91 | 0,07 | 1,18 |
| 2 ^ο Πάσο | | | | | | |
| 3 ^ο Πάσο | | | | | | |
| 4 ^ο Πάσο | | | | | | |

| [δοκ.3] Cu-MgO | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 64,5 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,1 | 108 | 62,7 | 163 | 125 | 190 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | 11,3 | 115 | 56,2 | 605 | 530 | 730 |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | 9,1 | 110 | 43,4 | 588 | 505 | 695 |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | 7,1 | 138 | 35,1 | 700 | 595 | 819 |

| [δοκ.3] Cu-MgO | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|---------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 903 | 694 | 0,07 | 0,67 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,27 | 181,36 | 2922 | 1461 | 0,25 | 4,62 |
| 3 ^ο Πάσο | 18,00 | 153,02 | 3300 | 1650 | 0,39 | 4,59 |
| 4 ^ο Πάσο | 17,42 | 113,25 | 5254 | 2627 | 0,54 | 5,24 |

| [δοκ.4] Cu-MgO | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 26,4 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,2 | 106 | 25,8 | 175 | 137 | 194 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | 11,1 | 122 | 24,1 | 600 | 475 | 768 |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | | | | | | |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | | | | | | |

| [δοκ.4] Cu-MgO | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|---------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 989 | 761 | 0,07 | 0,74 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,60 | 184,82 | 2570 | 1285 | 0,25 | 4,22 |
| 3 ^ο Πάσο | | | | | | |
| 4 ^ο Πάσο | | | | | | |

| [δοκ.5] Cu-TiC&Al | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 77,5 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,1 | 107 | 74,1 | 162 | 124 | 190 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | 11,2 | 119 | 68,9 | 592 | 538 | 741 |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | 9 | 135 | 49,2 | 690 | 635 | 874 |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | 7,4 | 181 | 40,9 | 505 | 485 | 668 |

| [δοκ.5] Cu-TiC&Al | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|----------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 895 | 689 | 0,07 | 0,67 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,27 | 181,36 | 2966 | 1483 | 0,25 | 4,69 |
| 3 ^ο Πάσο | 17,68 | 150,27 | 4226 | 2113 | 0,39 | 5,67 |
| 4 ^ο Πάσο | 17,08 | 111,05 | 4367 | 2184 | 0,54 | 4,19 |

| [δοκ.6] Al-TiC&Al | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 40,1 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,2 | 105 | 36 | 250 | 188 | 262 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | | | | | | |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | | | | | | |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | | | | | | |

| [δοκ.6] Al-TiC&Al | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|----------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 1357 | 1044 | 0,07 | 1,01 |
| 2 ^ο Πάσο | | | | | | |
| 3 ^ο Πάσο | | | | | | |
| 4 ^ο Πάσο | | | | | | |

| [δοκ.7] Al(2,5mm)- TiC&Al | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 16 | 102 | 56,1 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 15,5 | 15,7 | 105 | 54,8 | 195 | 186 | 230 |
| 2 ^ο Πάσο | 13 | 13,7 | 119 | 50,8 | 910 | 860 | 1342 |
| 3 ^ο Πάσο | 10,5 | 11,1 | 125 | 42 | 1020 | 980 | 1529 |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | | | | | | |

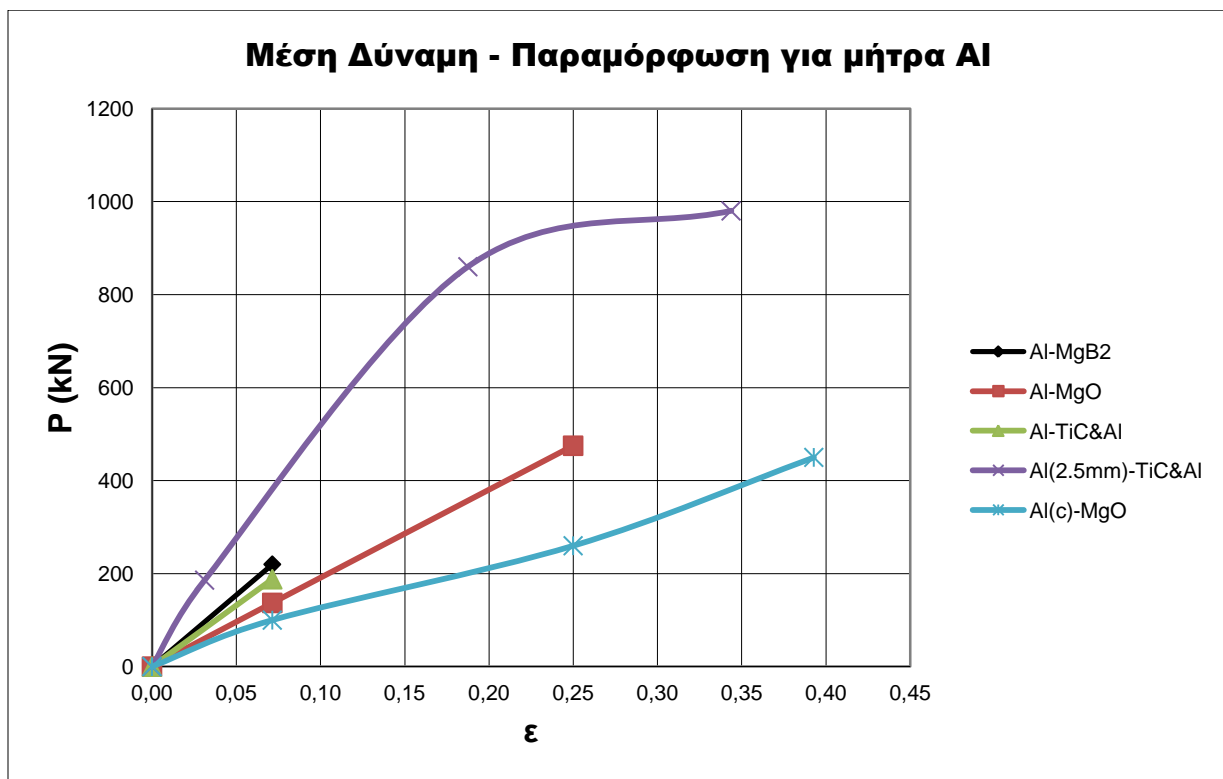
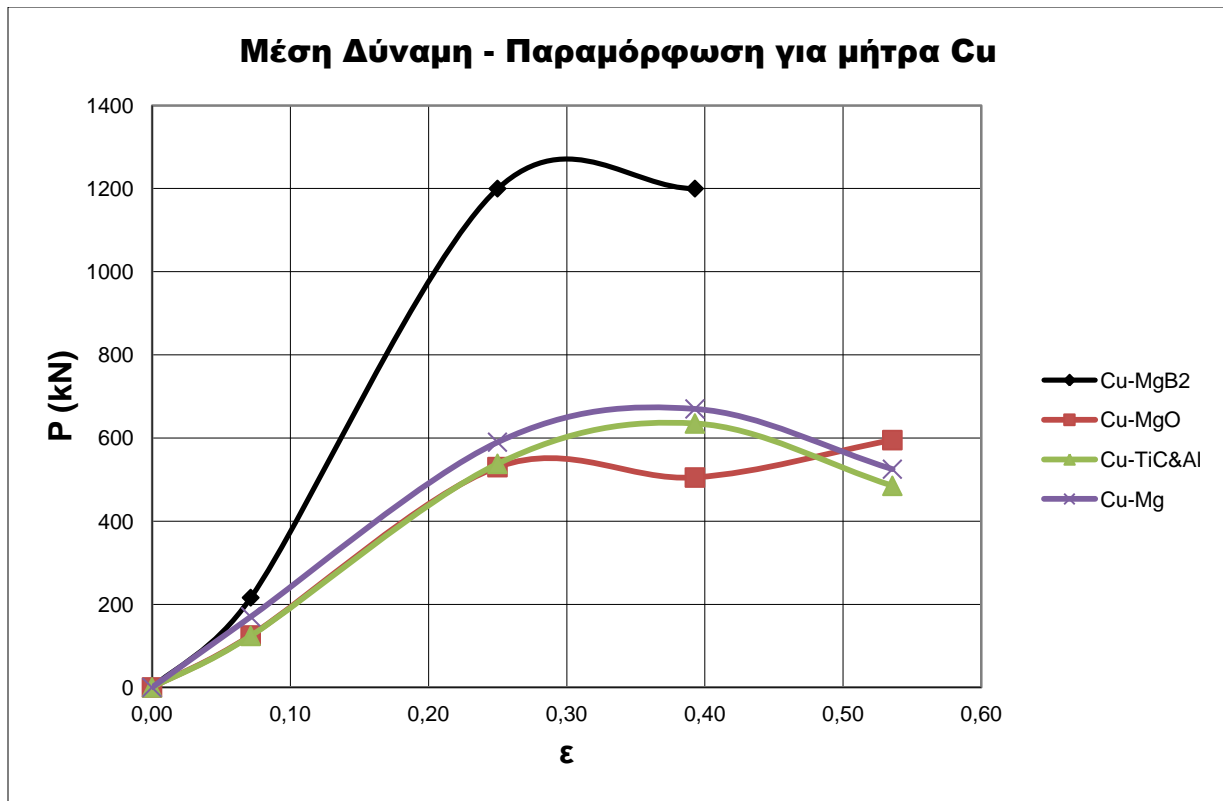
| [δοκ.7] Al(2,5mm)- TiC&Al | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|---------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 7,49 | 116,12 | 1602 | 1232 | 0,03 | 0,70 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,51 | 227,57 | 3779 | 1889 | 0,19 | 7,61 |
| 3 ^ο Πάσο | 19,16 | 201,21 | 4871 | 2435 | 0,34 | 9,49 |
| 4 ^ο Πάσο | | | | | | |

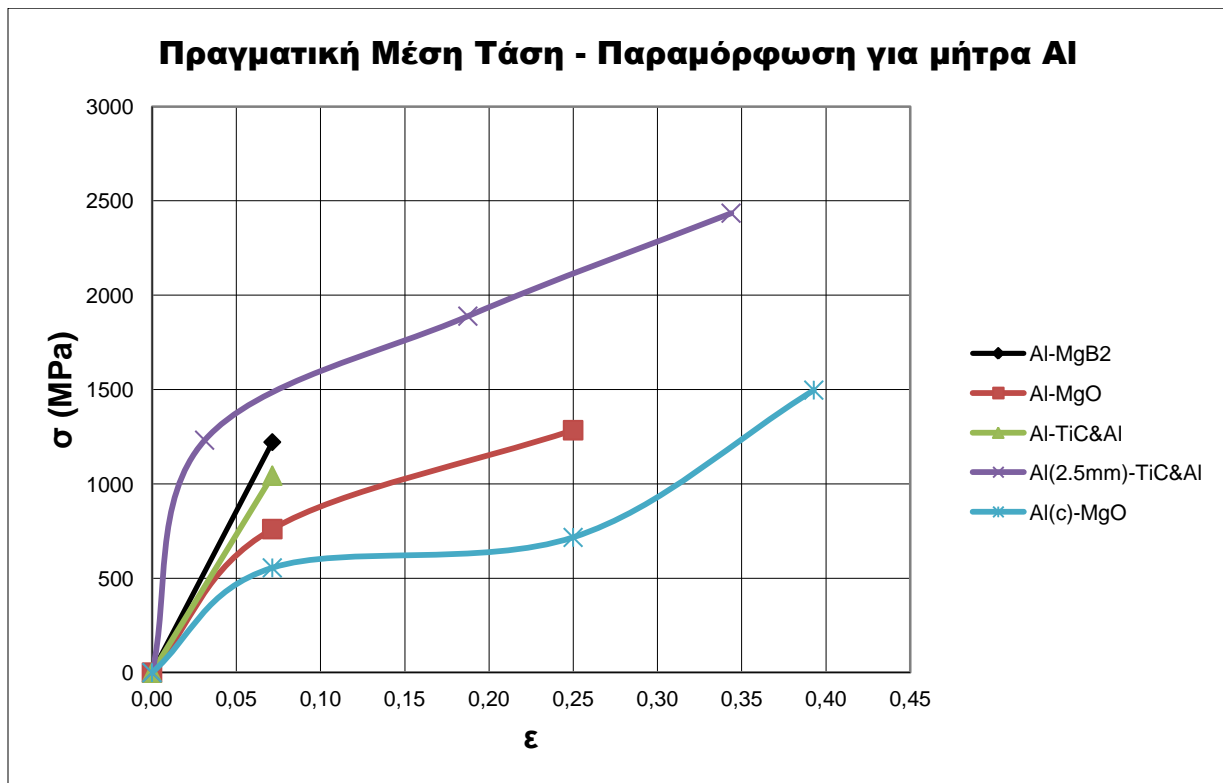
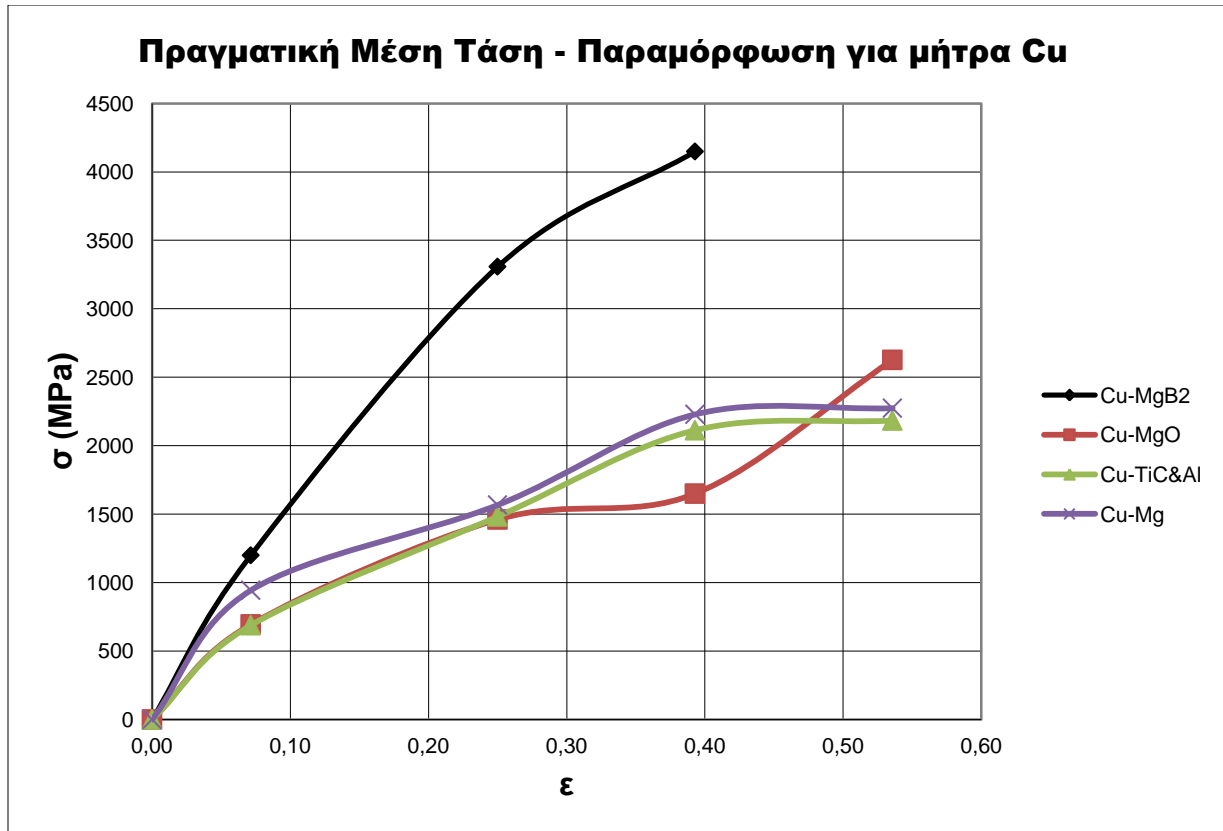
| [δοκ.8] Al(c)-MgO | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 24,3 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,1 | 105 | 23,9 | 140 | 100 | 120 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | 11,2 | 117 | 22,4 | 340 | 260 | 390 |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | 9 | 140 | 16,7 | 535 | 450 | 702 |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | | | | | | |

| [δοκ.8] Al(c)-MgO | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|----------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 722 | 555 | 0,07 | 0,54 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,27 | 181,36 | 1434 | 717 | 0,25 | 2,27 |
| 3 ^ο Πάσο | 17,68 | 150,27 | 2995 | 1497 | 0,39 | 4,02 |
| 4 ^ο Πάσο | | | | | | |

| [δοκ.9] Cu-Mg | Διάμετρος Πάσου d (mm) | Διάμετρος Τεμαχίου D (mm) | Μήκος Τεμαχίου L (mm) | Βάρος Τεμαχίου W (g) | Μέγιστη Δύναμη P (kN) | Μέση Δύναμη P (kN) | Μέση Ροπή T (kpm) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Αρχικό | | 14 | 102 | 69,7 | | | |
| 1 ^ο Πάσο | 13 | 13,3 | 107 | 69,6 | 220 | 170 | 240 |
| 2 ^ο Πάσο | 10,5 | 11,2 | 122 | 62,9 | 650 | 590 | 812 |
| 3 ^ο Πάσο | 8,5 | 9,2 | 137 | 48,2 | 740 | 670 | 923 |
| 4 ^ο Πάσο | 6,5 | 7,7 | 185 | 35,5 | 545 | 525 | 723 |

| [δοκ.9] Cu-Mg | Μήκος Τόξου Επαφής Lc (mm) | Επιφάνεια A [Lc*dn] (mm ²) | Μέση Τάση σ (MPa) | Πραγματική Μέση Τάση (MPa) | Παραμόρφωση ε ((Do-dn-1)/Do) | Μέση Ισχύς W (hp) |
|---------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Αρχικό | | | | 0 | 0,00 | |
| 1 ^ο Πάσο | 10,65 | 138,50 | 1227 | 944 | 0,07 | 0,91 |
| 2 ^ο Πάσο | 17,92 | 188,21 | 3135 | 1567 | 0,25 | 5,34 |
| 3 ^ο Πάσο | 17,68 | 150,27 | 4459 | 2229 | 0,39 | 5,98 |
| 4 ^ο Πάσο | 17,75 | 115,40 | 4549 | 2275 | 0,54 | 4,71 |





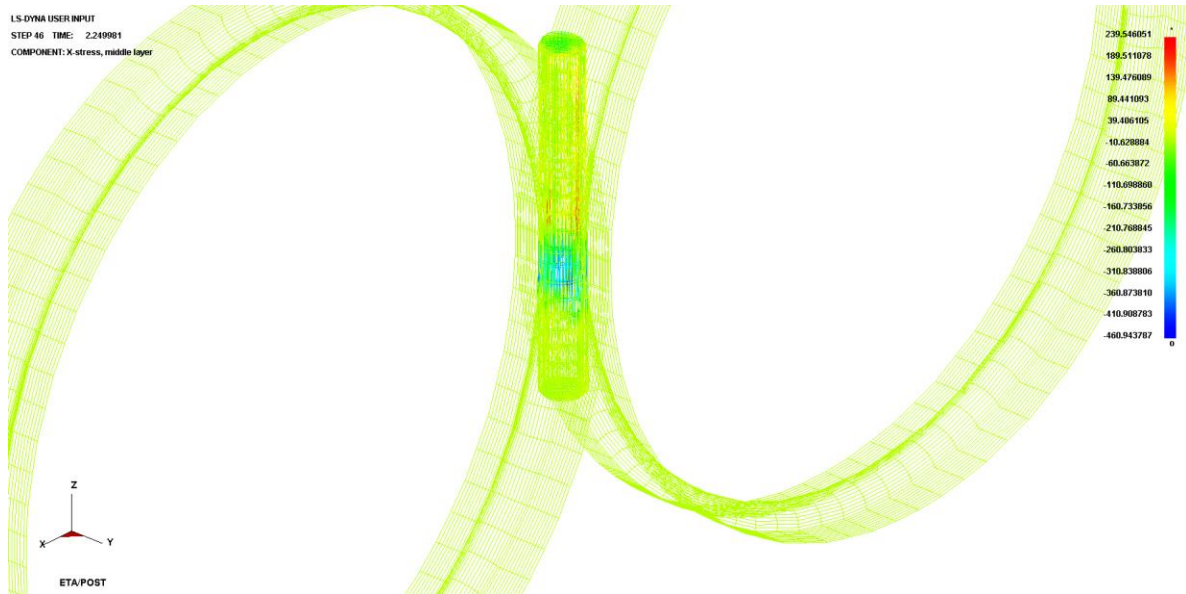
Από τους παραπάνω πίνακες και διαγράμματα βλέπουμε ότι:

- Στο πρώτο δοκίμιο (Cu-MgB₂) το δυναμόμετρο δεν μπορούσε να δώσει παραπάνω δύναμη από 1200kN, οπότε οι τιμές και για την τάση στο 1^ο δοκίμιο δεν είναι οι πραγματικές. Ομοίως το ροτόμετρο δεν μπορούσε να δώσει τιμές πάνω από 1800krpm.
- Αναμέναμε η δύναμη όσο προχωρά η κατεργασία να αυξάνεται λόγω δυσκολότερης συμπίεσης και εργοσκληρυνσης και να μειώνεται λόγω μείωσης επιφάνειας επαφής (μικρότερη διάμετρος και σχεδόν ίδιο μήκος τόξου επαφής μετά το 2ο πάσο). Η δύναμη τελικά αυξάνεται μέχρι το 3ο πάσο και στο 4ο ή μειώνεται λίγο, ή μένει σχεδόν σταθερή, λόγω προφανώς της μικρής επιφάνειας που αυτή ασκείται.
- Η Τάση αναπτύσσεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης και συμπίεσης. Αναμένουμε γενικά να αυξάνεται λόγω εργοσκληρυνσης και δυσκολότερης συμπίεσης (μεγαλύτερη πυκνότητα και μικρότερη επιφάνεια διαφυγής της σκόνης) με την πρόοδο της κατεργασίας.
- Η ισχύς της κατεργασίας δεν ξεπερνά τους 10 ίππους, πράμα που μας κάνει να κατανοήσουμε πως τα προβλήματα που ανέκυψαν κατά την κατεργασία δεν οφείλονταν στην μικρή ιπποδύναμη του κινητήρα αλλά στην διάταξη των ραούλων και τα υλικά. Τα διαγράμματα της ισχύος είναι ίδιας μορφής με της δύναμης, γι' αυτό και δεν υπάρχει λόγος να παρατεθούν.
- Η σύγκριση βάσει μόνο των υλικών της σκόνης δεν δίνει σαφή συμπεράσματα, αν και οι σκληρότερες και πυκνότερες σκόνες δίνουν συνήθως μεγαλύτερες τιμές δυνάμεων, τάσεων και παραμορφώσεων. Μόνο αξιοσημείωτο εύρημα είναι η μεγαλύτερη δύναμη που απαιτείται για την μορφοποίηση της σκόνης τού Mg, όπου παρ' όλο που είναι μικρότερης πυκνότητας από τις υπόλοιπες, απαιτεί σχεδόν την ίδια δύναμη διαμόρφωσης.
- Όταν συγκρίνουμε ως προς την μεταλλική μήτρα, ο χαλκός, εκτός από καλύτερα αποτελέσματα, παρουσιάζει και μεγαλύτερες τιμές, πράμα που σημαίνει ότι έχουμε καλύτερη συμπίεση της σκόνης. Μόνη εξαίρεση το αλουμίνιο με το παχύτερο τοίχωμα, όπου για τα ίδια πάσα έχουμε μεγαλύτερες δυνάμεις, τάσεις και ισχύ.

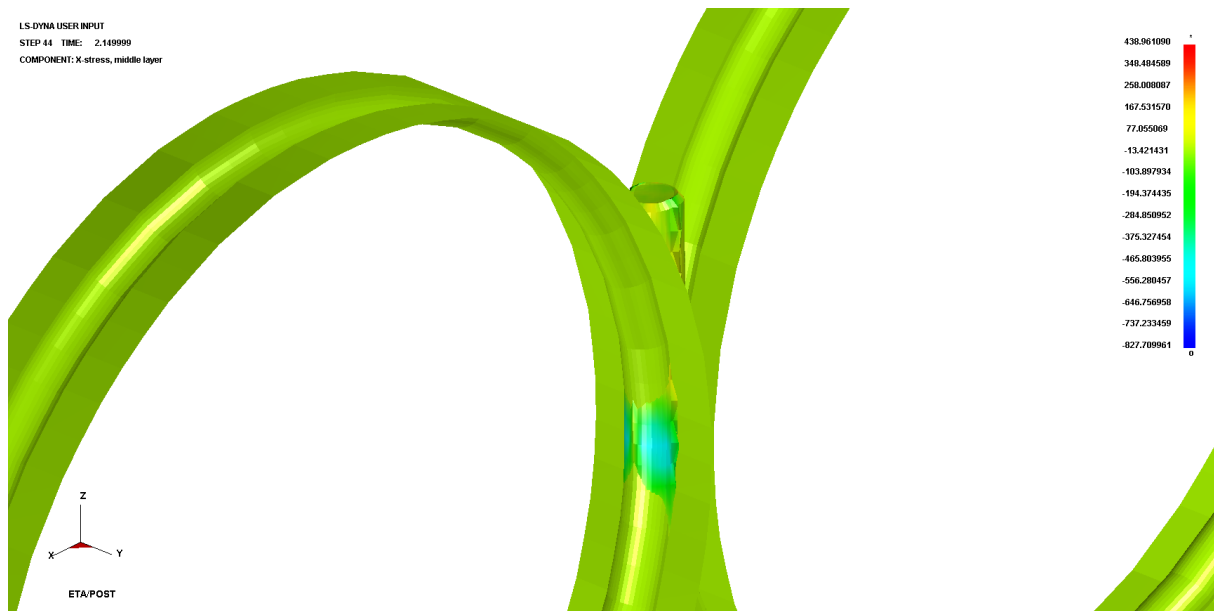
6.2. Υπολογιστικά και σύγκριση με Πειραματικά

Για κάθε πάσο, προσομοιώθηκαν στο LS-Dyna τα 6 πρώτα δοκίμια (του αρχικού πειραματικού σχεδιασμού) και βγήκαν, όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα που αφορούν κυρίως την τάση που αναπτύσσεται κατά τον άξονα x (θλιπτική, γι' αυτό και είναι μπλε και αρνητική).

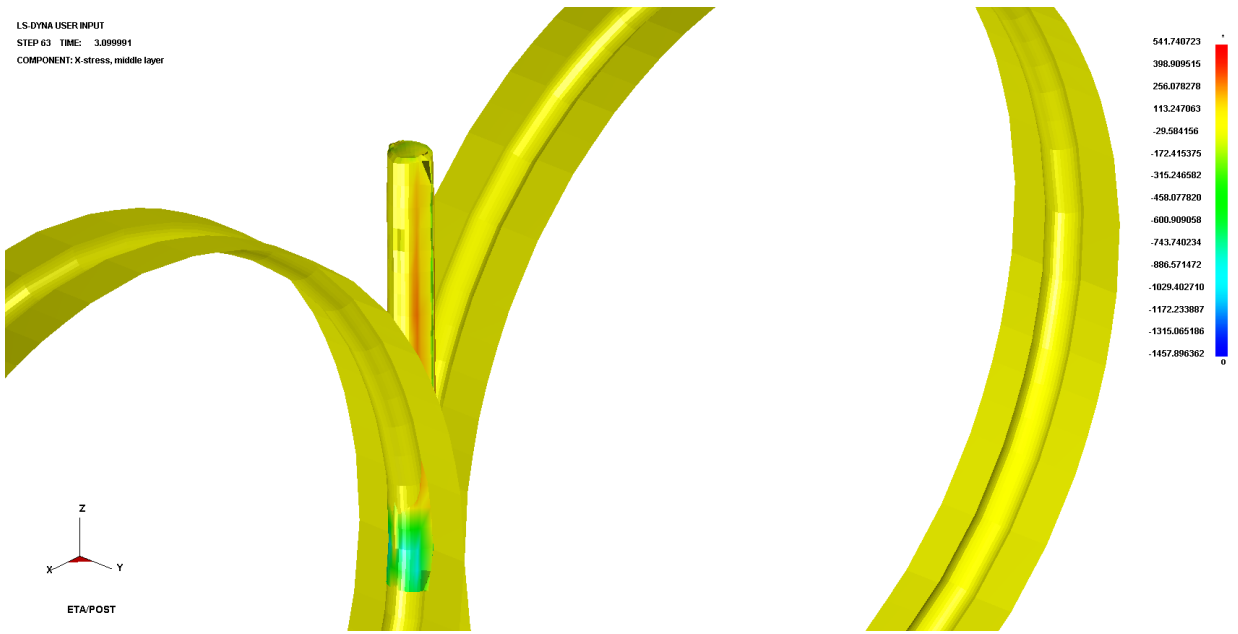
Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά εικόνες από την προσομοίωση της έλασης μορφής στον Post-Processor του LS-Dyna:



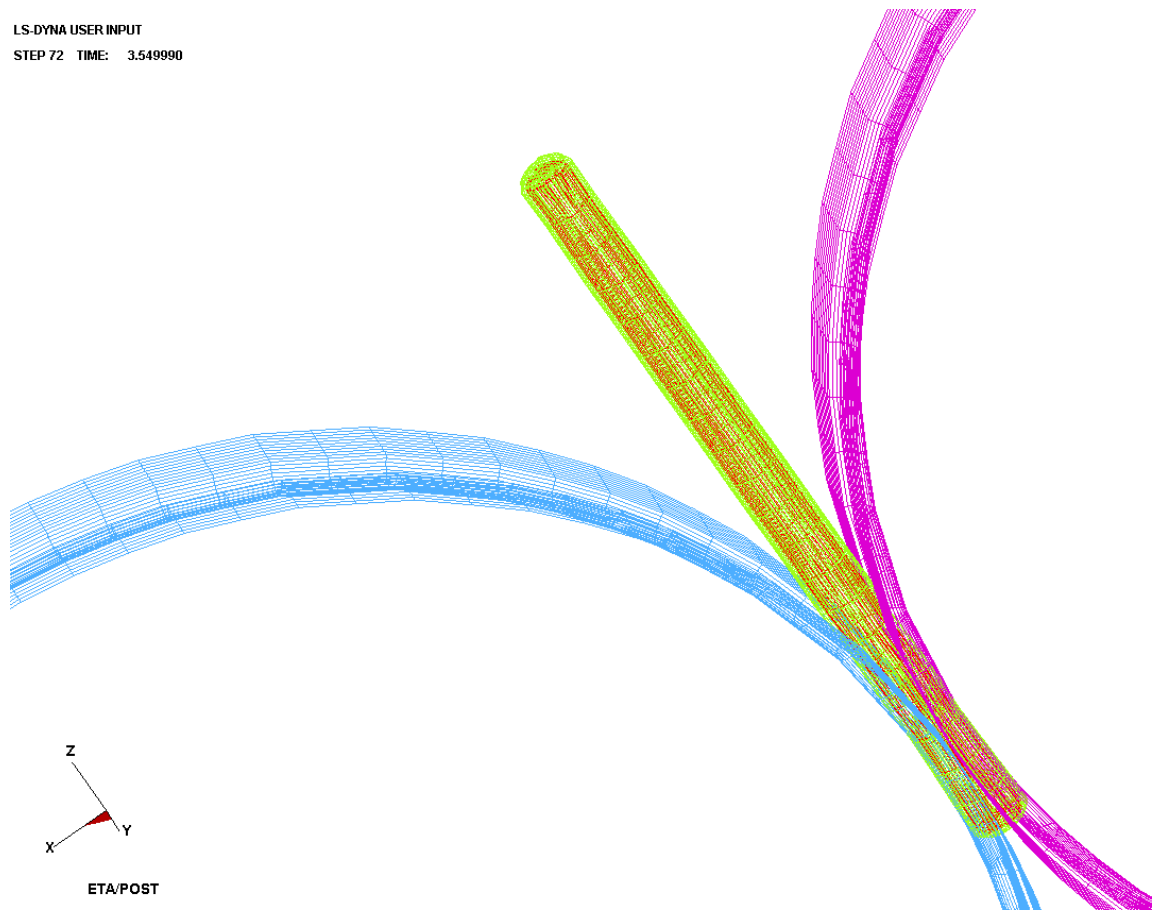
Σχ. 6.11: Γραφική απεικόνιση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο δοκίμιο Cu-MgO για το 1ο πάσο.



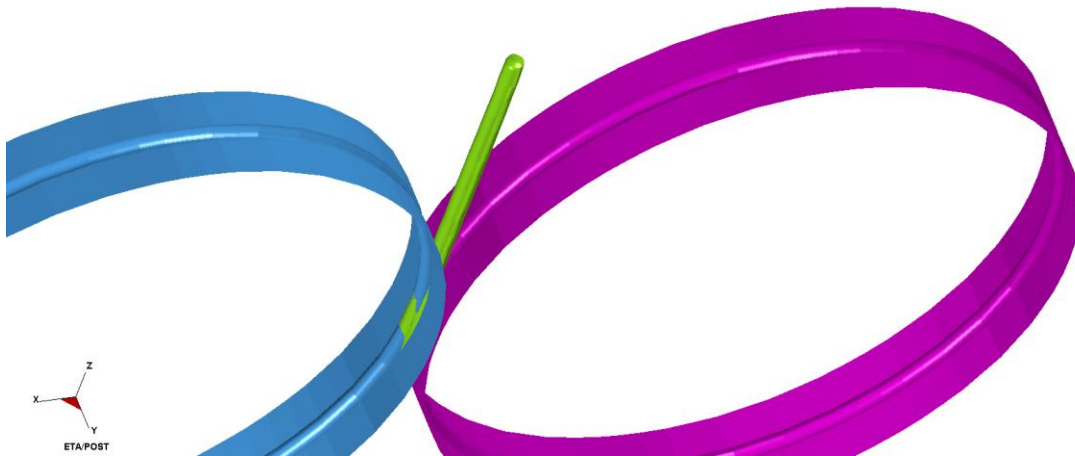
Σχ. 6.12: Γραφική απεικόνιση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο δοκίμιο Al-TiC&Al για το 1ο πάσο.



Σχ. 6.13: Γραφική απεικόνιση των αναπτυσσόμενων τάσεων στο δοκίμιο Cu-MgB₂ για το 2ο πάσο.

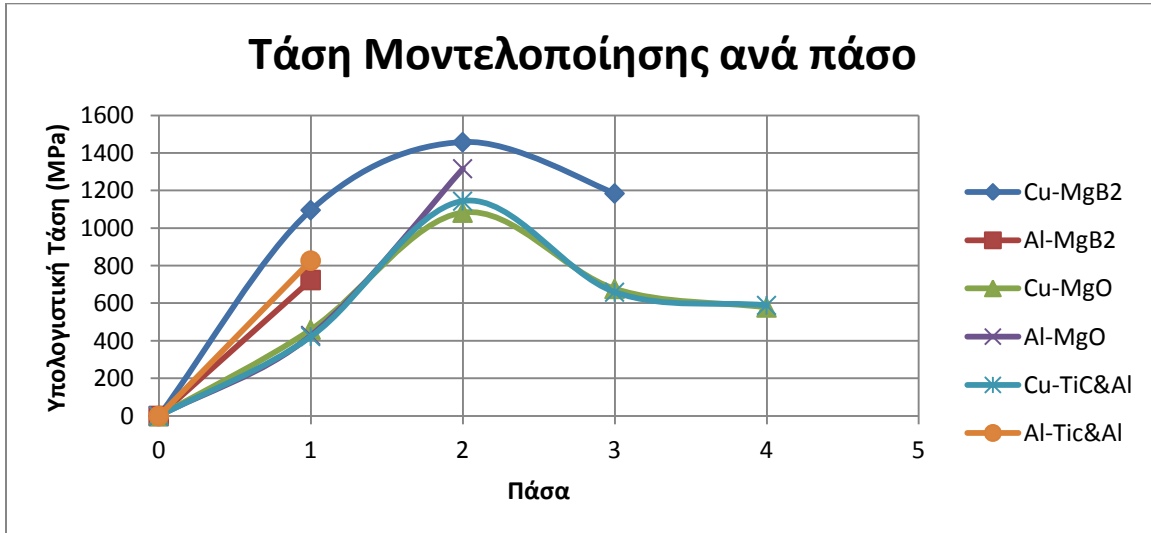


Σχ. 6.14: Γραφική απεικόνιση της κατεργασίας στο δοκίμιο Cu-TiC&Al για το 3ο πάσο.



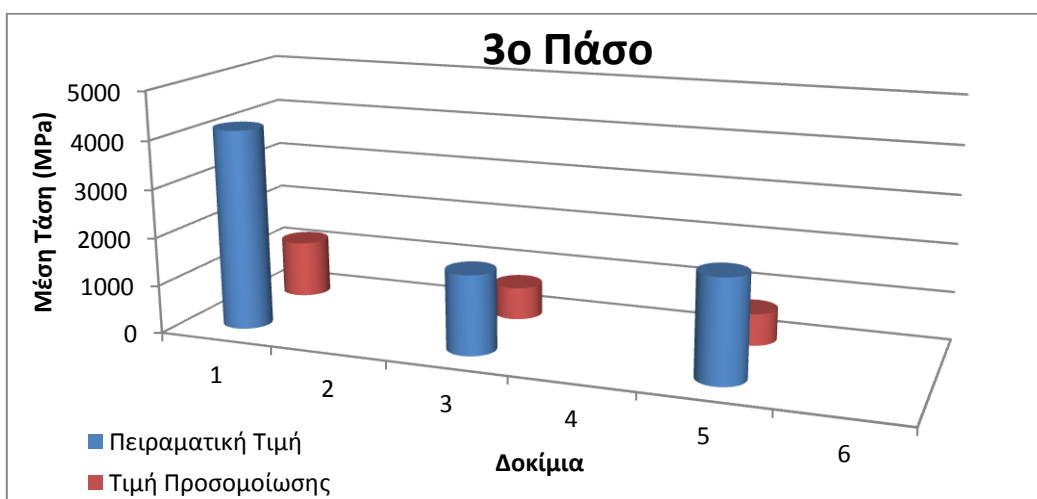
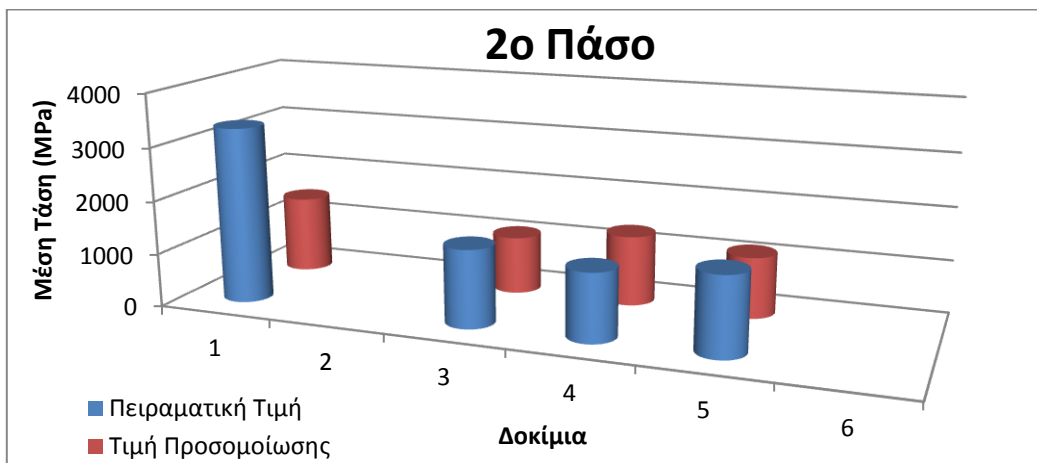
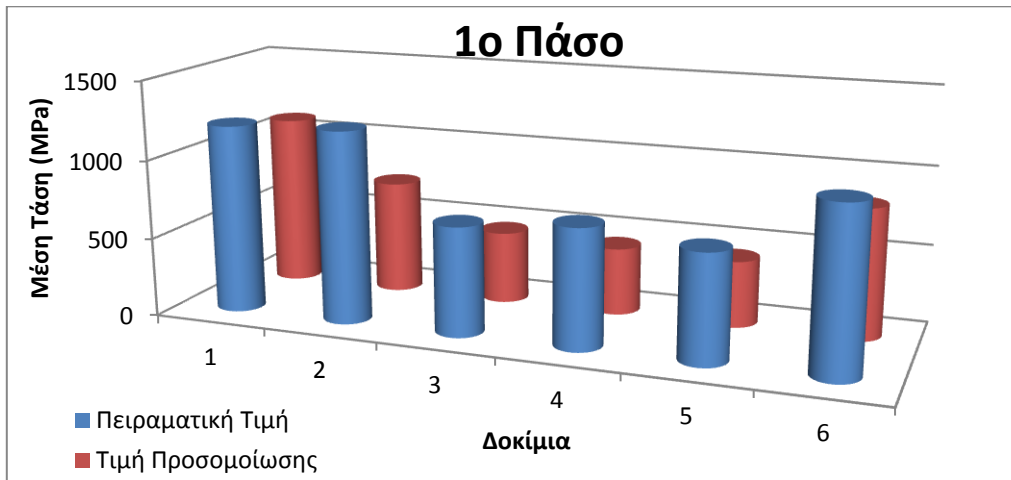
Σχ. 6.15: Γραφική απεικόνιση της κατεργασίας στο δοκίμιο Cu-MgO για το 4ο πάσο.

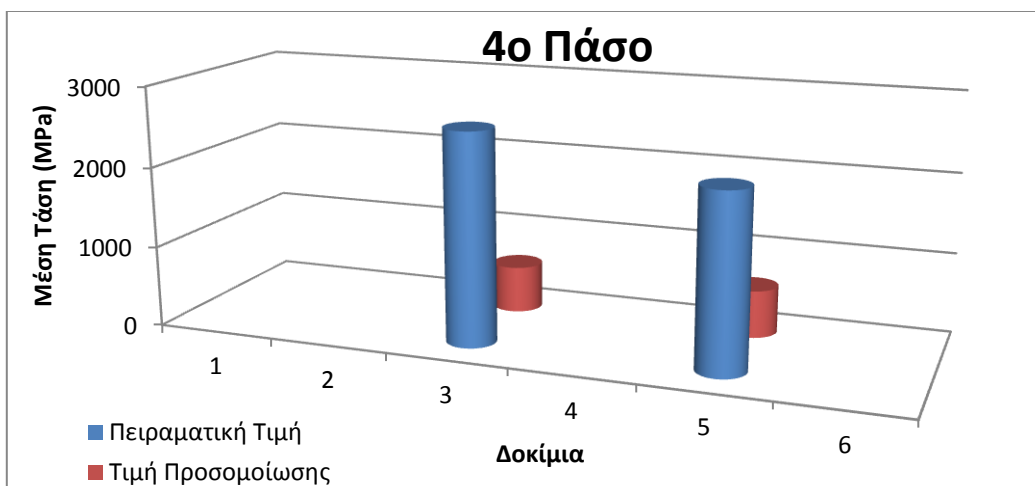
Από τις παραπάνω προσομοιώσεις, εκτός από την τάση που αναπτύσσεται, μπορούμε να δούμε ότι υπάρχουν και αρκετά μεγάλες παραμένουσες τάσεις στο μέταλλο. Συγκεντρωτικά, οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά την μοντελοποίηση για κάθε υλικό και κάθε πάσο φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Το παραπάνω διάγραμμα μας δείχνει μια εικόνα για το πως θα ήταν η κατεργασία μας αν όλα ήταν σχεδόν ιδανικά, δηλαδή αν δεν υπήρχαν φαινόμενα εργοσκληρυνσης παραμένουσες τάσεις, γεωμετρικές ατέλειες και οι τριβές μεταξύ των υλικών ήταν οι ίδιες καθ' όλη την διάρκεια της κατεργασίας. Η τάση είναι ανάλογη ουσιαστικά μόνο των υλικών και της παραμόρφωσης, που είναι μεγαλύτερη για το 2ο πάσο από ότι για τα επόμενα (η διατομή μειώνεται στο 1ο πάσο κατά 1mm, στο 2ο 2,5mm ενώ στο 3ο και 4ο 2mm).

Παρακάτω έχουμε τα διαγράμματα που συγκρίνουν τις πειραματικές τιμές με αυτές τις προσομοίωσης.





Η τιμές για τα πρώτα 2 πάσα είναι πολύ κοντά (με εξαίρεση το MgB₂ που γενικά αποδείχτηκε δυσκολότερο στην κατεργασία από το αναμενόμενο), ενώ στη συνέχεια που υπεισέρχεται περισσότερο το φαινόμενο της εργοσκληρυνσης οι υπολογιστικές τιμές είναι αισθητά μικρότερες.

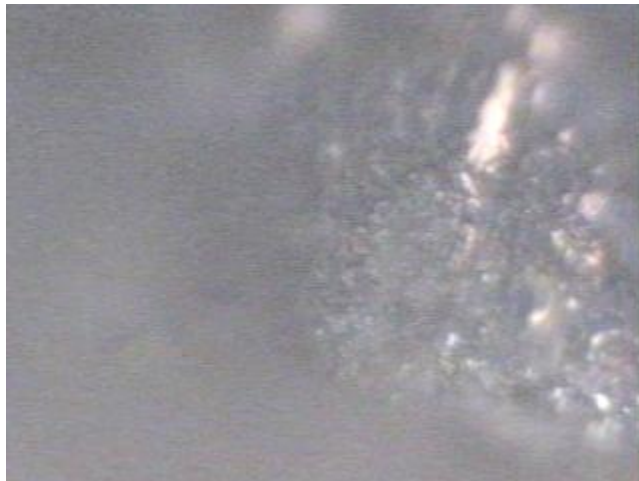
6.3. Χαρακτηρισμοί

6.3.1. Οπτική Μικροσκοπία (ΟΜ)

Οι φωτογραφίες που ακολουθούν αποτελούν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα όλων όσων πάρθηκαν, αφού επιλέχθησαν 2-3 από κάθε δείγμα, ενώ για όλα τα δείγματα είδαμε 5 εικόνες (X5, X10, X20, X50, X100). Όμως 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. Παράλληλα, πρέπει να τονιστεί ότι δεν προβλέπεται σε καμία περίπτωση χημική προσβολή των δειγμάτων, καθώς θα είχαμε φθορά του υλικού, ιδίως τού MgB₂. Τέλος να αναφέρουμε ότι επικεντρωθήκαμε κυρίως στην διεπιφάνεια μεταξύ σκόνης και μετάλλου και λιγότερο στην σκόνη, αφού με το SEM στην συνέχεια έγινε ανάλυση της σκόνης.



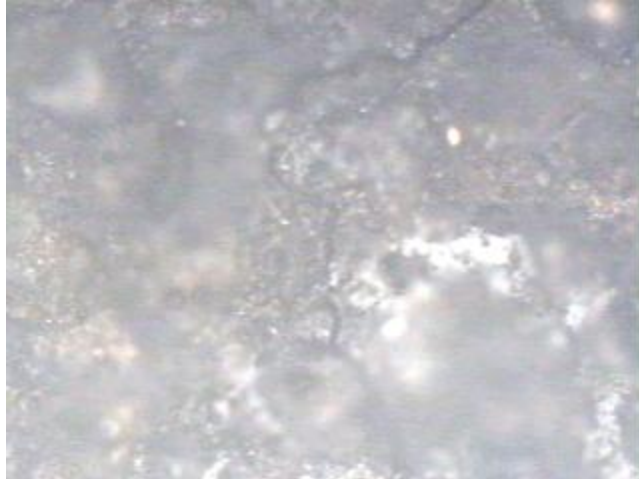
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 2^ο Πάσο, X10



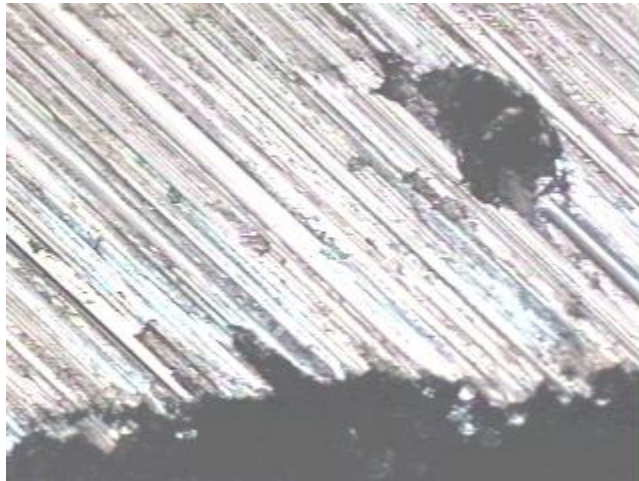
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 2^ο Πάσο, X100



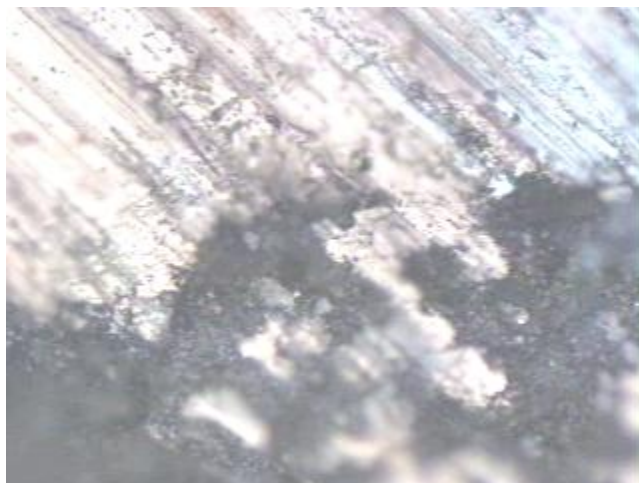
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 3^ο Πάσο, X10



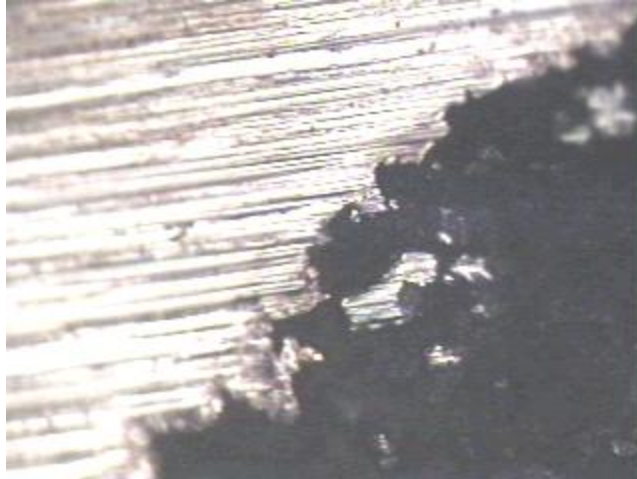
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 3^ο Πάσο, X20



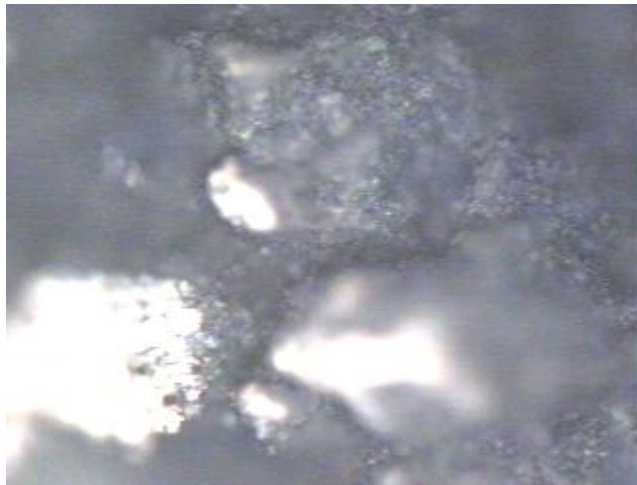
Cu-MgB₂ [δοκ.1], 2^ο Πάσο, X10



Cu-MgB₂ [δοκ.1], 2^ο Πάσο, X50



Cu-MgB₂ [δοκ.1], 3° Πάσο, X10



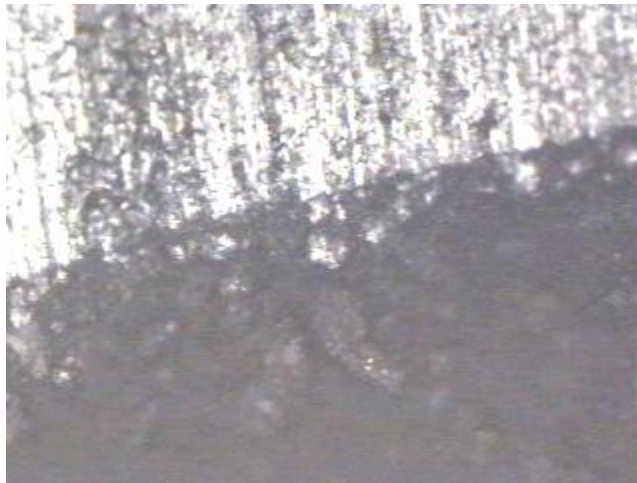
Cu-MgB₂ [δοκ.1], 3° Πάσο, X50



Al-MgB₂ [δοκ.2], προσβεβλημένο με νερό, 1° Πάσο, X5



Al-MgB₂ [δοκ.2], προσβεβλημένο με νερό, 1^ο Πάσο, X20



Al-MgB₂ [δοκ.2], 1^ο Πάσο, X10



Al-MgB₂ [δοκ.2], 1^ο Πάσο, X50



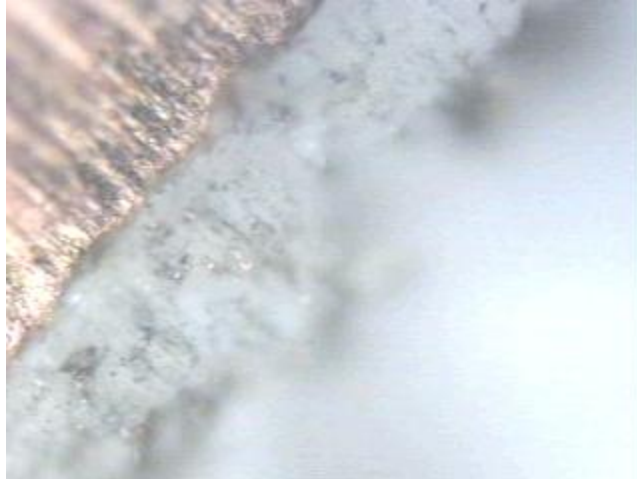
Cu-MgO [δοκ.3], 2° Πάσο, X5



Cu-MgO [δοκ.3], 2° Πάσο, X50



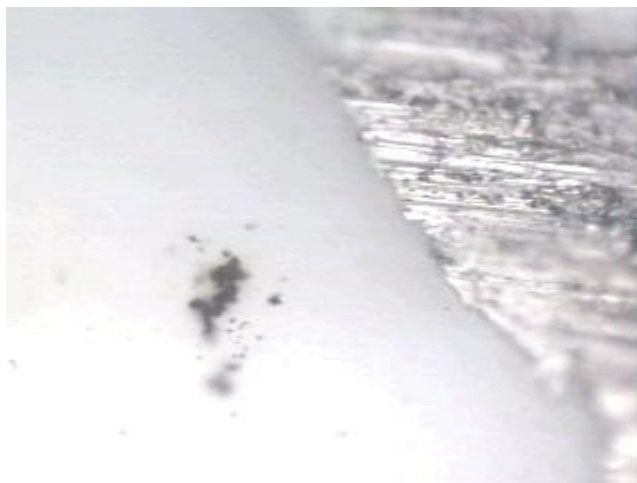
Cu-MgO [δοκ.3], 4° Πάσο, X10



Cu-MgO [δοκ.3], 4^ο Πάσο, X50



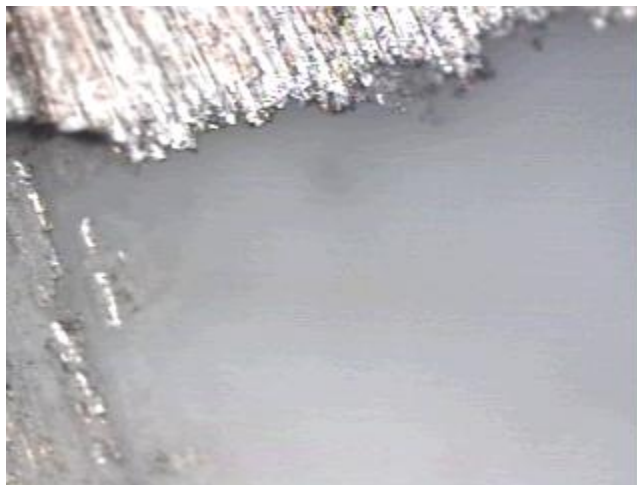
Al-MgO [δοκ.4], 2^ο Πάσο, X10



Al-MgO [δοκ.4], 2^ο Πάσο, X50



Al(c)-MgO [δοκ.8], 2° Πάσο, X5



Al(c)-MgO [δοκ.8], 2° Πάσο, X20



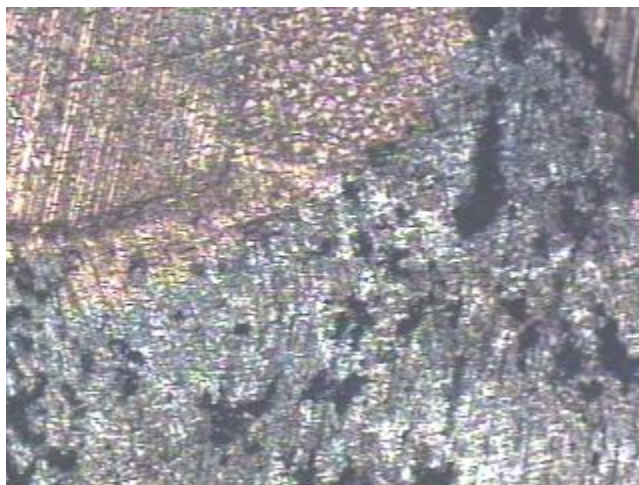
Al(c)-MgO [δοκ.8], 2° Πάσο, X50



Cu-TiC&Al [δοκ.5], 2^ο Πάσο, X10



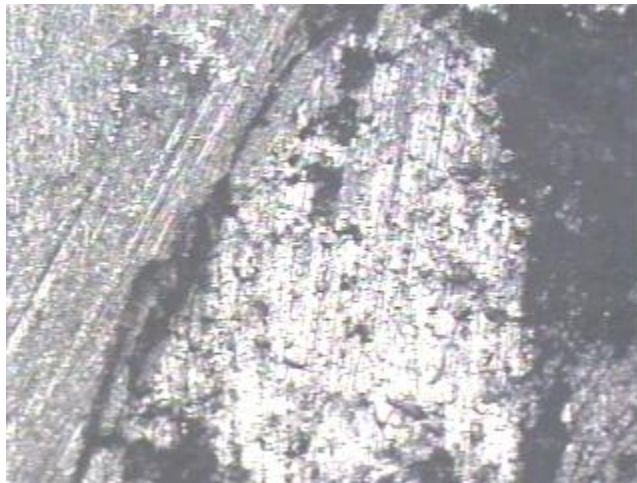
Cu-TiC&Al [δοκ.5], 2^ο Πάσο, X50



Cu-TiC&Al [δοκ.5], 4^ο Πάσο, X5



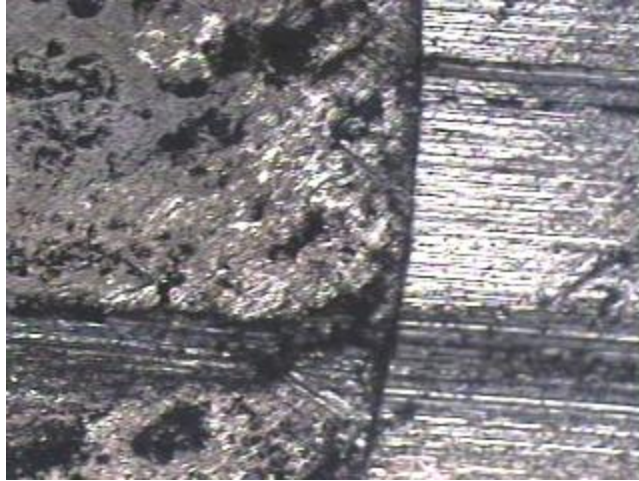
Cu-TiC&Al [δοκ.5], 4^ο Πάσο, X20



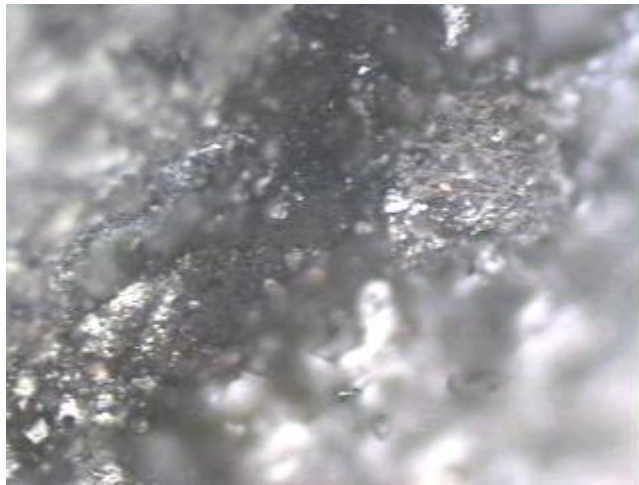
Al-TiC&Al [δοκ.6], 1^ο Πάσο, X5



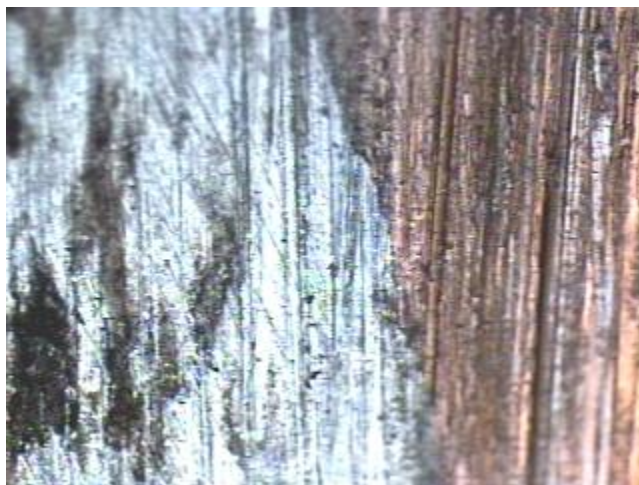
Al-TiC&Al [δοκ.6], 1^ο Πάσο, X100



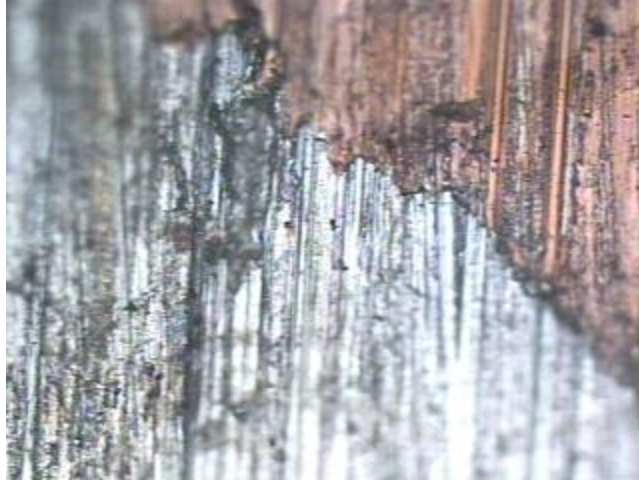
Al(2.5mm)-TiC&Al [δοκ.7], 2^ο Πάσο, X5



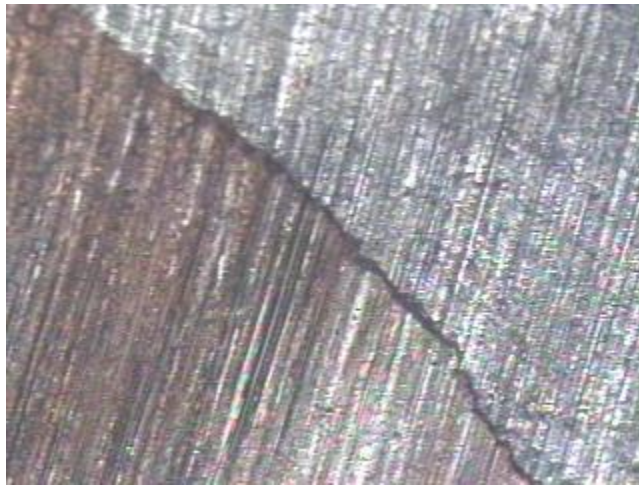
Al(2.5mm)-TiC&Al [δοκ.7], 2^ο Πάσο, X50



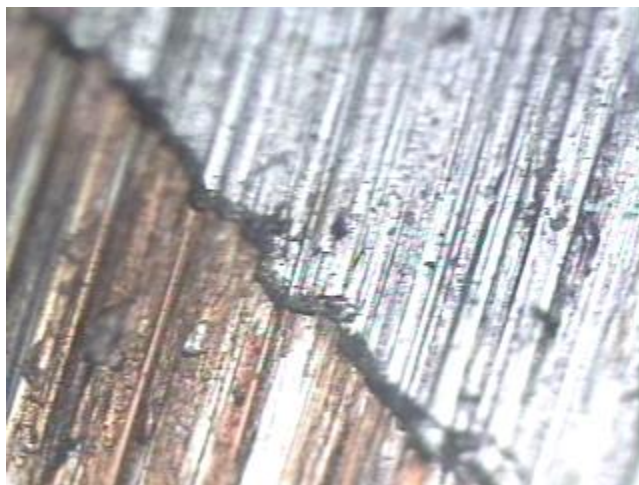
Cu-Mg [δοκ.9], 2^ο Πάσο, X10



Cu-Mg [δοκ.9], 2^ο Πάσο, X20



Cu-Mg [δοκ.9], 4^ο Πάσο, X5



Cu-Mg [δοκ.9], 4^ο Πάσο, X20

Για κάθε σκόνη ξεχωριστά έχουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

MgB_2 : Γενικά οι εικόνες με το οπτικό μικροσκόπιο των δειγμάτων που είχαν MgB_2 , δεν εμφανίζονται καθαρά, λόγω της δομής της σκόνης, κατά την λείανση απομακρύνονταν συσσωματώματα κόκκων με αποτέλεσμα να σχηματιστούν πολλά επίπεδα. Στις μεγάλες μεγεθύνσεις, φαίνεται η διαφορά στο χρώμα για το Mg (ασημί) και το B (σκουρόχρωμο). Επομένως, παρ' όλο που η σκόνη ήταν καθαρό MgB_2 , μετά την κατεργασία, το B, ως βαρύτερο, διαχωρίστηκε από το Mg. Τέλος, τα δείγματα που είχαν προσβληθεί με νερό, παρουσιάζονται να έχουν λιγότερο εμφανή κρυσταλλικότητα.

MgO : Η σκόνη του MgO παρουσιάζει την καλύτερη συνεκτικότητα και πρόσφυση με το μέταλλο. Το πιο κατεργασμένο κομμάτι όμως παρουσίαζε περισσότερες ανομοιογένειες και ακαθαρσίες από το μέταλλο στην διεπιφάνεια.

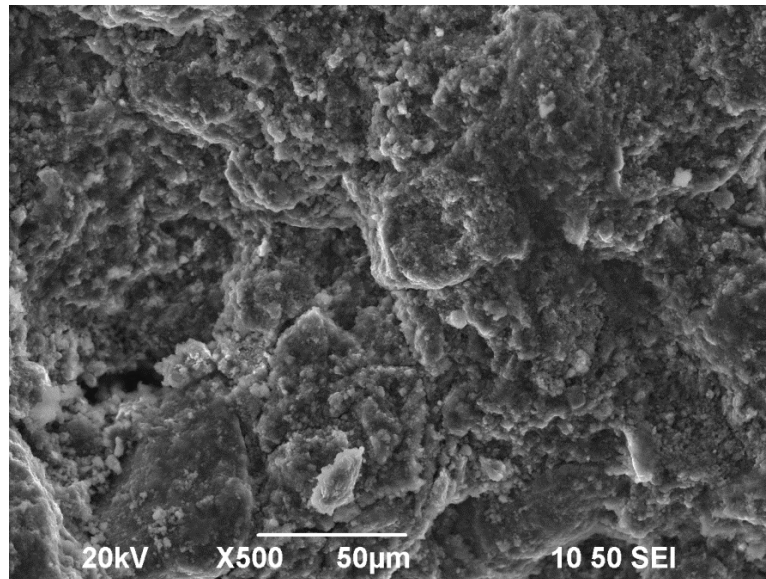
$TiAl$: Το TiC , ως σκληρότερο, παρουσιάζει πιο τραχείς κόκκους, αφού είναι σαν να έχει εισχωρήσει στην μαλακότερη σκόνη του Al . Και πάλι, στην διεπιφάνεια έχουμε εισχώρηση του Cu , ενώ όταν έχουμε μήτρα Al , έχουμε καλύτερη συνοχή.

Mg : Στην διμεταλλική επιφάνεια, η πρόσφυση μεταξύ Mg και Cu είναι μέτρια και αυτό, εκτός από τις εικόνες, φάνηκε και στο τέλος της κατεργασίας όπου σε πολλά σημεία είχε αποκολληθεί η μήτρα από το Mg , λογικό αν σκεφτούμε πως δεν αντιδρά ο χαλκός με το μαγνήσιο (Το ένα δεν αποτελεί κραματικό στοιχείο του άλλου). Η σκόνη Mg βέβαια, βλέπουμε ότι έχει σχεδόν αποκτήσει δομή συμπαγούς μετάλλου.

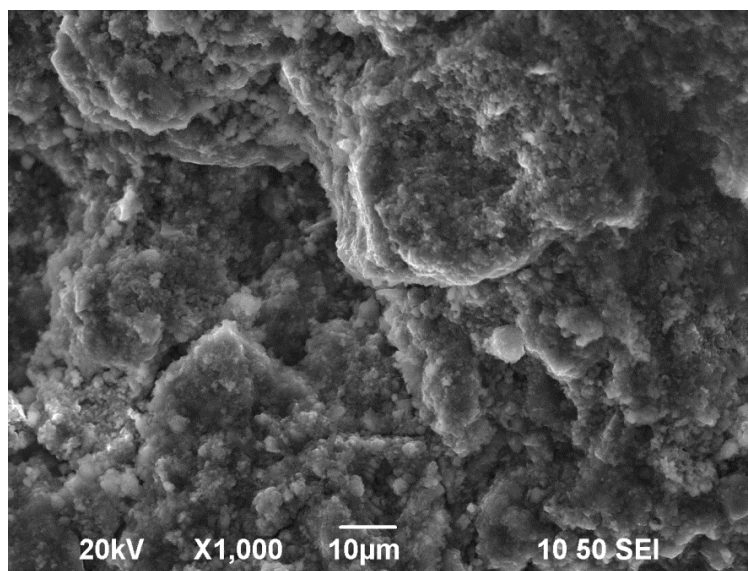
Συμπερασματικά, από τις εικόνες στο οπτικό μικροσκόπιο βλέπουμε γενικά ότι, γενικά η πρόσφυση μεταξύ μετάλλου και σκόνης είναι αρκετά καλή για κάθε υλικό. Παράλληλα, οι ακαθαρσίες και η εισχώρηση του μετάλλου της μήτρας στην σκόνη δεν είναι εμφανής τόσο στο 2° πάσο, όσο στο 4° , ενώ παρατηρείται μεγαλύτερου ποσοστού εισχώρηση της μήτρας στην σκόνη παρά το ανάποδο, πιθανόν λόγω του πορώδους της τελευταίας.

6.3.2. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

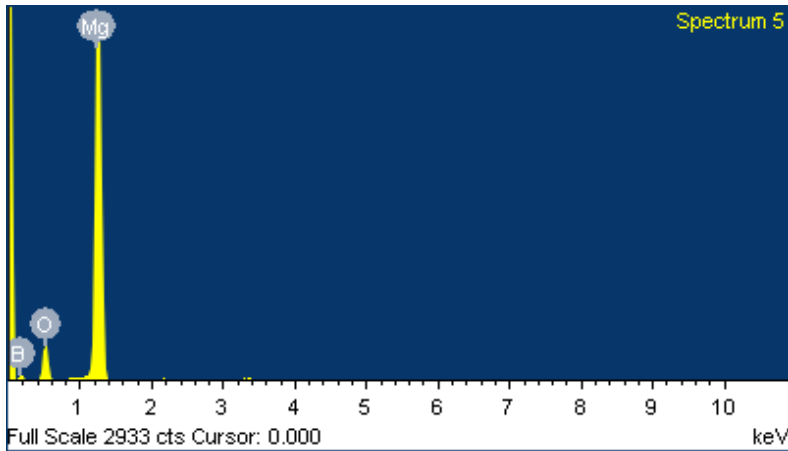
Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο JEOL JSM 6390 της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών υπό την επίβλεψη του καθ. Δ. Παντελή, ελέγξαμε την δομή της σκόνης με μεγεθύνσεις συνήθως X500 και X1000, ενώ με το EDAX της κάναμε στοιχειομετρική ανάλυση. Σε αγκύλη αναγράφεται ο αριθμός του δοκιμίου, ενώ το “spectrum” είναι τυχαίο, καθώς τα δείγματα δεν αναλύθηκαν με την σειρά. Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω ανά δείγμα:



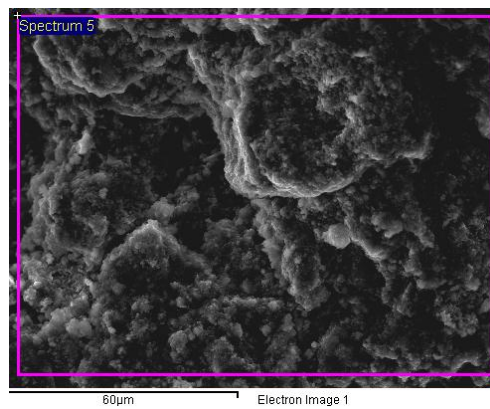
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 2^ο Πάσο, X500



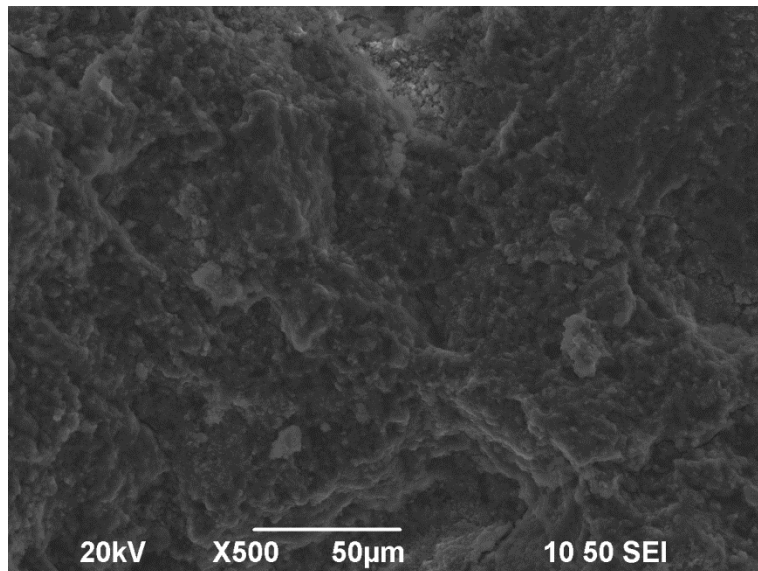
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 2^ο Πάσο, X1000



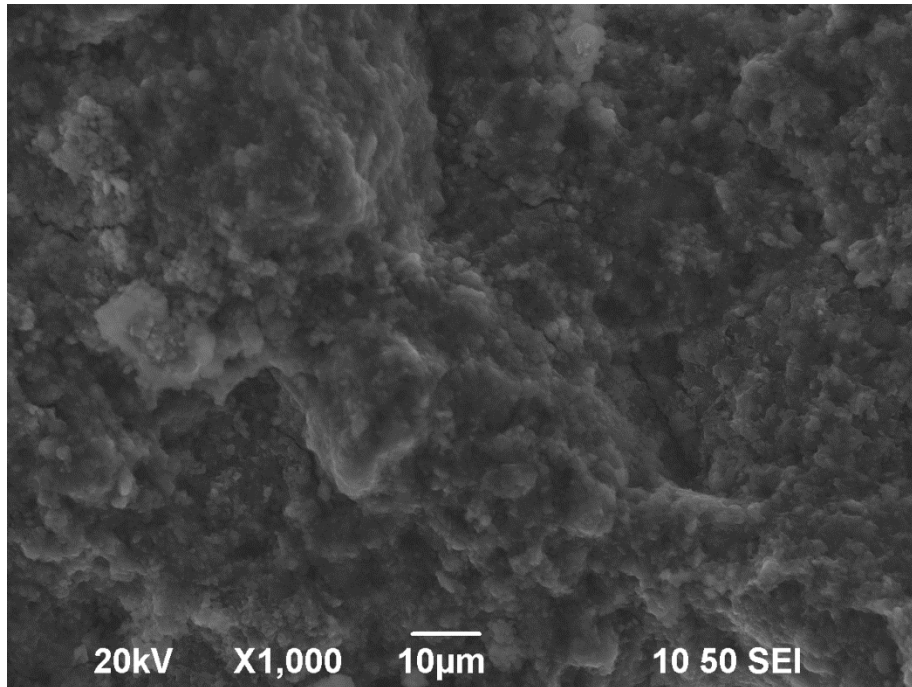
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 43.80 | 59.92 |
| O K | 18.65 | 17.24 |
| Mg K | 37.55 | 22.84 |



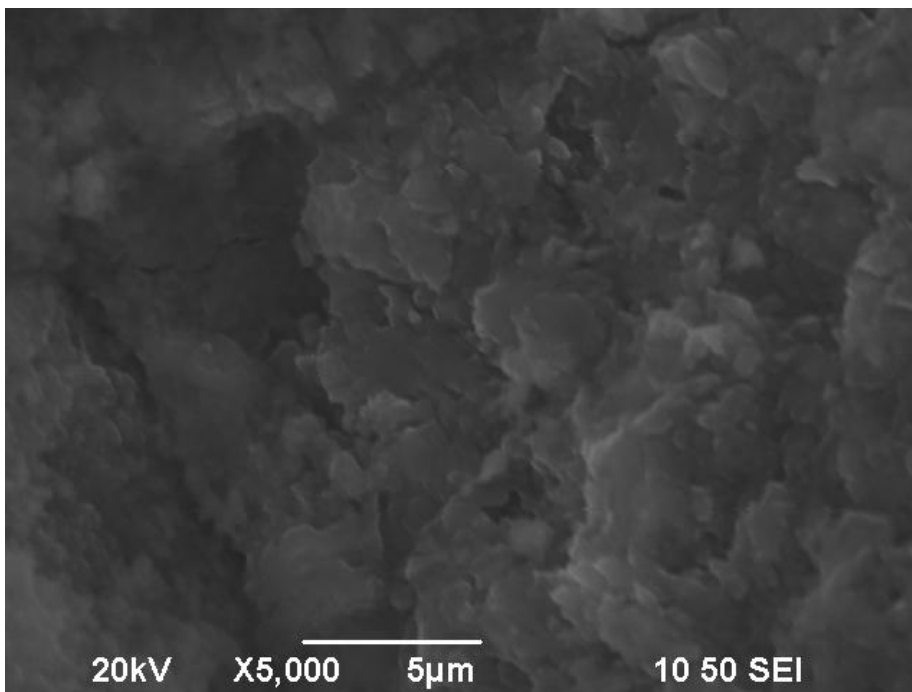
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-MgB_2 [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 2^ο Πάσο



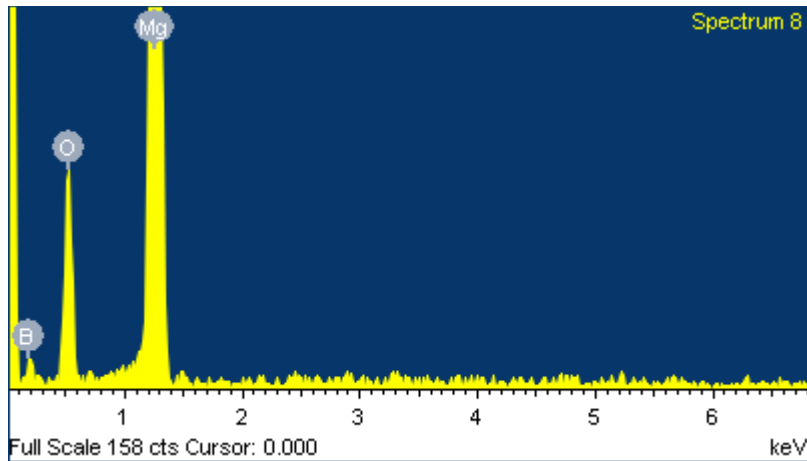
Cu-MgB_2 [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 3^ο Πάσο, X500



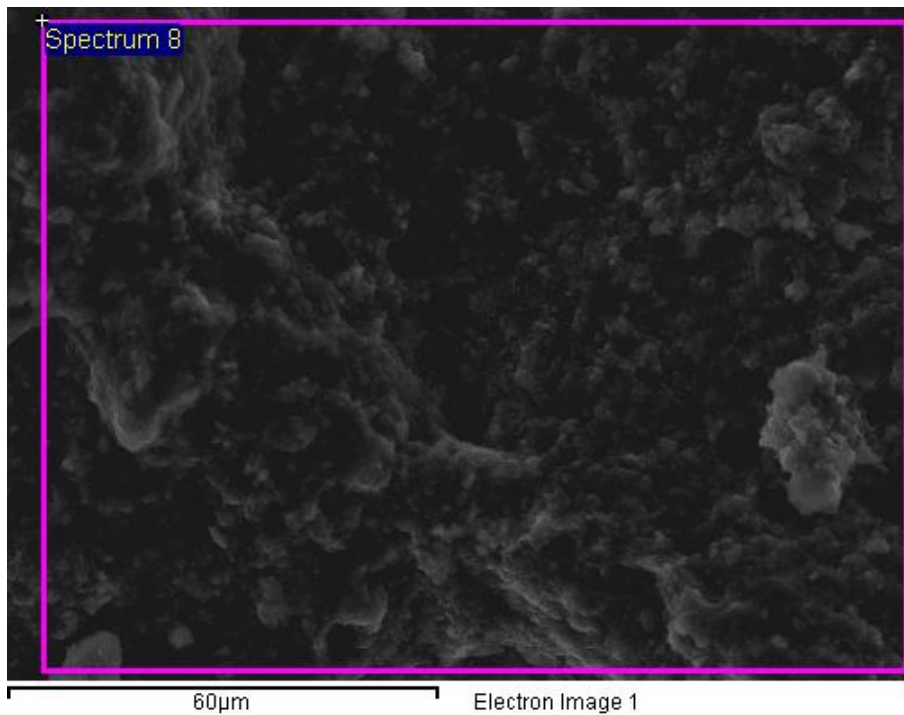
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 3^ο Πάσο, X1000



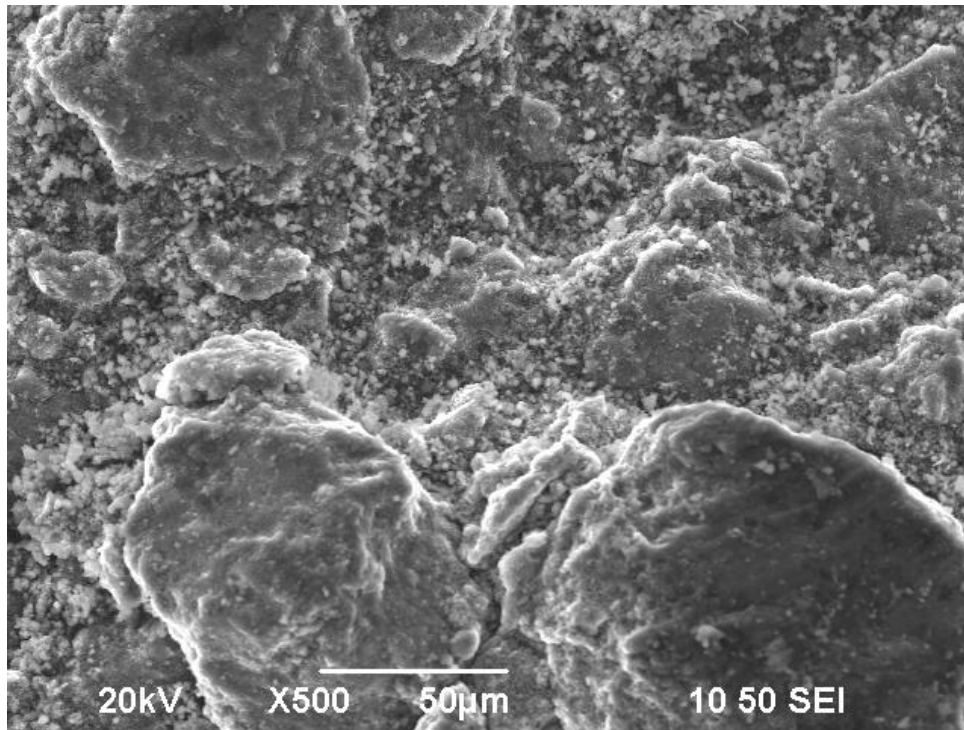
Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 3^ο Πάσο, X5000



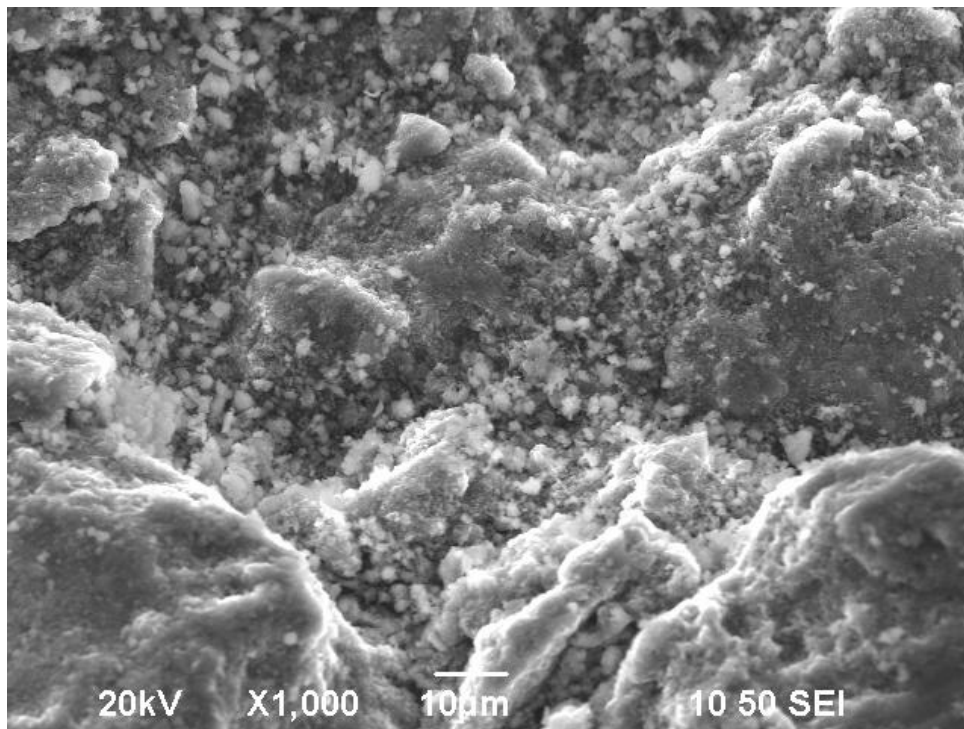
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 53.53 | 68.39 |
| O K | 17.65 | 15.24 |
| Mg K | 28.82 | 16.37 |



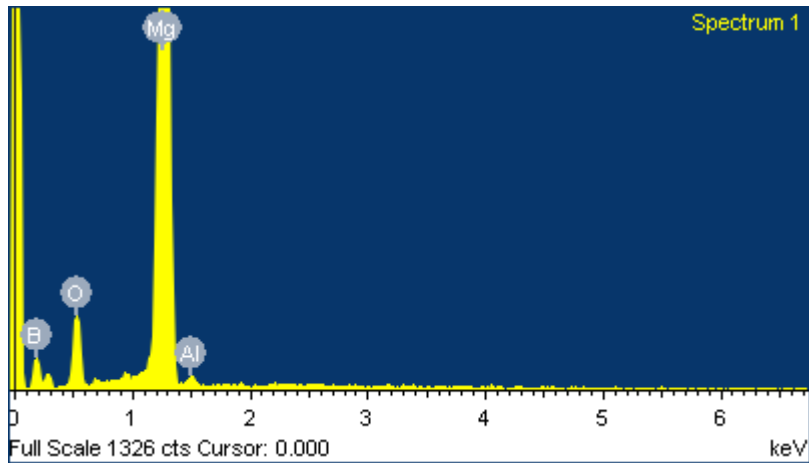
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-MgB₂ [δοκ.1], προσβεβλημένο με νερό, 3^ο Πάσο



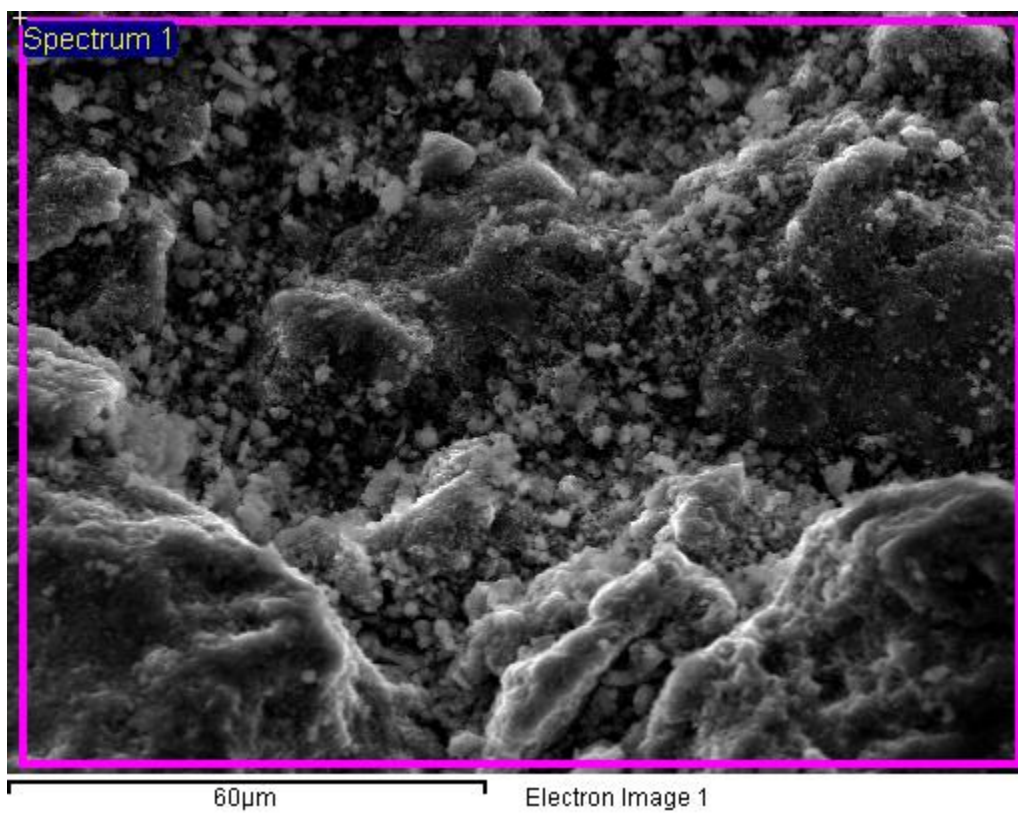
Cu-MgB₂ [δοκ.1], 2^ο Πάσο, X500



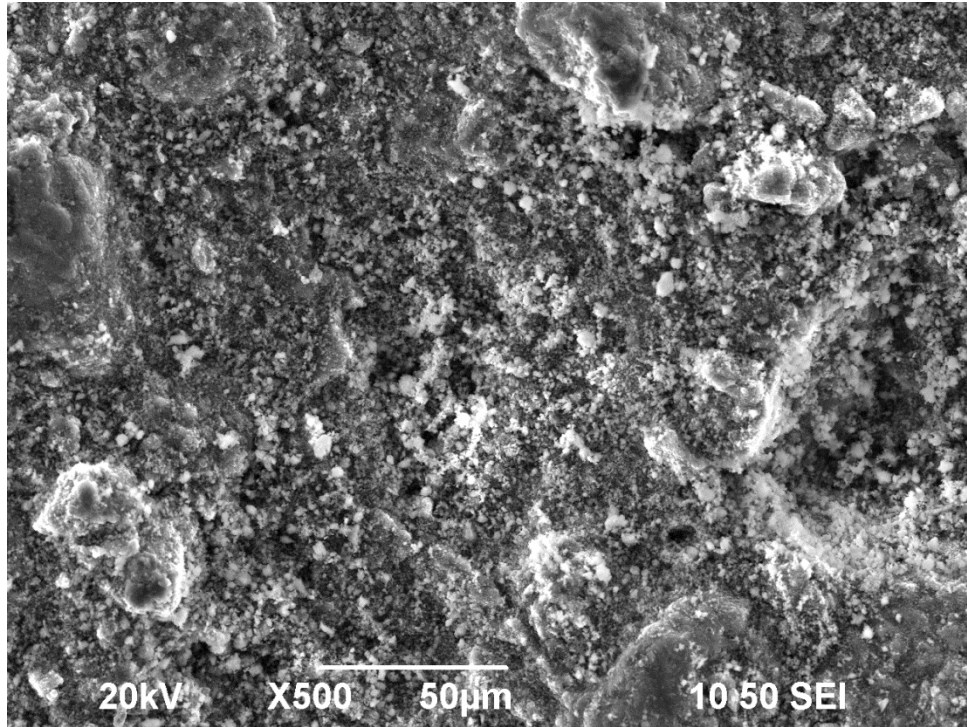
Cu-MgB₂ [δοκ.1], 2^ο Πάσο, X1000



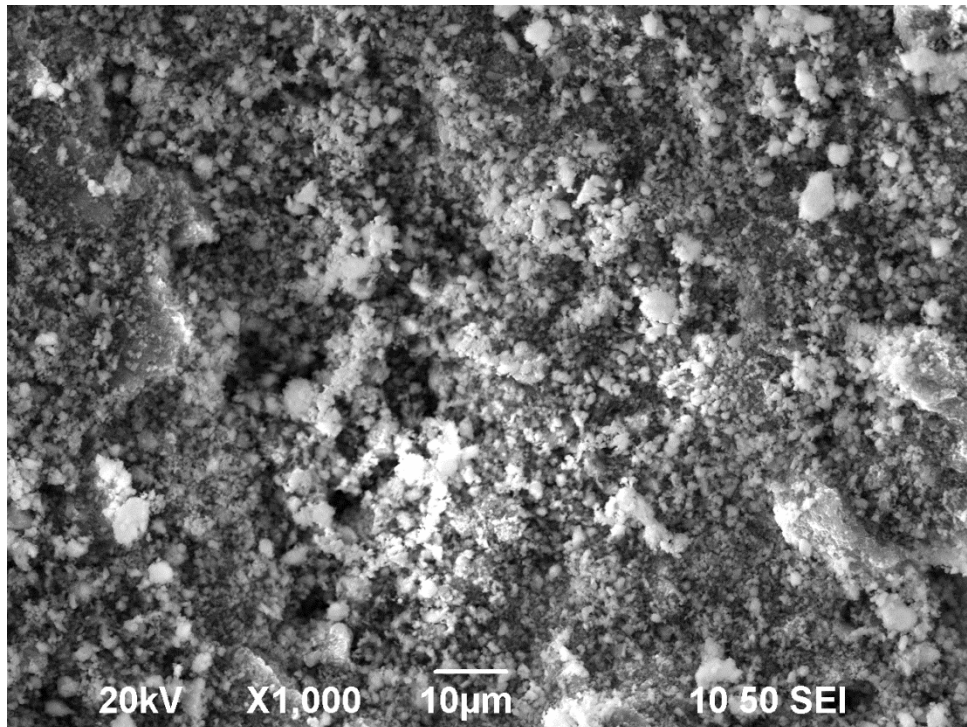
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 53.24 | 69.69 |
| O K | 10.28 | 9.09 |
| Mg K | 36.14 | 21.04 |
| Al K | 0.34 | 0.18 |



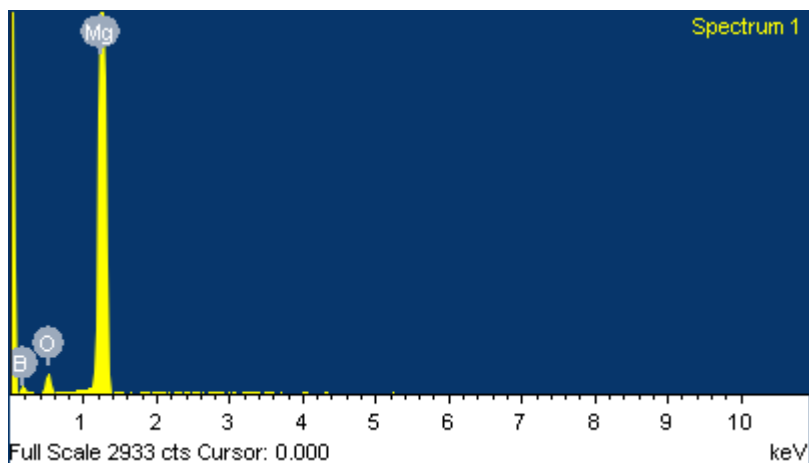
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-MgB₂ [δοκ.1], 2^ο Πάσο



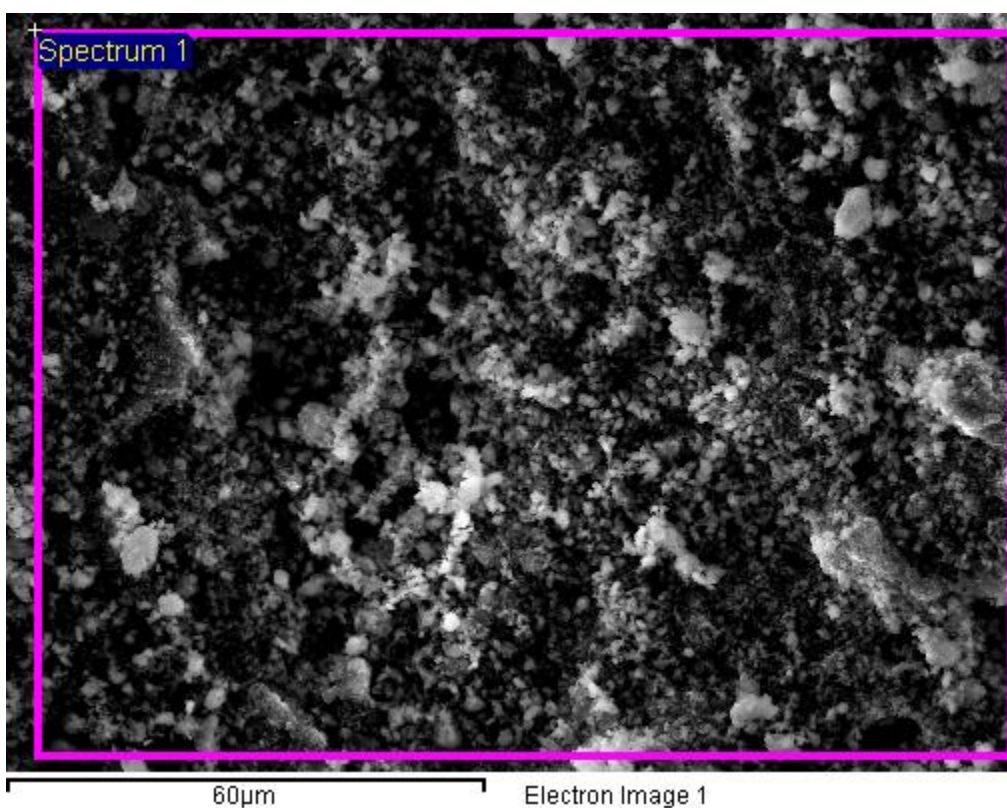
Cu-MgB₂ [δοκ.1], 3^ο Πάσο, X500



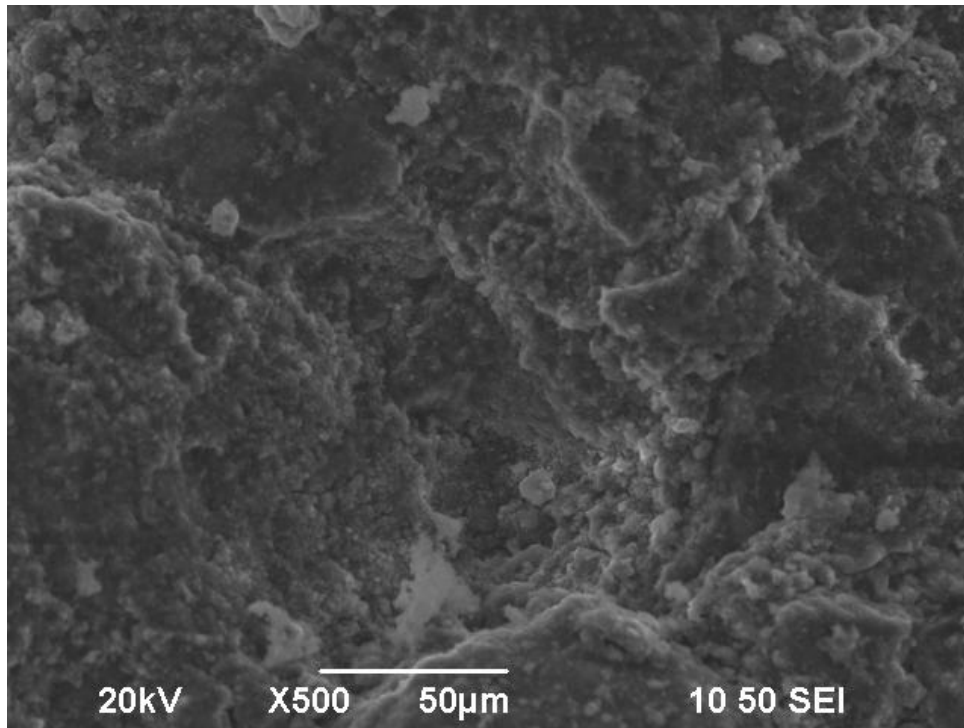
Cu-MgB₂ [δοκ.1], 3^ο Πάσο, X1000



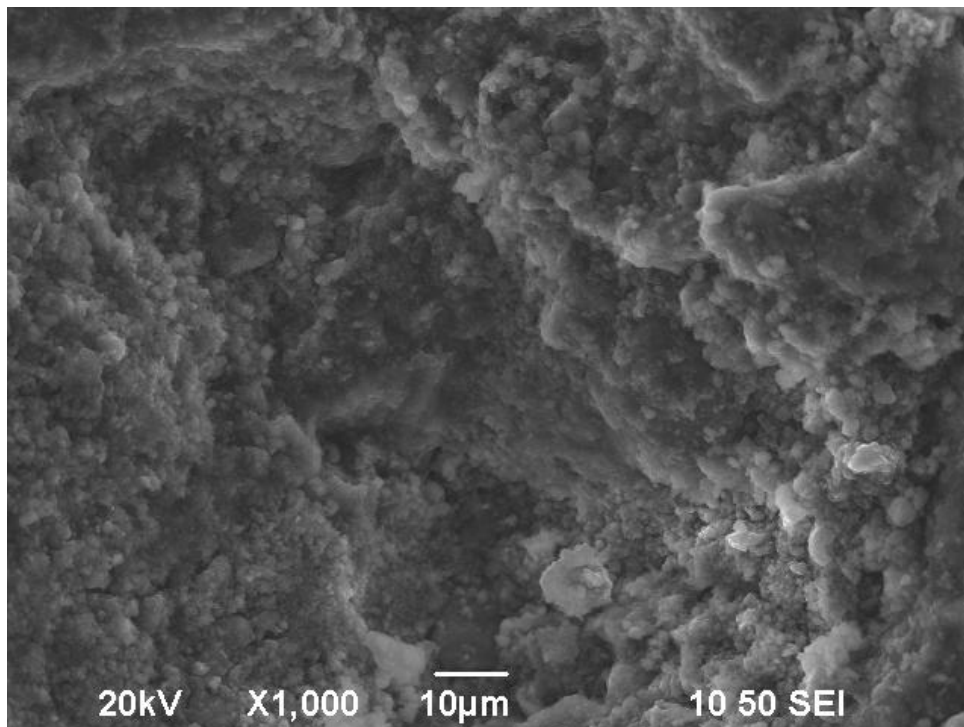
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 51.50 | 68.50 |
| O K | 9.15 | 8.23 |
| Mg K | 39.35 | 23.27 |



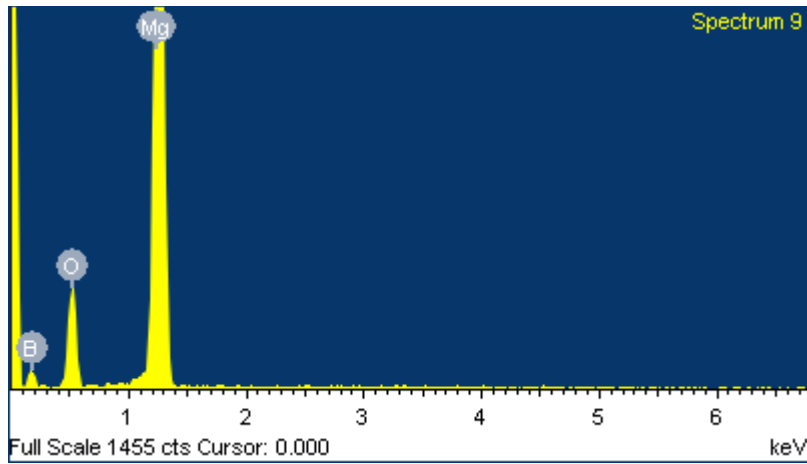
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-MgB₂ [δοκ.1], 3^ο Πάσο



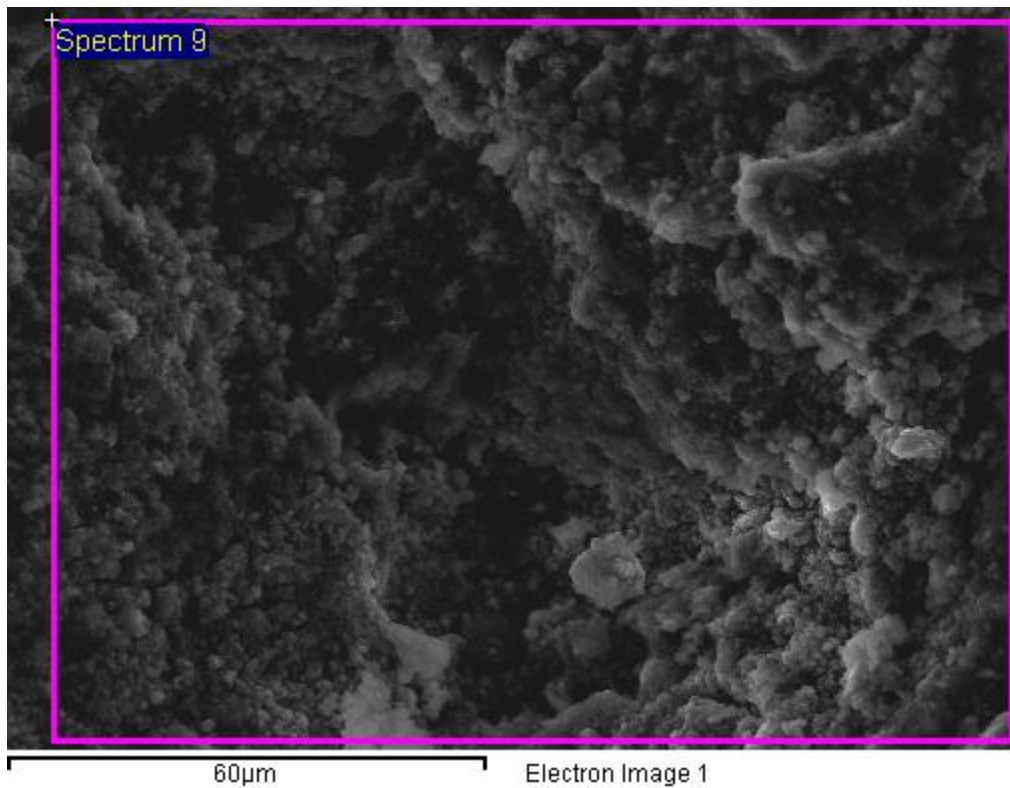
Al-MgB₂ [δοκ.2], προσβεβλημένο με νερό, 1^ο Πάσο, X500



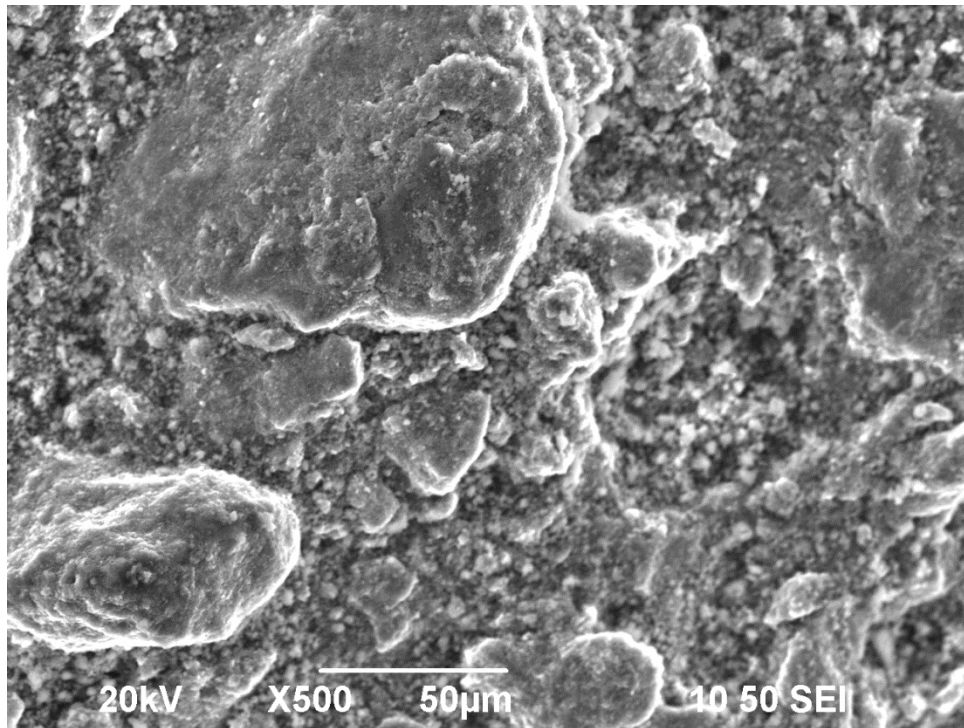
Al-MgB₂ [δοκ.2], προσβεβλημένο με νερό, 1^ο Πάσο, X1000



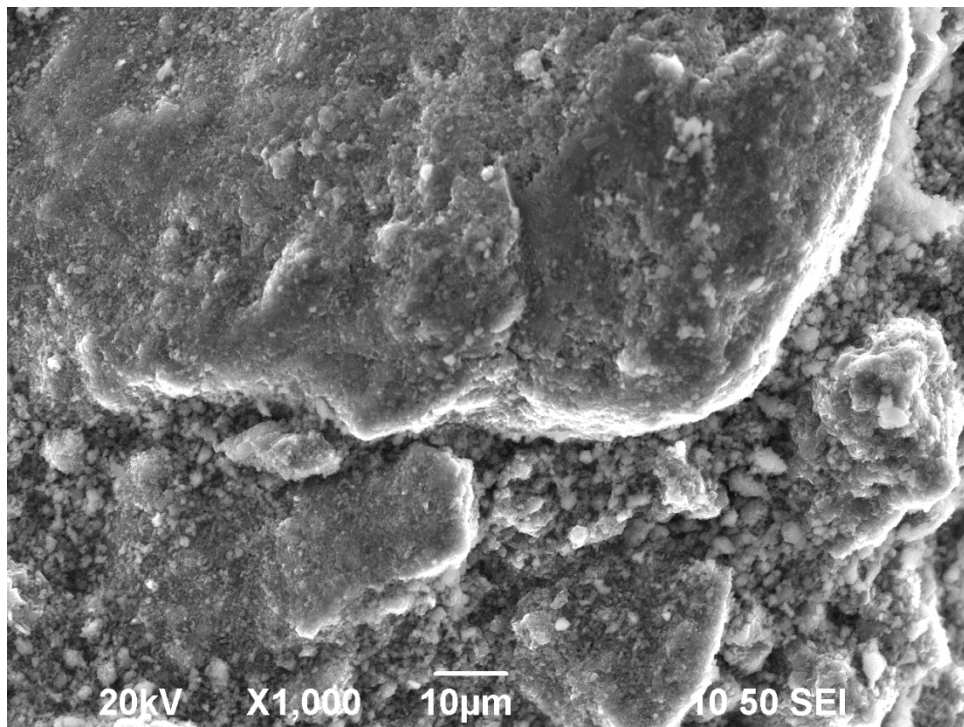
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 47.83 | 63.20 |
| O K | 20.14 | 17.98 |
| Mg K | 32.03 | 18.82 |



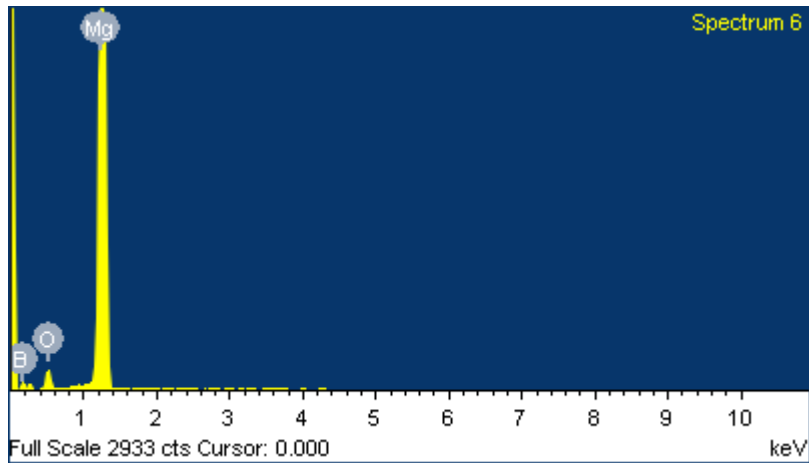
Στοιχειομετρική ανάλυση Al-MgB₂ [δοκ.2], προσβεβλημένο με νερό, 1^ο Πάσο



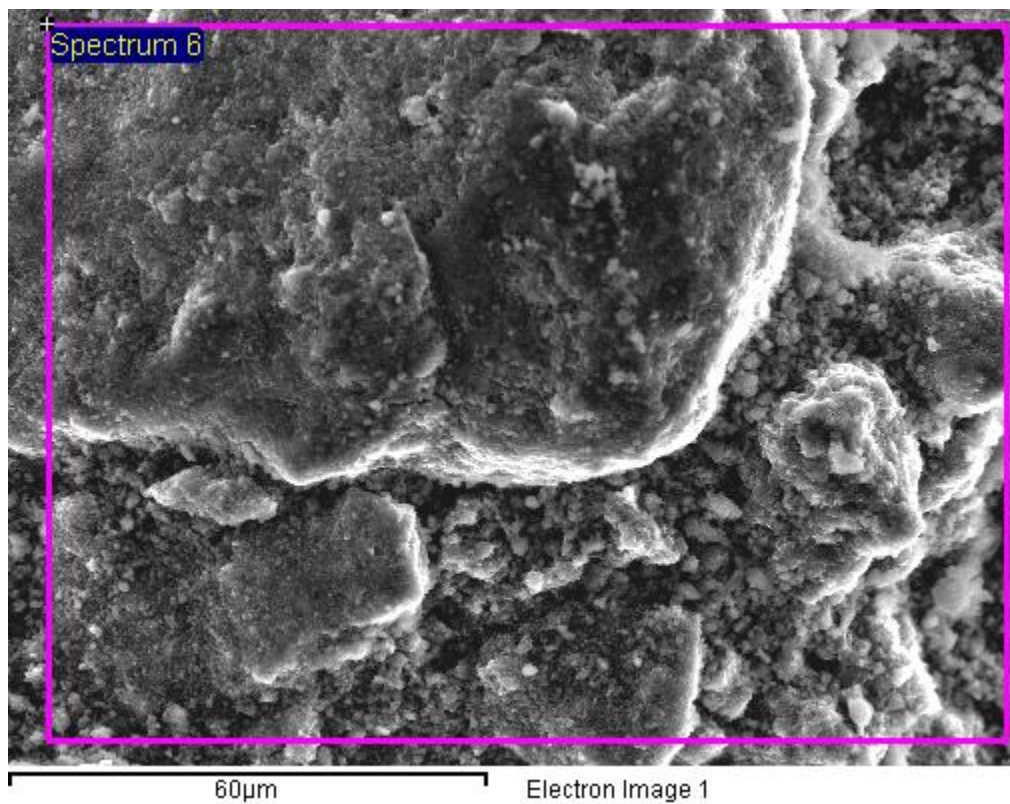
Al-MgB₂ [δοκ.2], 1^ο Πάσο, X500



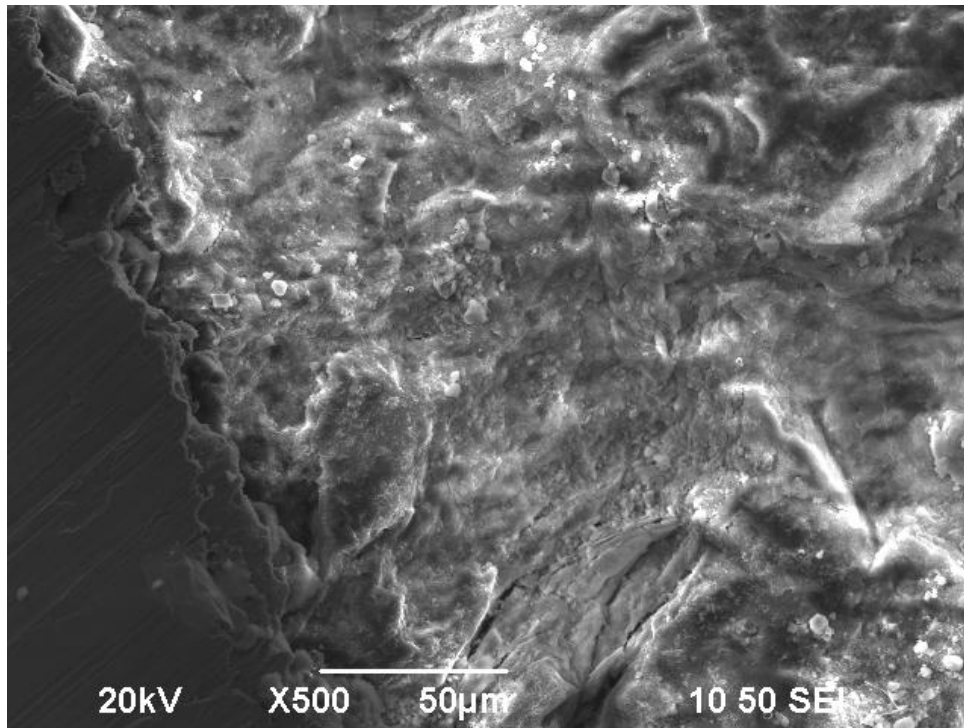
Al-MgB₂ [δοκ.2], 1^ο Πάσο, X1000



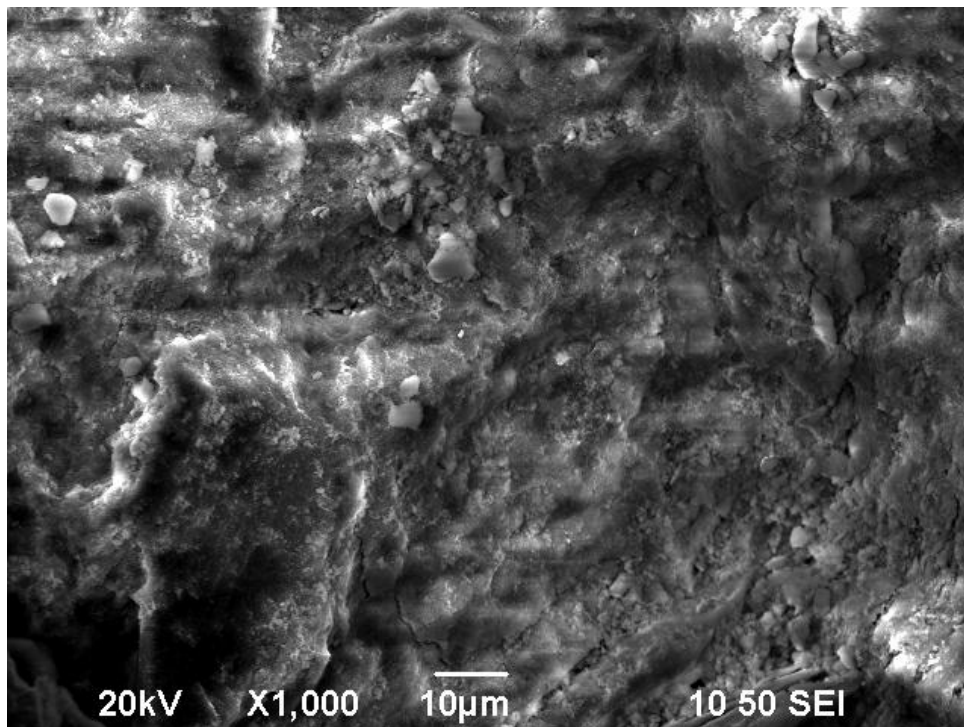
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| B K | 50.18 | 67.60 |
| O K | 8.19 | 7.46 |
| Mg K | 41.63 | 24.94 |



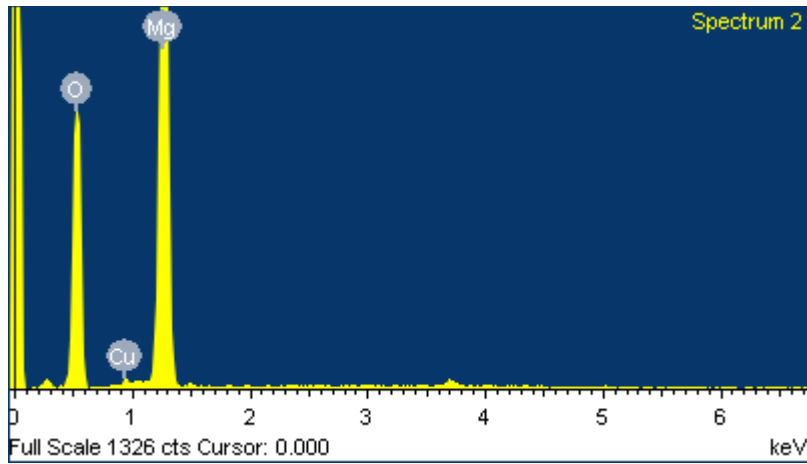
Στοιχειομετρική ανάλυση Al-MgB₂ [δοκ.2], 1^ο Πάσο



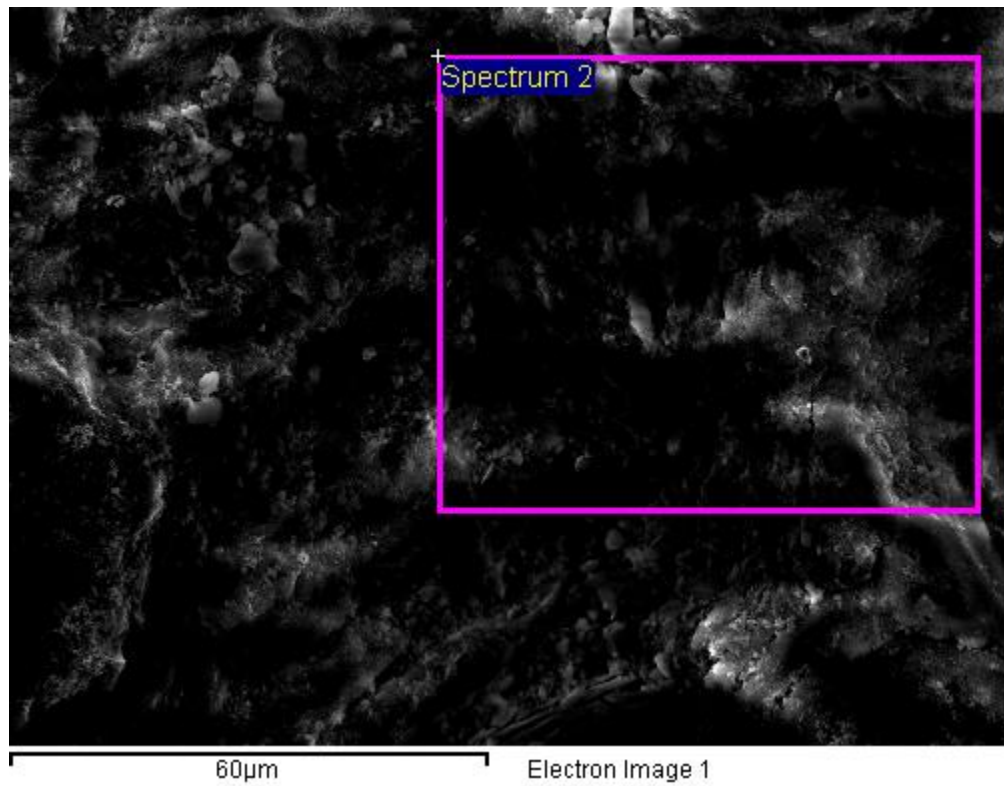
Cu-MgO [δοκ.3], 2° Πάσο, X500



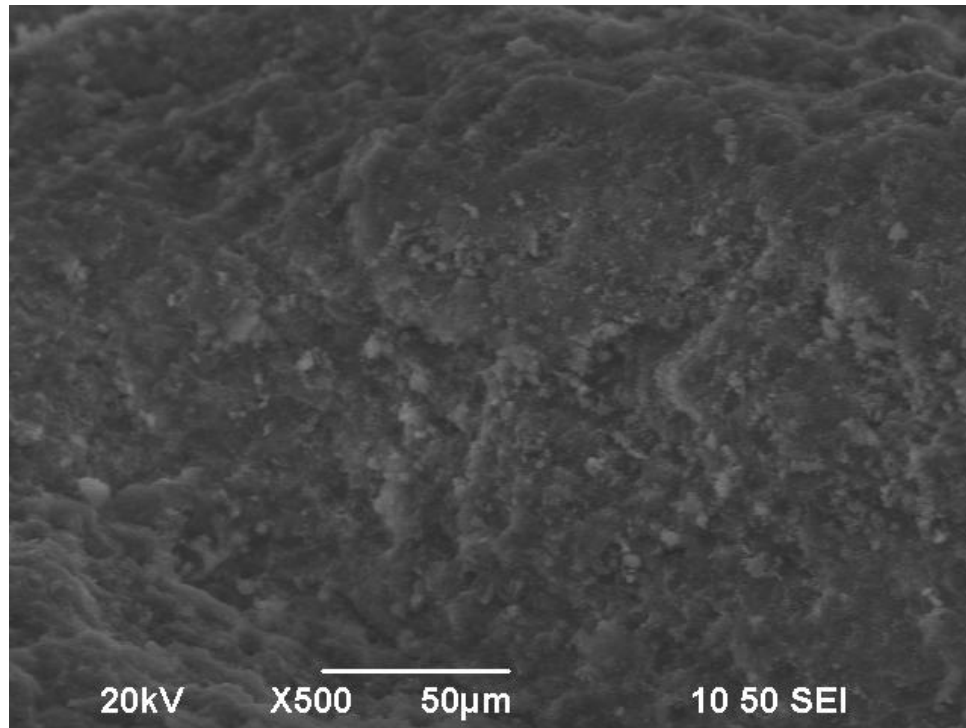
Cu-MgO [δοκ.3], 2° Πάσο, X1000



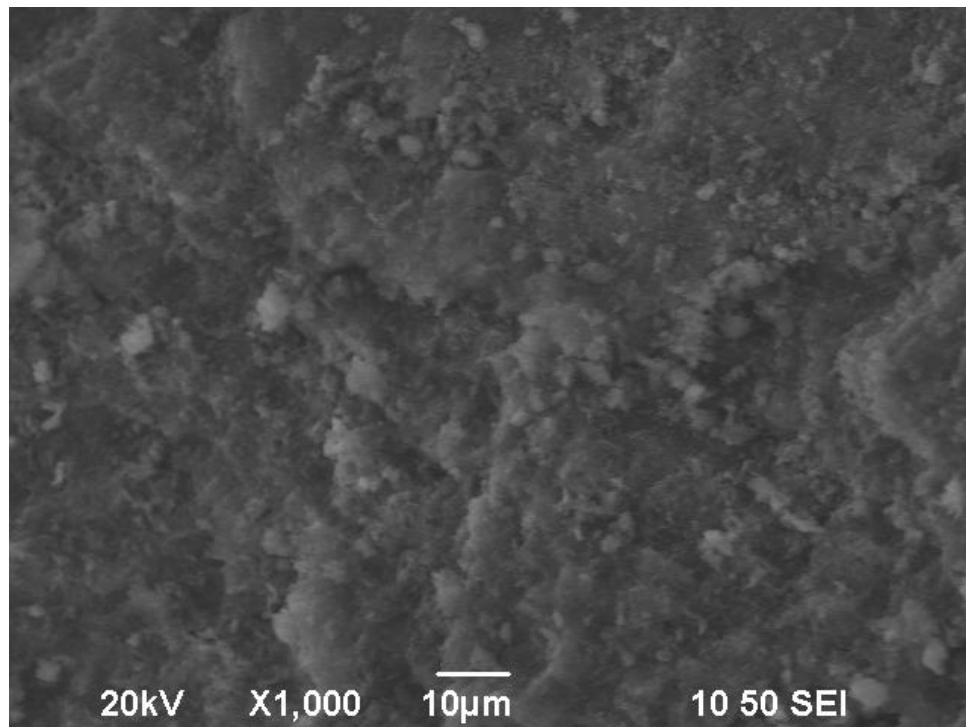
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K | 50.08 | 60.92 |
| Mg K | 48.12 | 38.53 |
| Cu K | 1.80 | 0.55 |



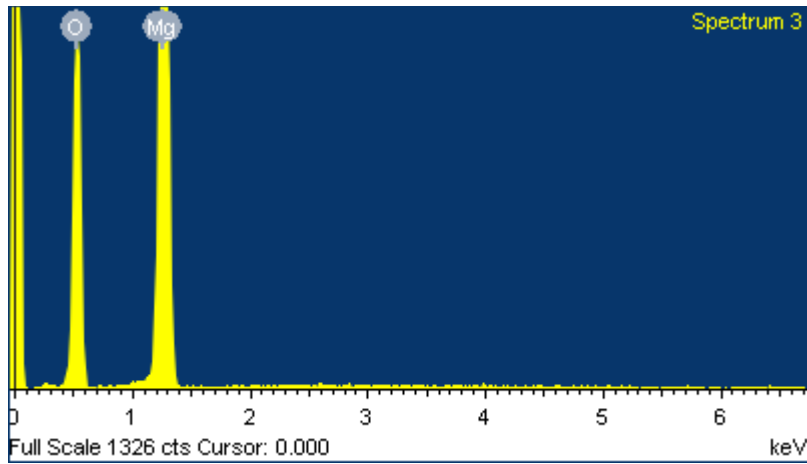
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-MgO [δοκ.3], 2^ο Πάσο



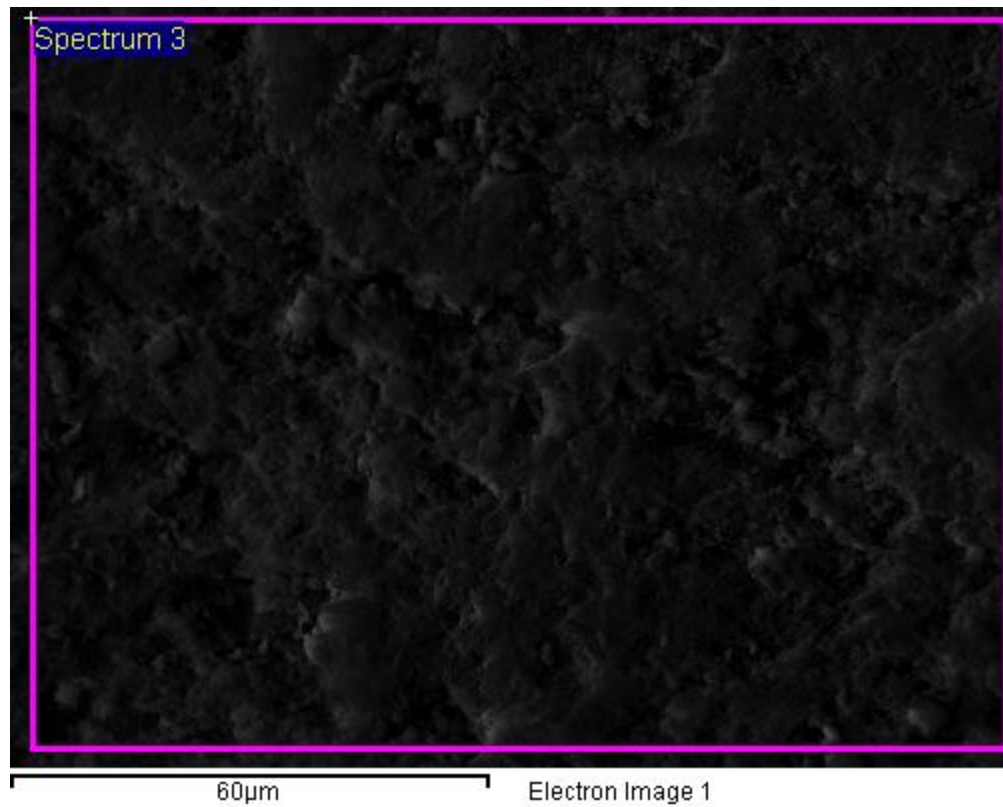
Al-MgO [δοκ.4], 2^ο Πάσο, X500



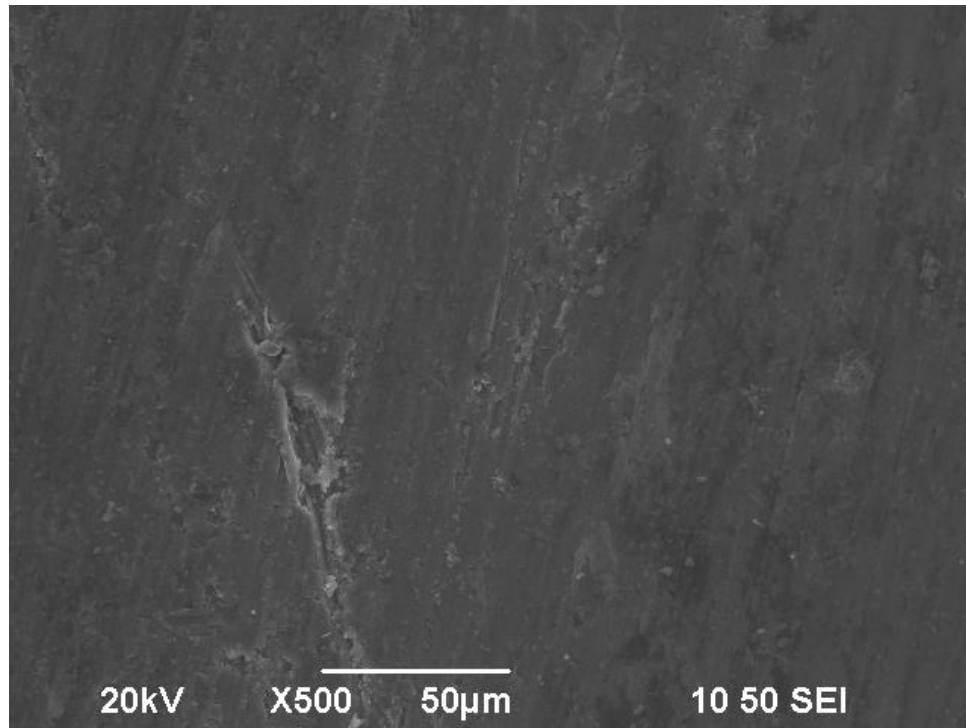
Al -MgO [δοκ.4], 2^ο Πάσο, X1000



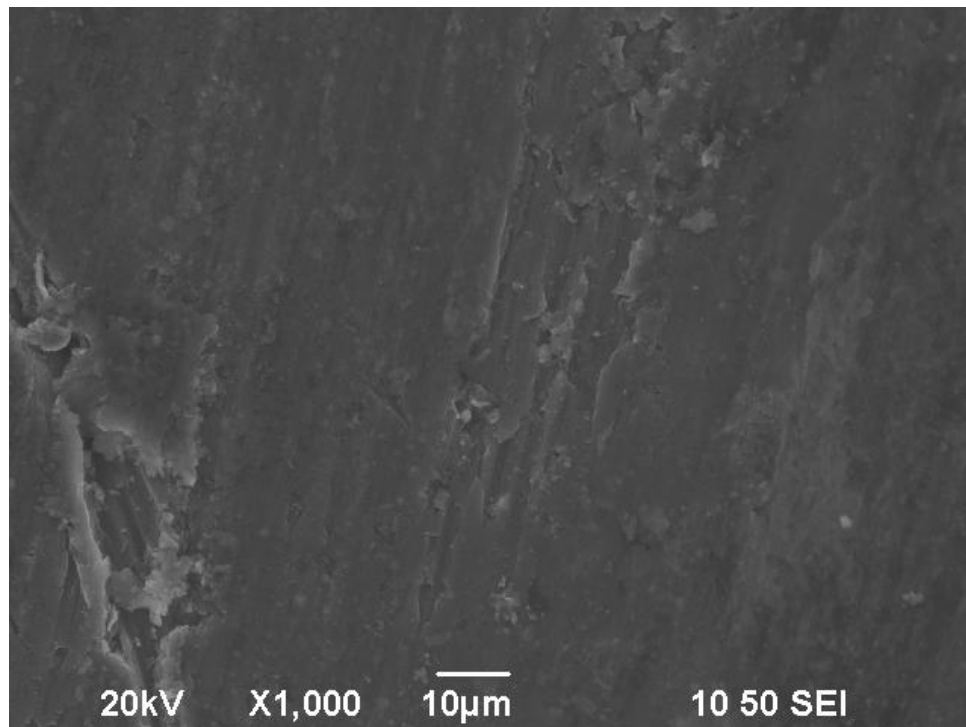
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K | 48.92 | 59.27 |
| Mg K | 51.08 | 40.73 |



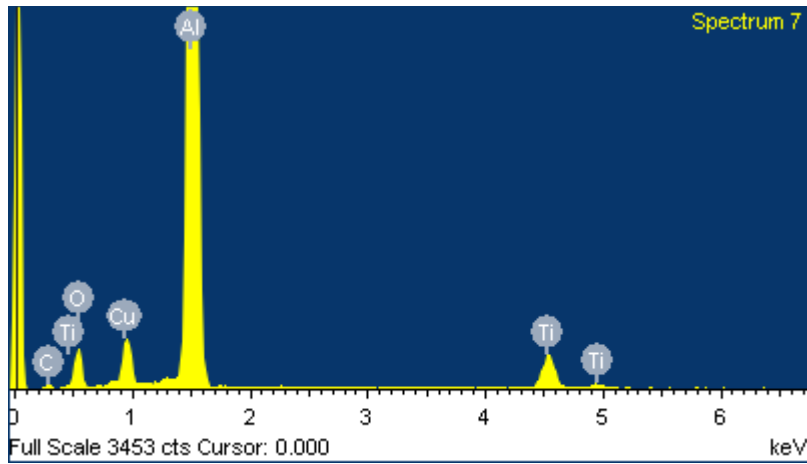
Στοιχειομετρική ανάλυση Al -MgO [δοκ.4], 2^ο Πάσο



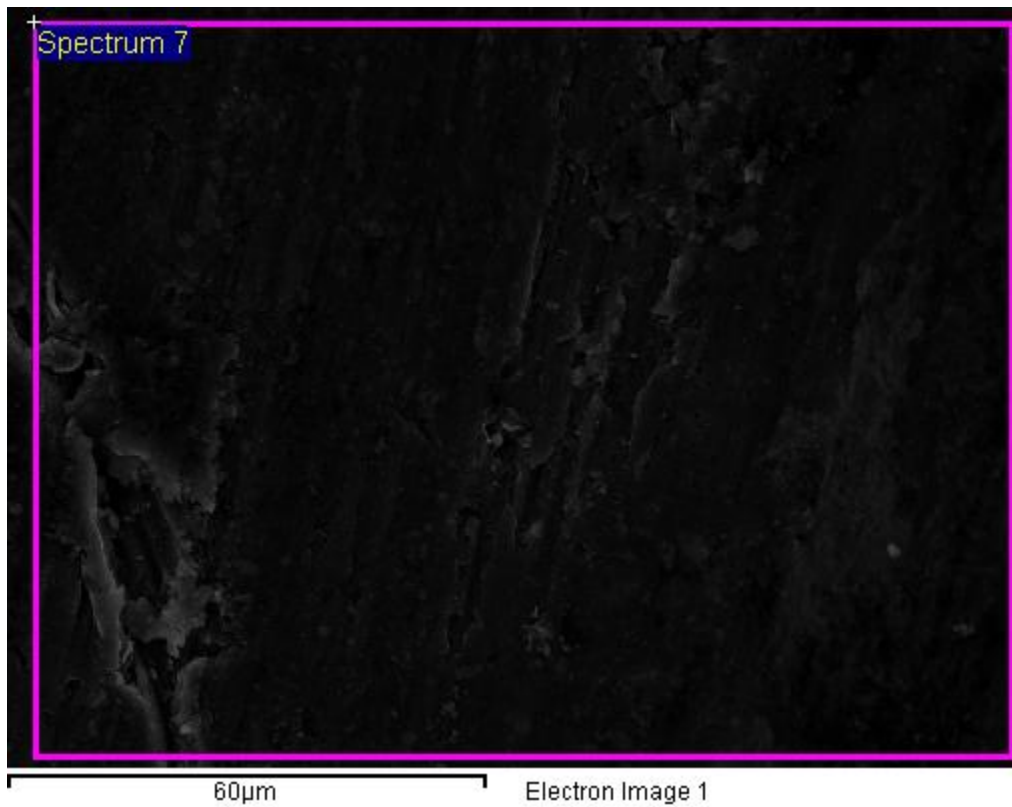
Cu-TiC&Al [δοκ.5], 2^ο Πάσο, X500



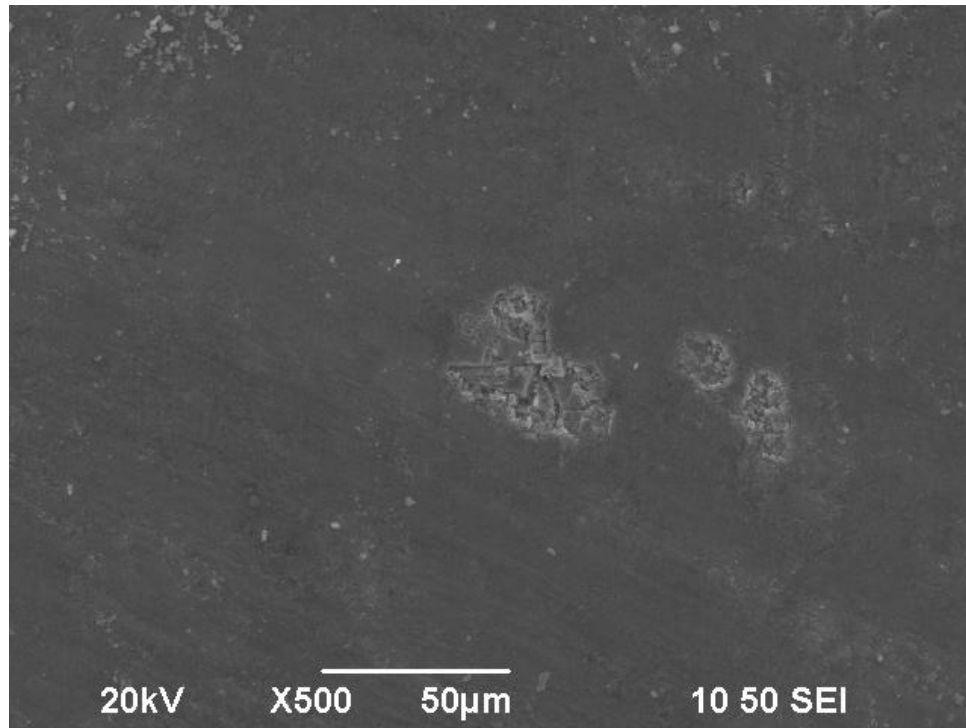
Cu-TiC&Al [δοκ.5], 2^ο Πάσο, X1000



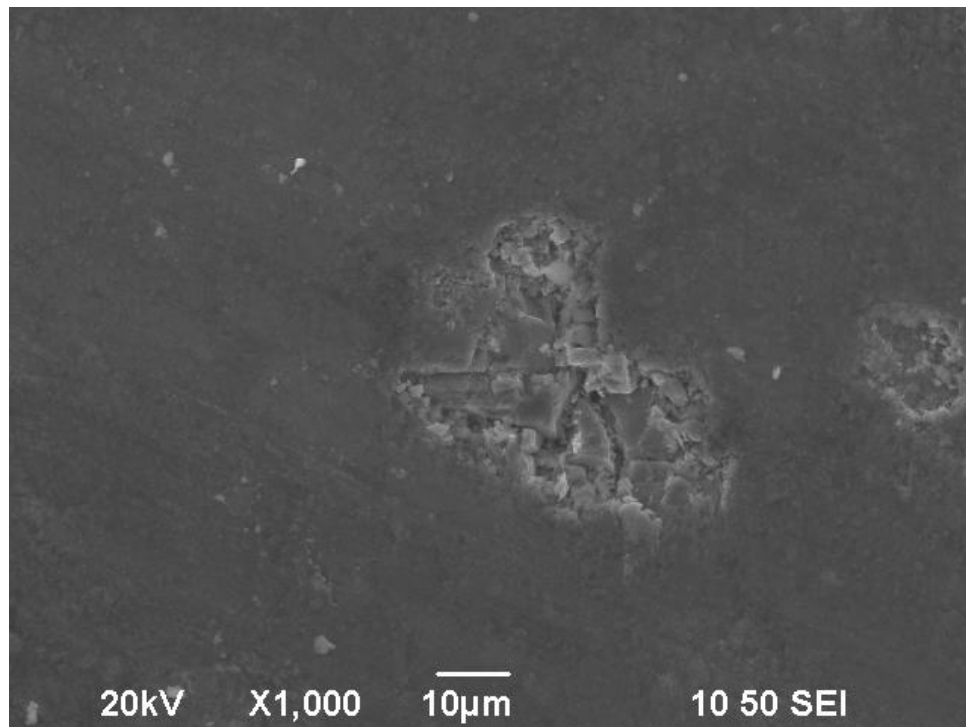
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 5.61 | 11.50 |
| O K | 15.01 | 23.12 |
| Al K | 64.31 | 58.73 |
| Ti K | 6.30 | 3.24 |
| Cu K | 8.77 | 3.40 |



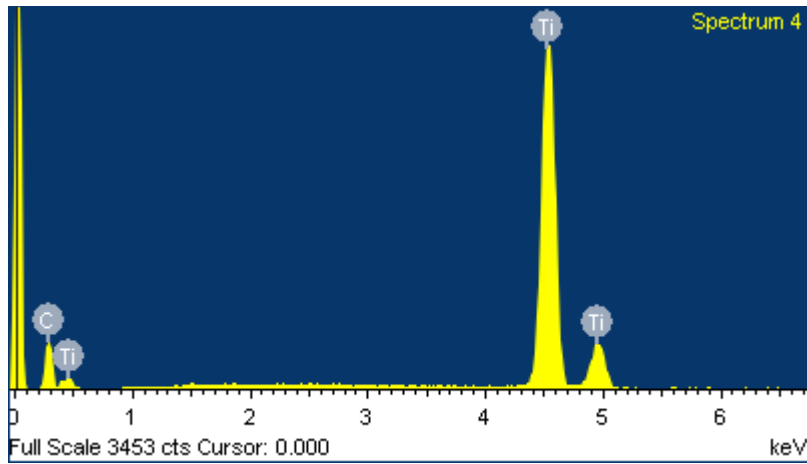
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-TiC&Al [δοκ.5], 2^ο Πάσο



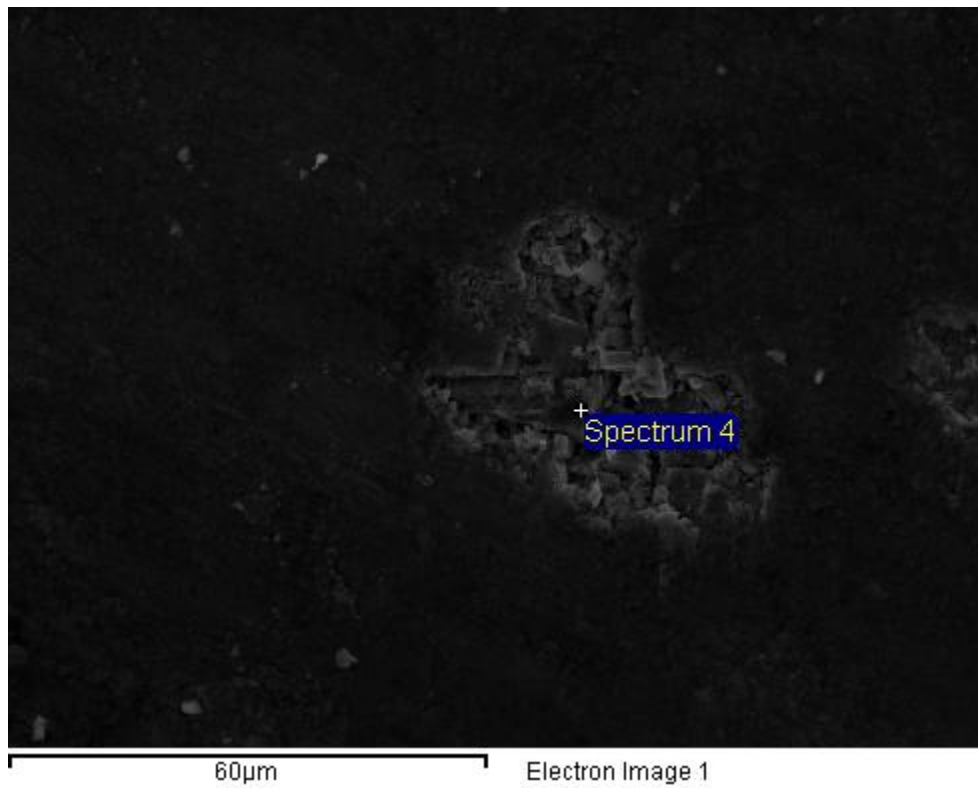
Cu-TiC&Al [δοκ.5], 4^ο Πάσο, X500



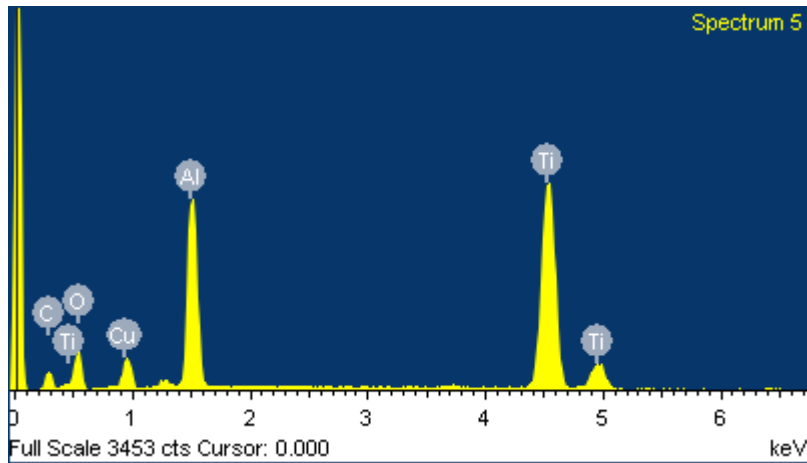
Cu-TiC&Al [δοκ.5], 4^ο Πάσο, X1000



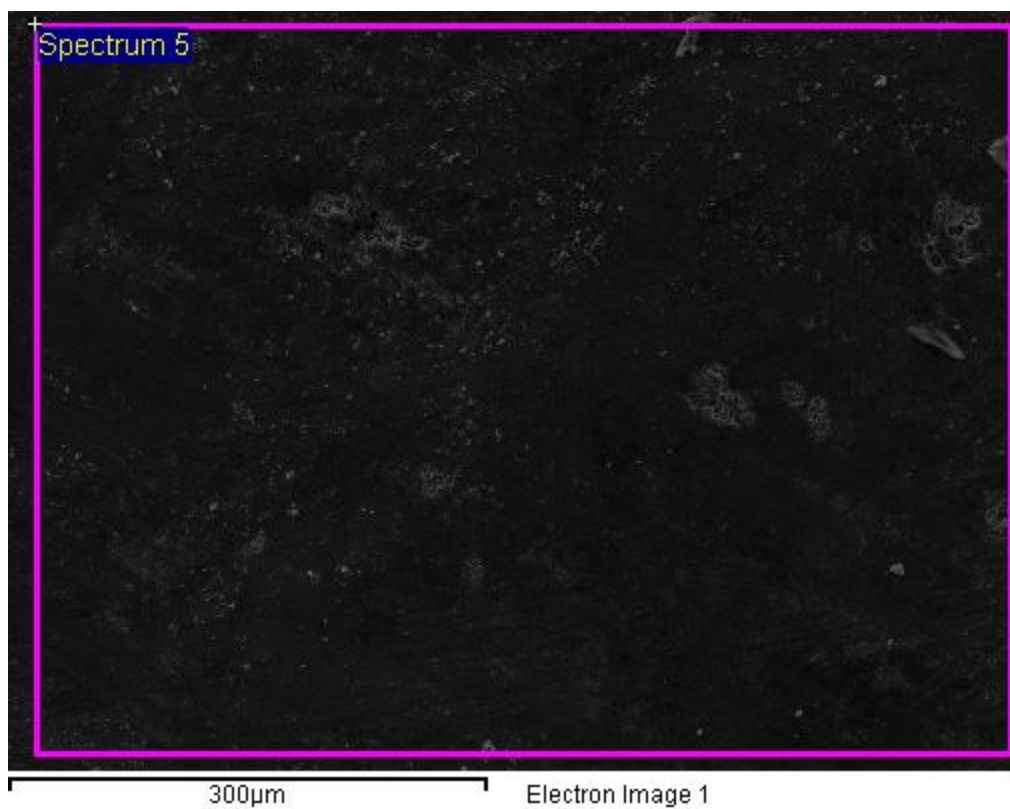
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 19.31 | 48.83 |
| Ti K | 80.69 | 51.17 |



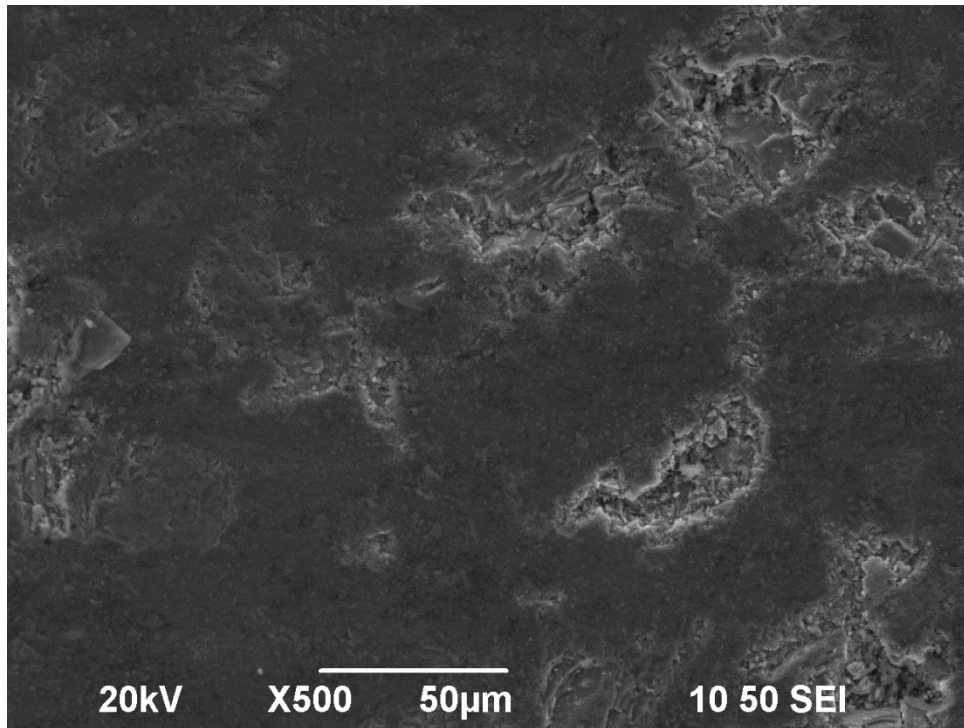
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-TiC&Al [δοκ.5], 4^ο Πάσο, Σημειακό στο TiC



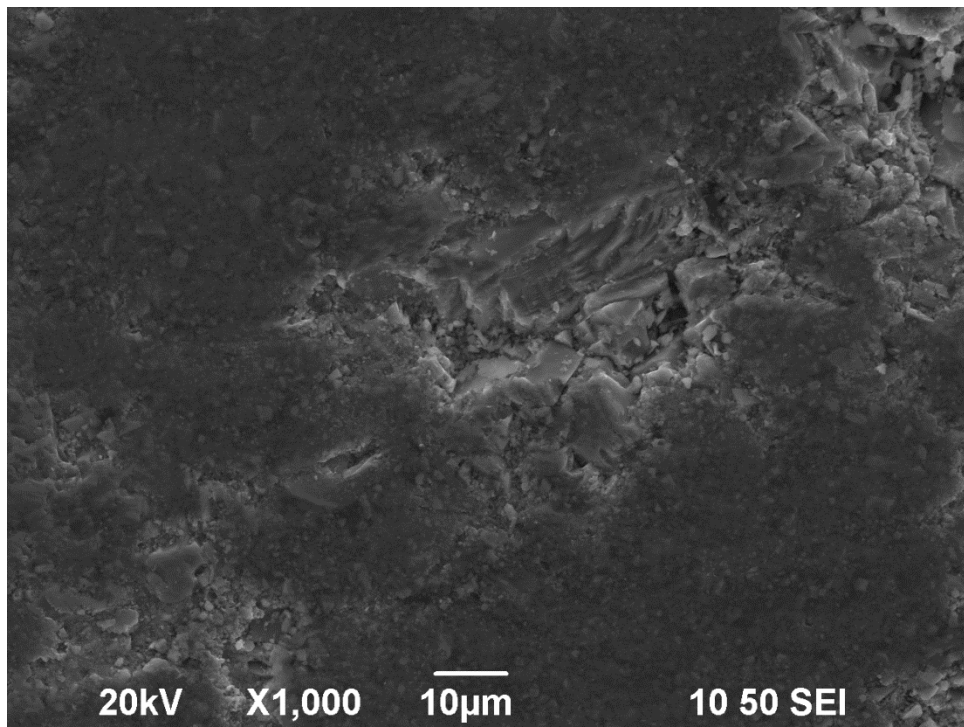
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 10.52 | 21.54 |
| O K | 25.98 | 39.94 |
| Al K | 17.10 | 15.59 |
| Ti K | 39.29 | 20.17 |
| Cu K | 7.11 | 2.75 |



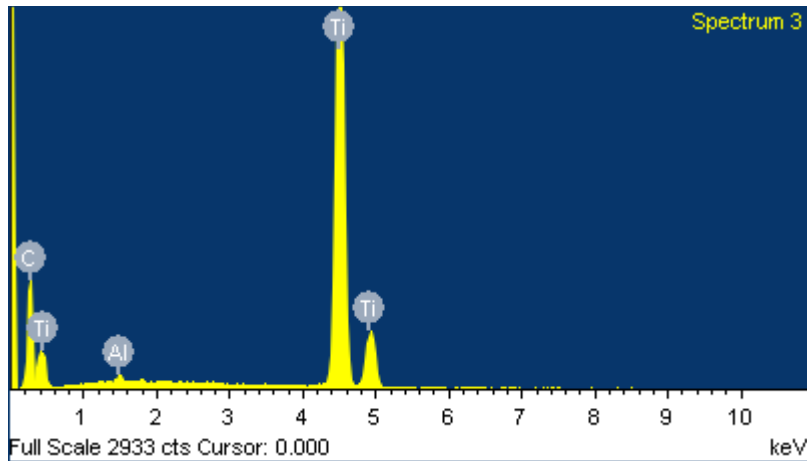
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-TiC&Al [δοκ.5], 4^ο Πάσο, Γενικό



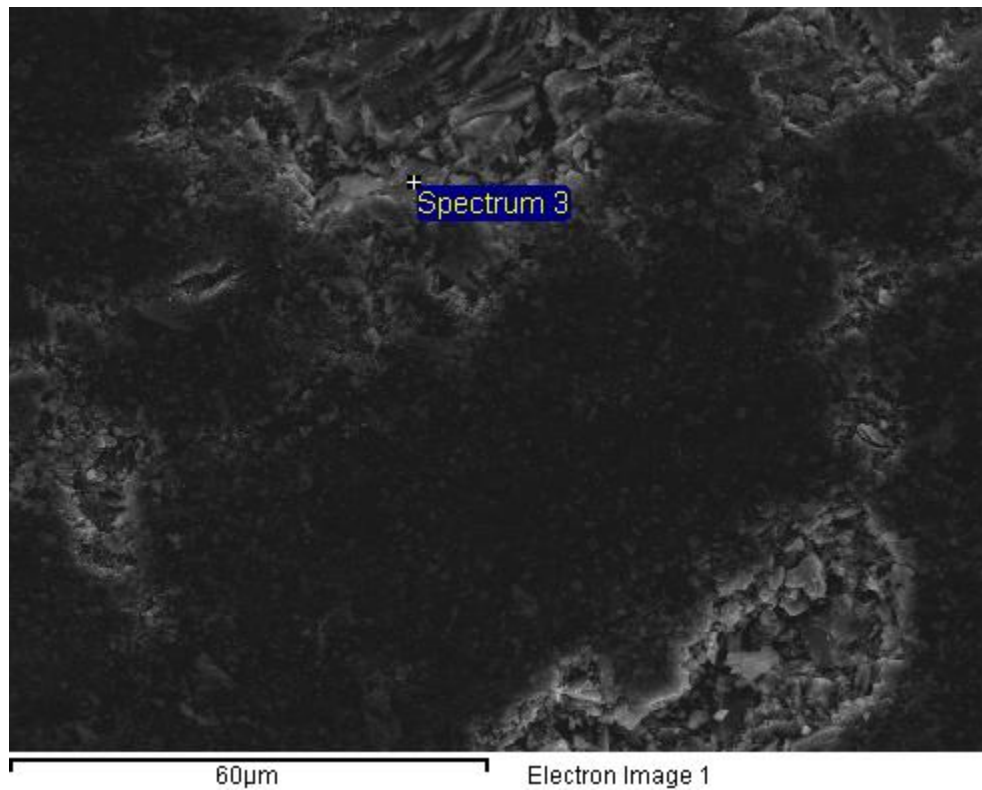
Al(2.5mm)-TiC&Al [δοκ.7], 2° Πάσο, X500



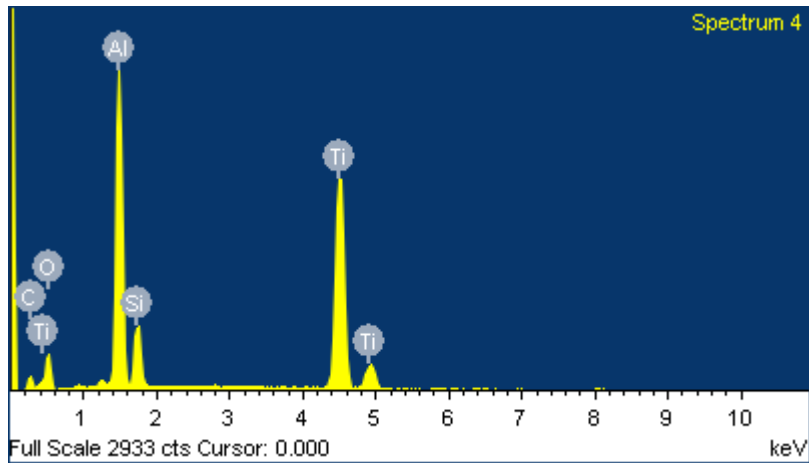
Al(2.5mm)-TiC&Al [δοκ.7], 2° Πάσο, X1000



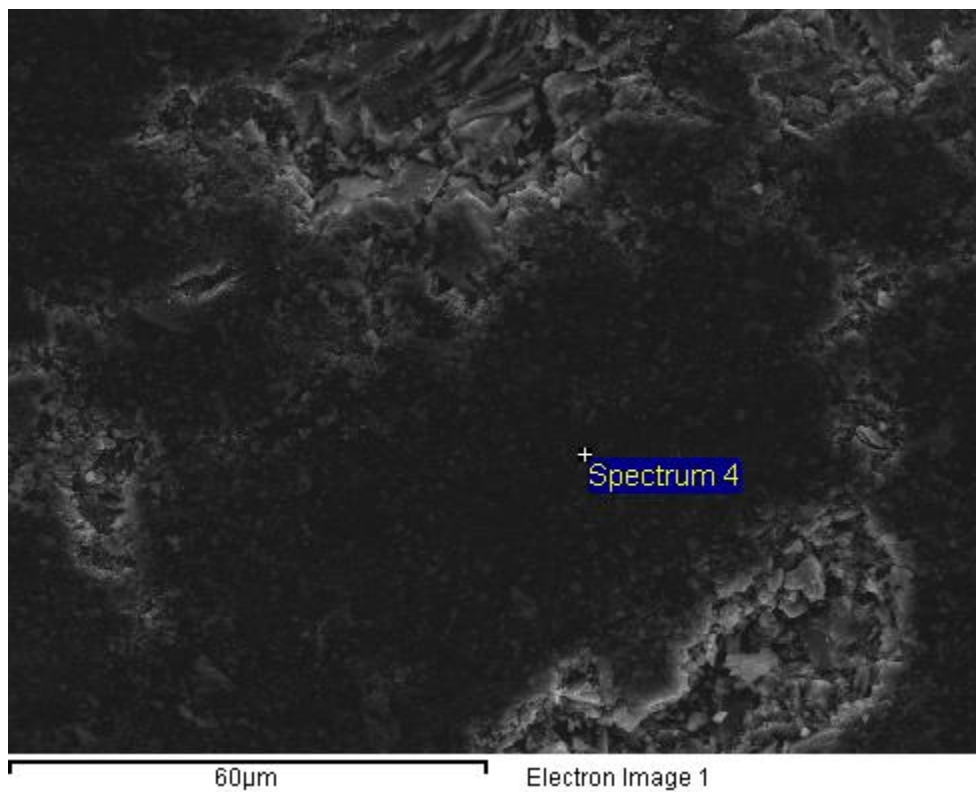
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 29.60 | 62.53 |
| Al K | 0.45 | 0.42 |
| Ti K | 69.95 | 37.05 |



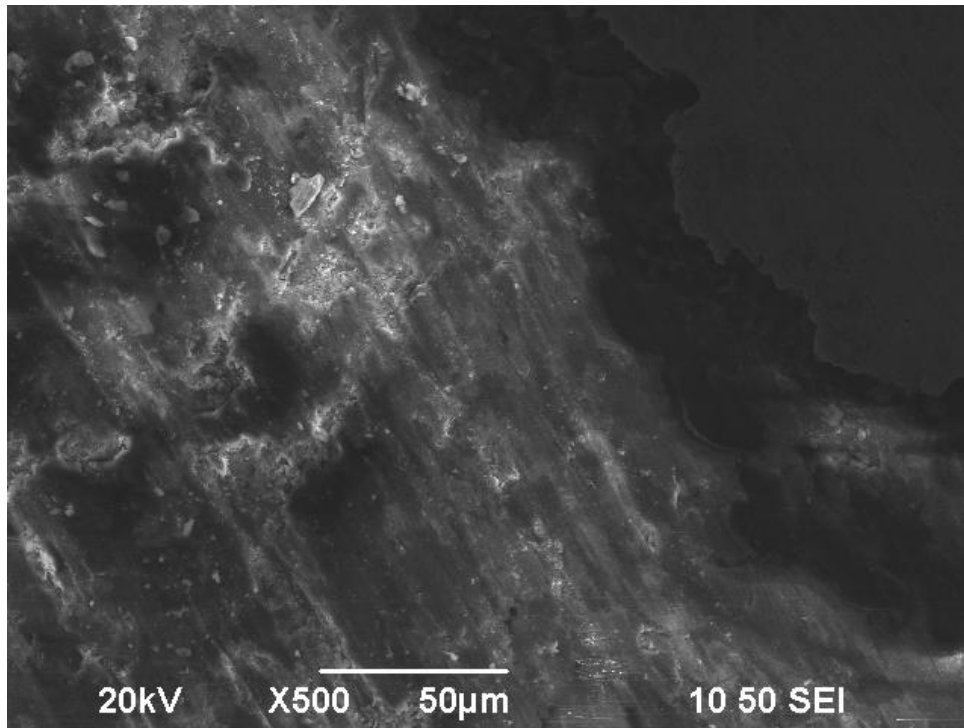
Στοιχειομετρική ανάλυση Al(2.5mm)-TiC&Al [δοκ.7], 2^ο Πάσο, Σημειακό στο TiC



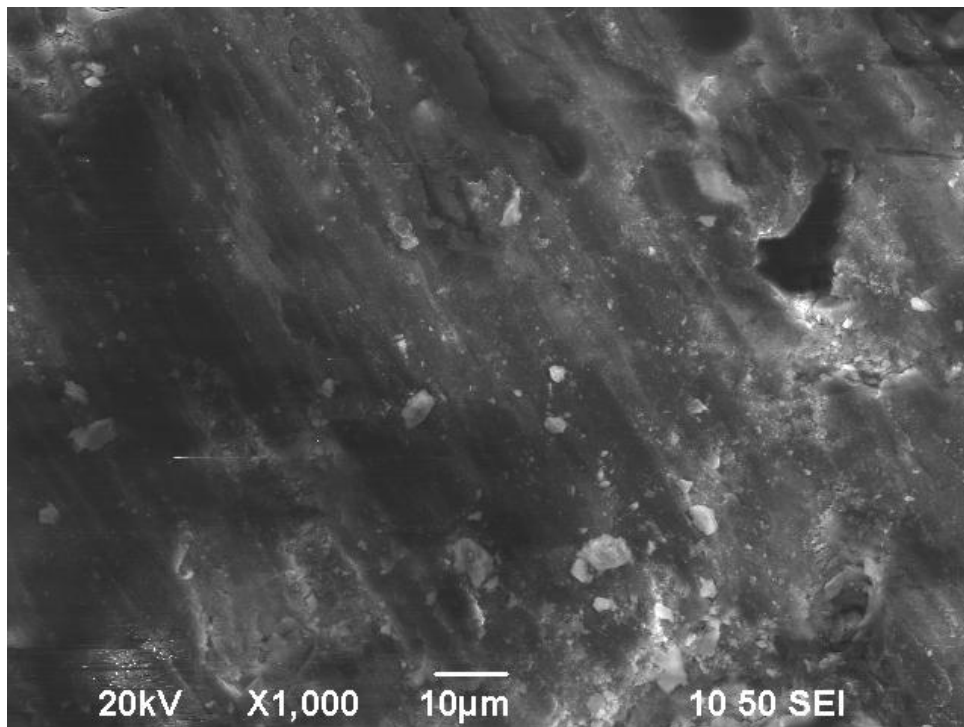
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K | 10.27 | 20.39 |
| O K | 24.34 | 36.27 |
| Al K | 22.75 | 20.11 |
| Si K | 5.72 | 4.86 |
| Ti K | 36.92 | 18.38 |



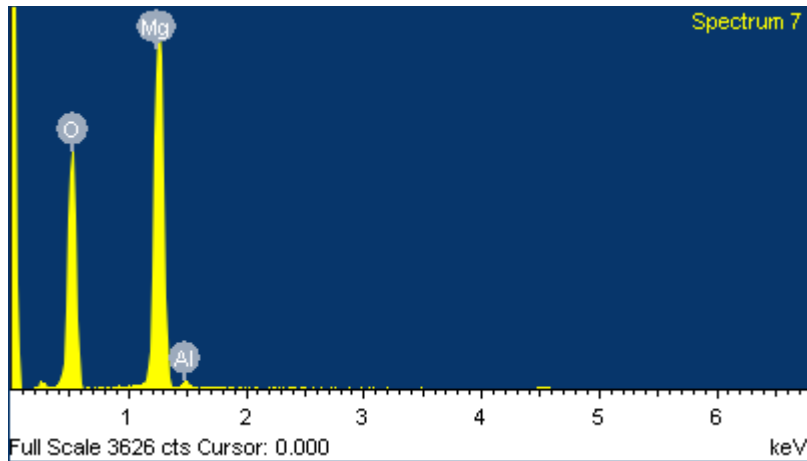
Στοιχειομετρική ανάλυση Al(2.5mm)-TiC&Al [δοκ.7], 2^ο Πάσο, Σημειακό στο Al



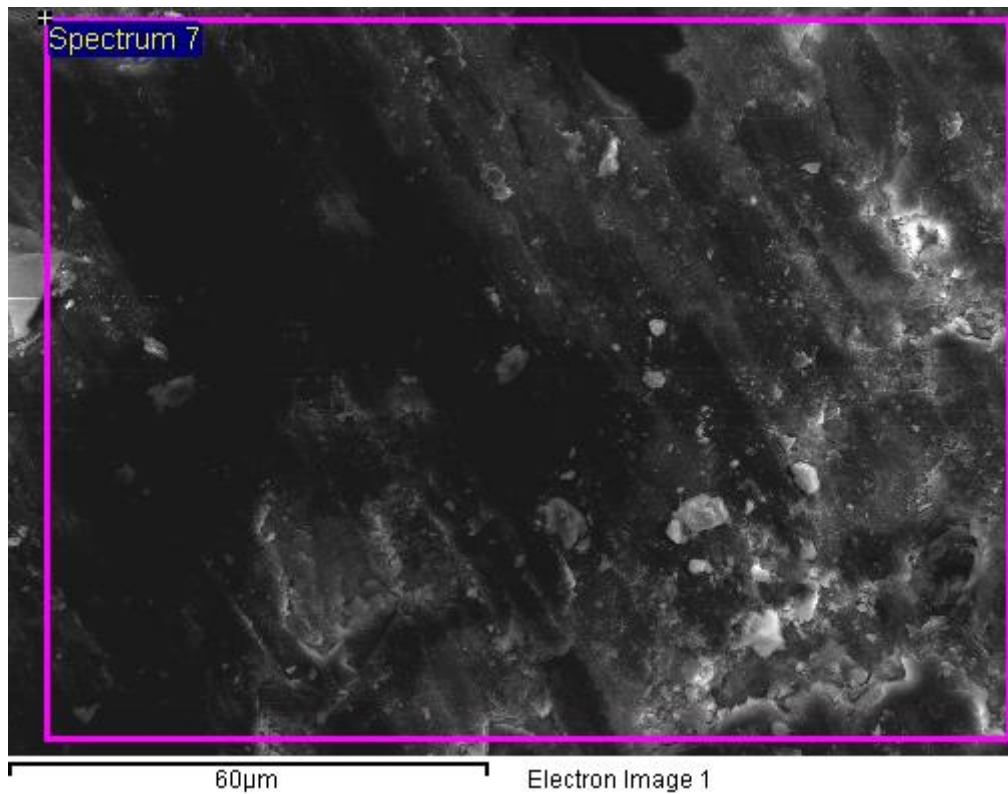
Al(c)- MgO [δοκ.8], 2^ο Πάσο, X500



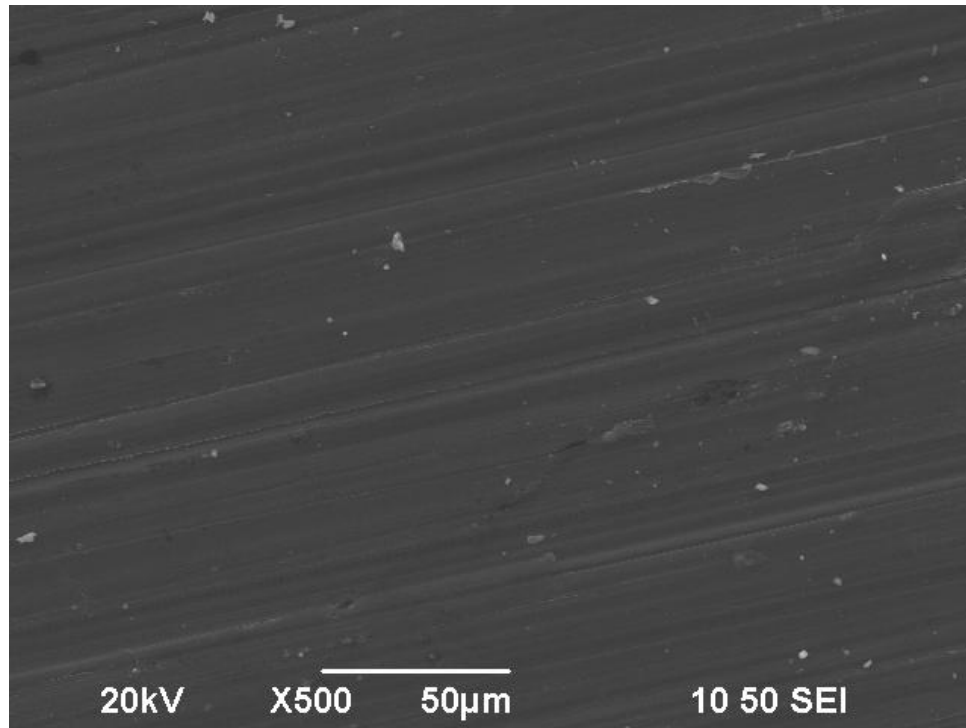
Al(c)-MgO [δοκ.8], 2^ο Πάσο, X1000



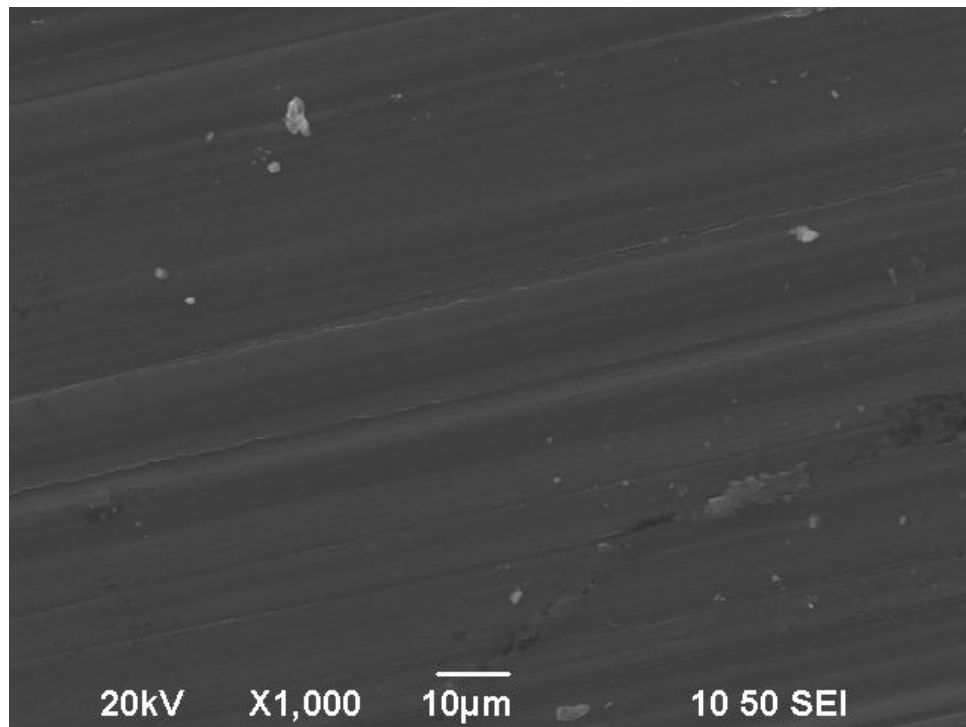
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K | 55.00 | 65.06 |
| Mg K | 43.85 | 34.14 |
| Al K | 1.15 | 0.80 |



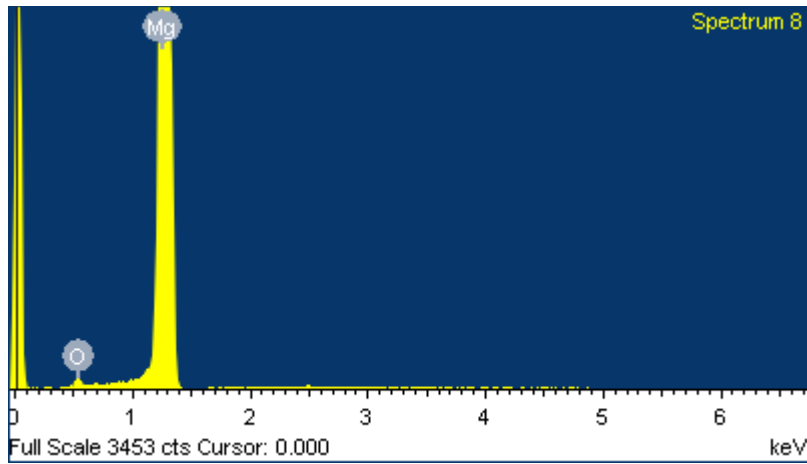
Στοιχειομετρική ανάλυση Al(c)-MgO [δοκ.8], 2^ο Πάσο



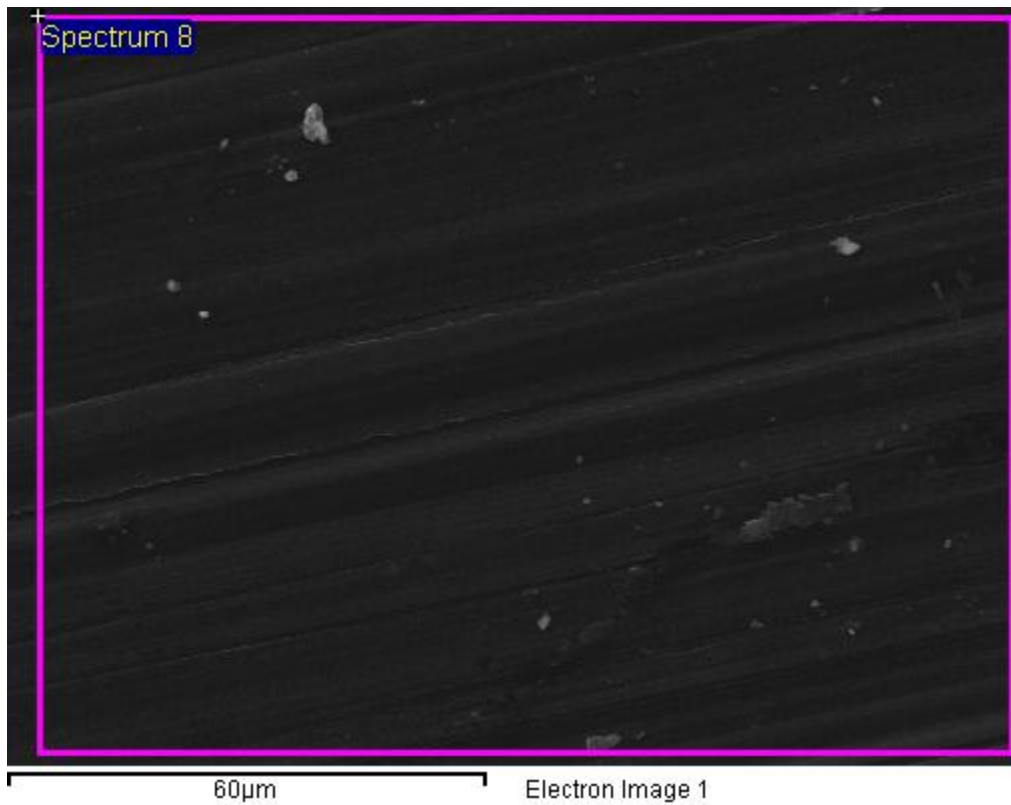
Cu-Mg [δοκ.9], 2^ο Πάσο, X500



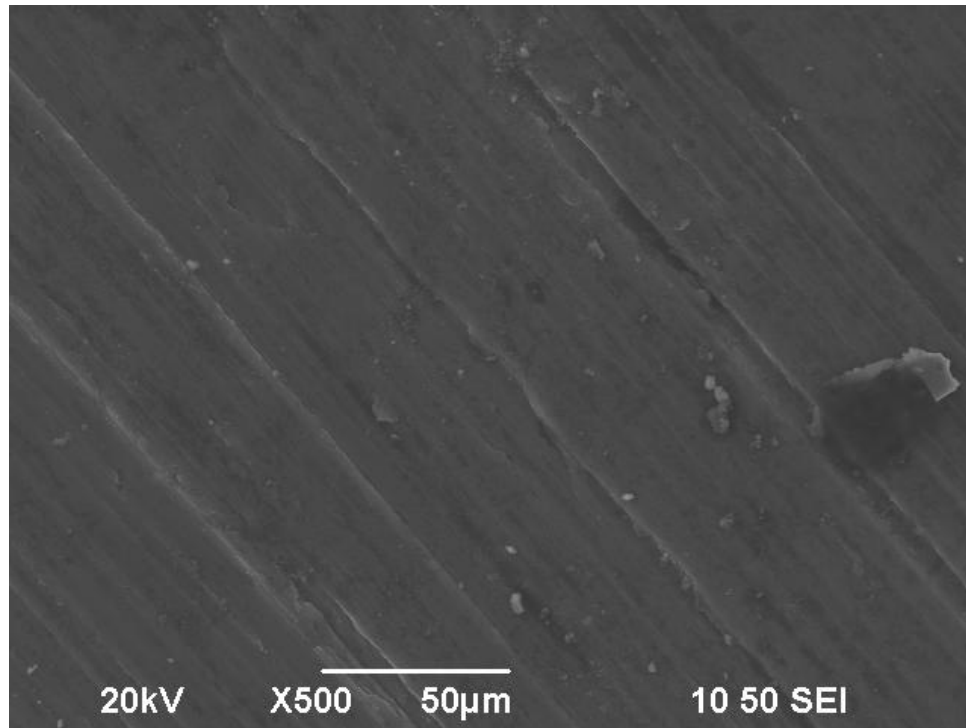
Cu-Mg [δοκ.9], 2^ο Πάσο, X1000



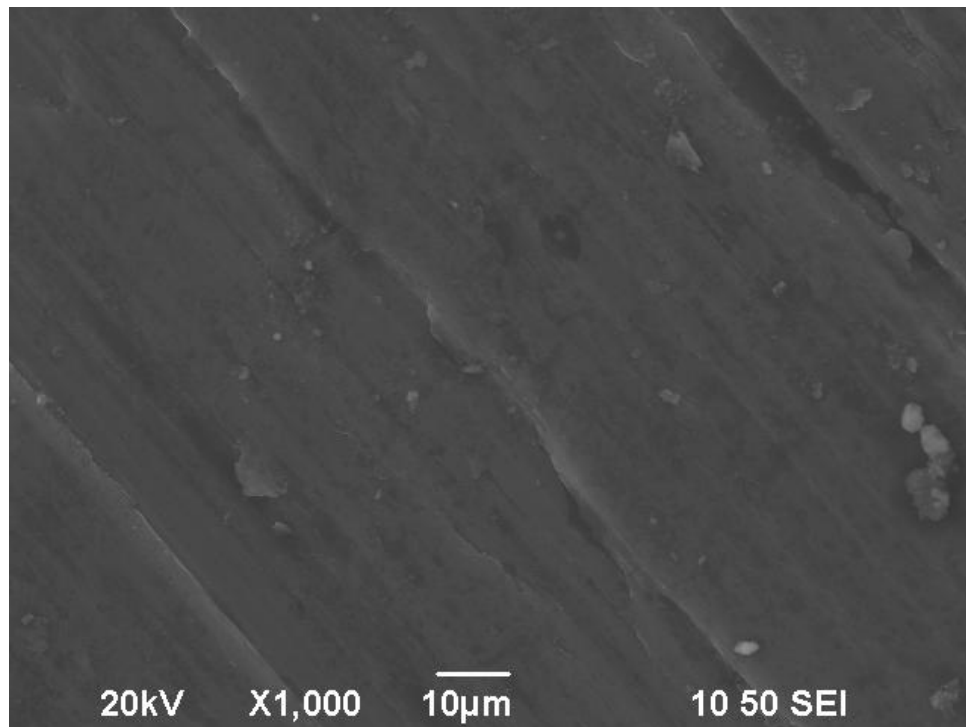
| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K | 2.63 | 3.94 |
| Mg K | 97.37 | 96.06 |



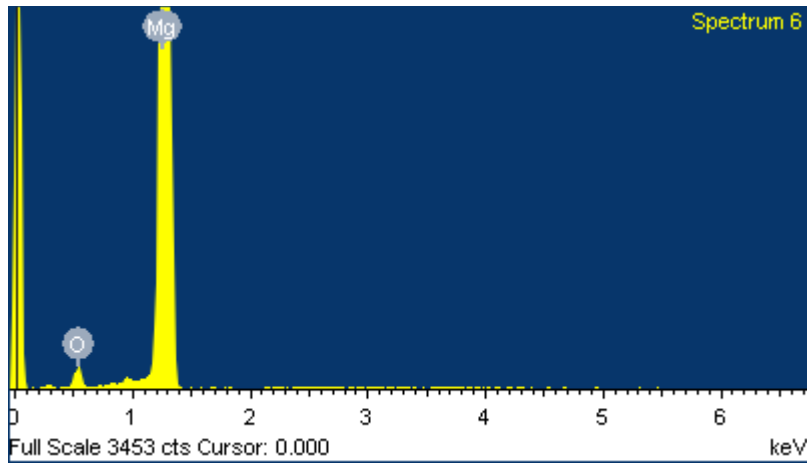
Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-Mg [δοκ.9], 2^ο Πάσο



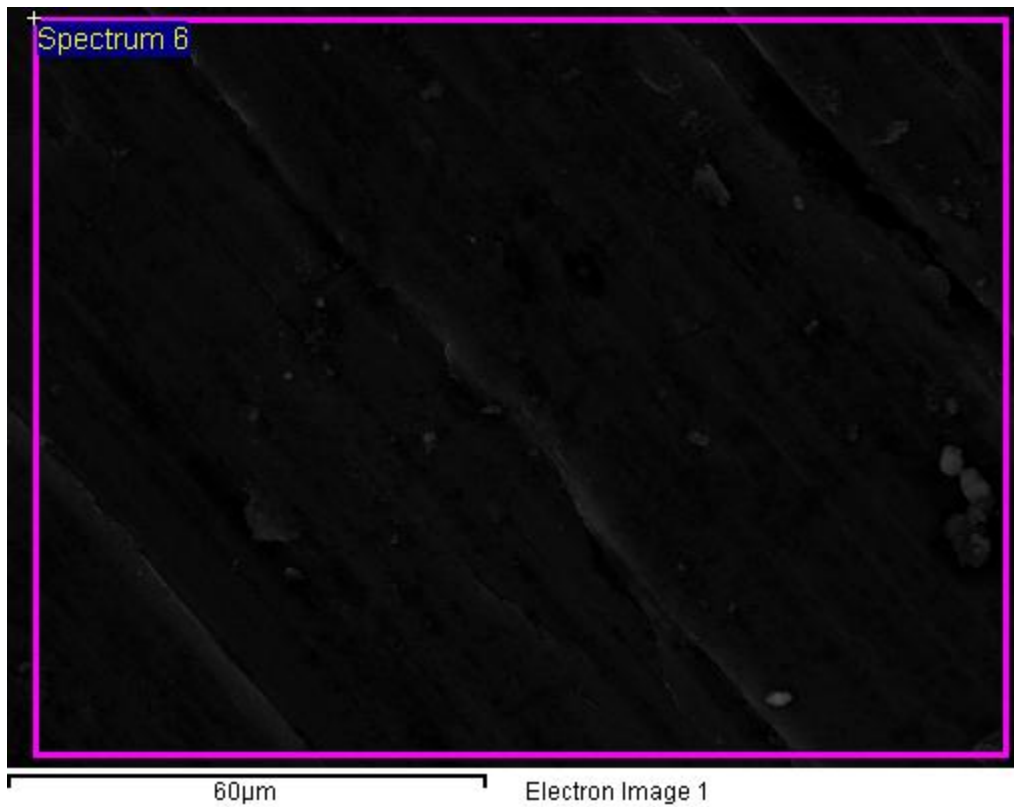
Cu-Mg [δοκ.9], 4^ο Πάσο, X500



Cu-Mg [δοκ.9], 4^ο Πάσο, X1000



| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K | 7.22 | 10.58 |
| Mg K | 92.78 | 89.42 |



Στοιχειομετρική ανάλυση Cu-Mg [δοκ.9], 4^ο Πάσο

Για κάθε σκόνη ξεχωριστά έχουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα από SEM και EDAX:

MgB₂: Η προσβολή με νερό οδήγησε σε διάσπαση των συσσωματωμάτων και παράλληλα σε ομαλοποίηση των κόκκων. Με αύξηση του ποσοστού κατεργασίας επίσης, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση τού μεγέθους των κόκκων. Από το EDAX φαίνεται καθαρά ότι το υλικό οξειδώθηκε πολύ περισσότερο όταν προσβλήθηκε με νερό (το O από 8% ξεπέρασε το 20%). Πάντως η οξείδωση υπάρχει και στο μη προσβεβλημένο, αφού αντιδρά και με τον αέρα, ιδίως στην επιφάνεια όπου αναλύει το EDAX. Ακαθαρσίες τέλος είχαμε ελάχιστες.

MgO: Εδώ οι ακαθαρσίες ήταν ελάχιστες που σχετίζονται με εισχώρηση κόκκων της μήτρας στην σκόνη. Γενικά ήταν πολύ λεπτόκοκκη από την αρχή, οπότε οι μεταβολές ήταν μικρές.

TiCAI: Η επιφάνεια παρουσιάζεται πιο επίπεδη, πιθανόν λόγω της τήξης του αλουμινίου κατά την κοπή. Την ίδια στιγμή (με σημειακή στοιχειακή ανάλυση τού EDAX), βλέπουμε ότι το TiC, ως σκληρότερο, δεν έχει ακαθαρσίες, οι οποίες μαζεύονται όλες στο Al. Οι κόκκοι τού TiC τείνουν επίσης να εισχωρούν μέσα στο μαλακότερο Al.

Mg: Το μόνο που παρατηρείται είναι οξείδωση τού Mg, που είναι και αναμενόμενο καθώς το μαγνήσιο είναι πολύ ενεργό. Η δομή είναι καθαρά πλέον, μετά την κατεργασία, μεταλλική.

Από τις εικόνες στο SEM βλέπουμε γενικά ότι:

- Ανάμεσα στην δομή μετά το 2ο και το 4ο πάσο δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή, με μόνο μια μικρή διαφορά στην κοκκομετρία, αφού για κάθε υλικό, η σύγκριση 2ου με 4ου πάσου δείχνει λίγο πιο λεπτόκοκκο αυτό που έχει κατεργαστεί περισσότερο. Αυτό ήταν και το αναμενόμενο, αφού βάσει της επίδρασης της κατεργασίας σε επίπεδο μικροπλαστικότητας αναμένουμε μικρότερους κόκκους και επομένως μεγαλύτερη σκληρότητα και γενικότερα καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Ενδεικτικά, το μέγεθος των κόκκων για τα περισσότερα κατεργασμένα δείγματα έχει εύρος από 5μm έως 10μm, ενώ για τα άλλα παρατηρούμε εύρος 10-30μm.
- Οι ακανόνιστοι γεωμετρικά κόκκοι ανήκουν πάντα στο σκληρότερο υλικό, για το MgB₂ το Βόριο και για το μείγμα TiC&Al το TiC (φαίνεται σαν να σχίσουν το άλλο υλικό που λιώνει και σε μικρότερη θερμοκρασία). Αποτέλεσμα αυτού είναι το σκληρότερο υλικό να παραλαμβάνει τα φορτία της έλασης. Την ίδια στιγμή, οι ακαθαρσίες μαζεύονται λόγω διάχυσης στο μαλακότερο υλικό.
- Οι ομοιόμορφοι κόκκοι παρατηρήθηκαν καλύτερα στο πλήρως κατεργασμένο κομμάτι (4^ο πάσο) και κυρίως στην εξωτερική του επιφάνεια. Αυτό οφείλεται ότι κατά

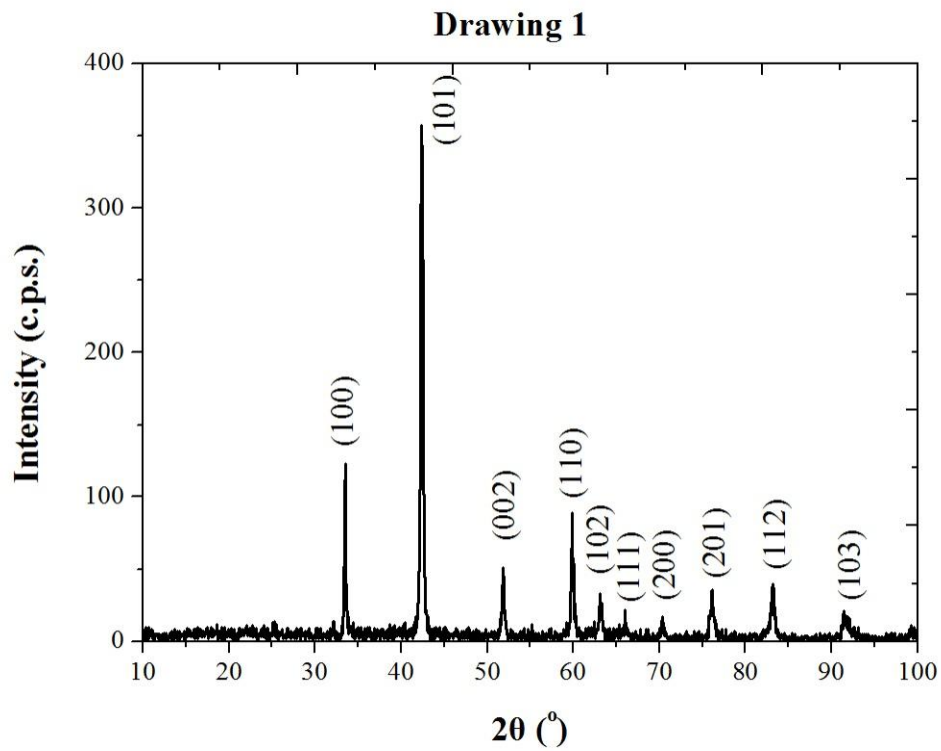
την έλαση, η δύναμη δεν διαχέεται ομοιόμορφα στο εσωτερικό του τεμαχίου αλλά μεγαλύτερες παραμορφώσεις δέχεται η περιφέρειά του (για μικρές σχετικά μειώσεις διατομής, στις μεγάλες το εσωτερικό ενδέχεται να καταπονείται περισσότερο). Επομένως η αυξημένη θερμοκρασία και τάση οδήγησε σε καλύτερη κοκκομετρία.

6.3.3. Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ (XRD)

Τα δείγματα τού MgB_2 εξετάστηκαν με περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (X-rays diffraction). Σκοπός ήταν να βρεθεί κατά πόσο η κατεργασία άλλαξε τα κρυσταλλικά επίπεδα του υλικού και σε ποιο βαθμό το δείγμα που ήρθε σε επαφή με το νερό απέκτησε λιγότερο κρυσταλλικό χαρακτήρα.

Για τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο τύπου Bruker D-8 Focus, στην σχολή Μεταλλειολόγων Μηχανικών υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Θ. Περράκη. Οι συνθήκες λειτουργίας ήταν οι εξής: ακτινοβολία $CuK\alpha$, ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$), φίλτρο Ni, ένταση 30 mA, τάση 40 Kv και ταχύτητα γωνιόμετρου $1^\circ/\text{min}$. Η ταυτοποίηση των φάσεων έγινε με βάση τις χαρακτηριστικές τους ανακλάσεις. Η εξέταση με περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ έγινε σε κονιοποιημένο δείγμα, κοκκομετρίας μικρότερης των 50 μm .

Ακολουθεί ένα τυπικό διάγραμμα XRD τού MgB_2 (σχ. 6.16), το οποίο θα μας διευκολύνει να αναγνωρίσουμε τα κρυσταλλικά επίπεδα (ανάλογα με την ένταση, πχ το 101 είναι για $d=2,12\text{ \AA}$):

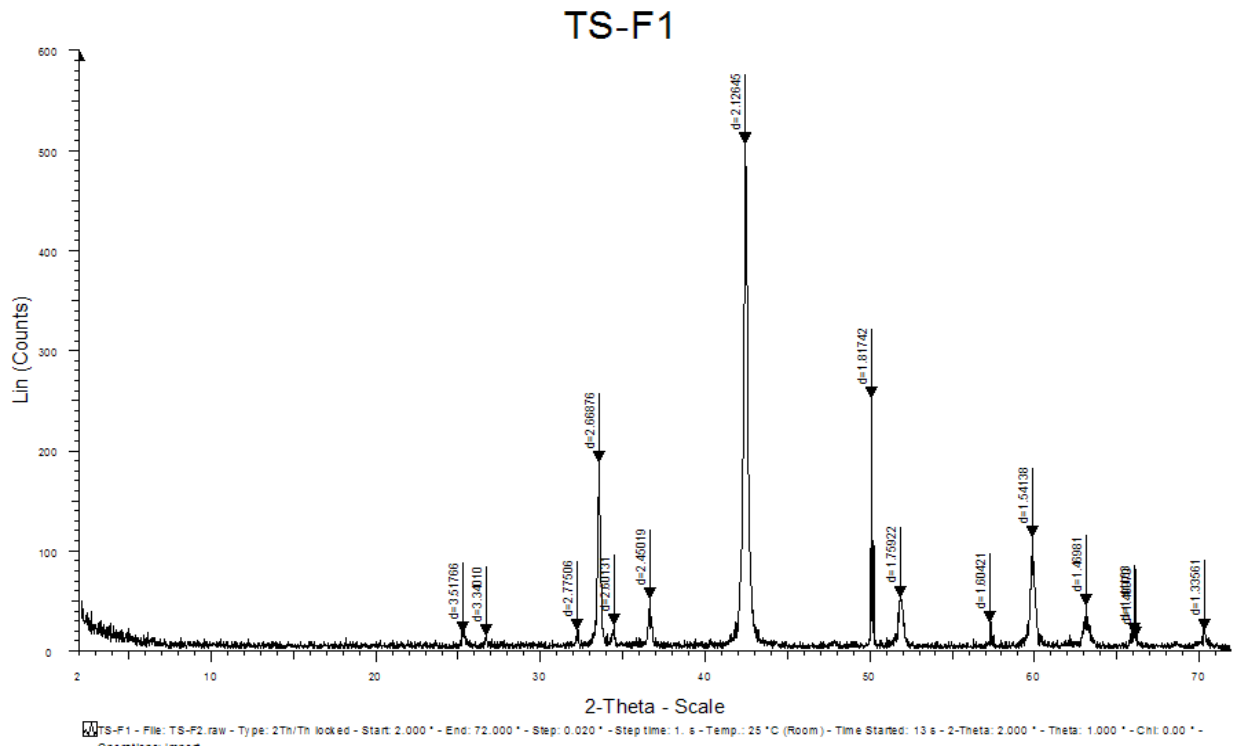


Σχ. 6.16: Τυπικά επίπεδα κρυστάλλωσης MgB_2 .

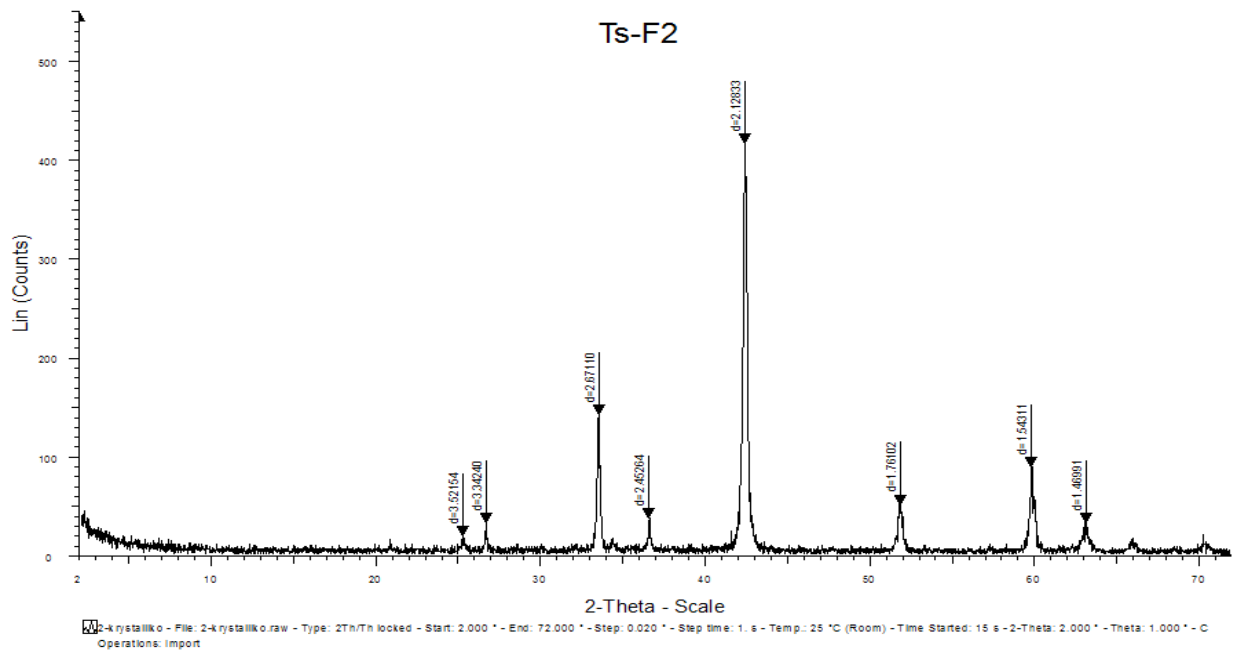
Τα τρία (3) δείγματα που μελετήθηκαν ήταν:

- 1) Σκόνη MgB_2 ακατέργαστη
- 2) Σκόνη MgB_2 μετά το πέρας της κατεργασίας
- 3) Σκόνη MgB_2 μετά το πέρας της κατεργασίας και αφού έχει έρθει σε επαφή με νερό.

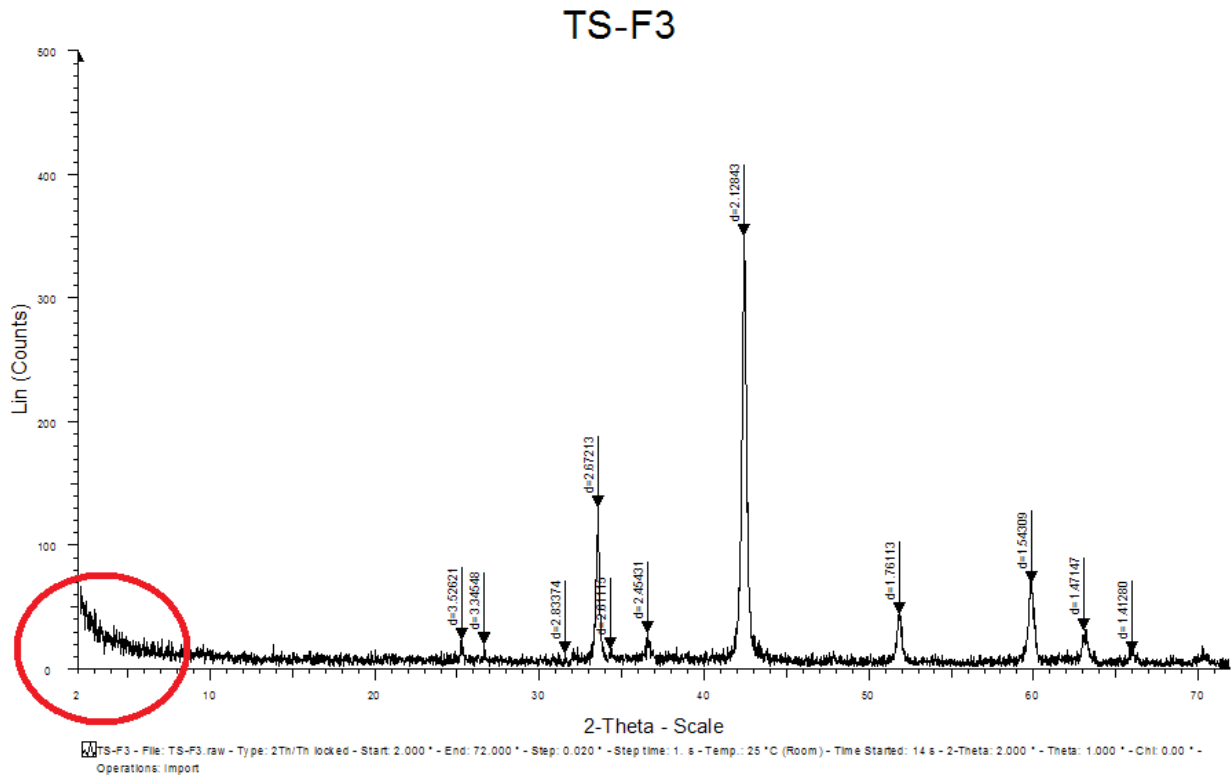
Τα αποτελέσματα φαίνονται αντίστοιχα παρακάτω:



Σχ. 6.17: Διάγραμμα XRD για ακατέργαστη σκόνη MgB₂.



Σχ. 6.18: Διάγραμμα XRD για κατεργασμένη (έλαση μορφής) σκόνη MgB₂.



Σχ. 6.19: Διάγραμμα XRD για κατεργασμένη σκόνη MgB_2 , μετά από επαφή με νερό.

Από ό,τι βλέπουμε, τα δείγματα παρουσιάζουν μικρές διαφορές, βάσει της κατεργασίας και βάσει της κρυσταλλικότητας.

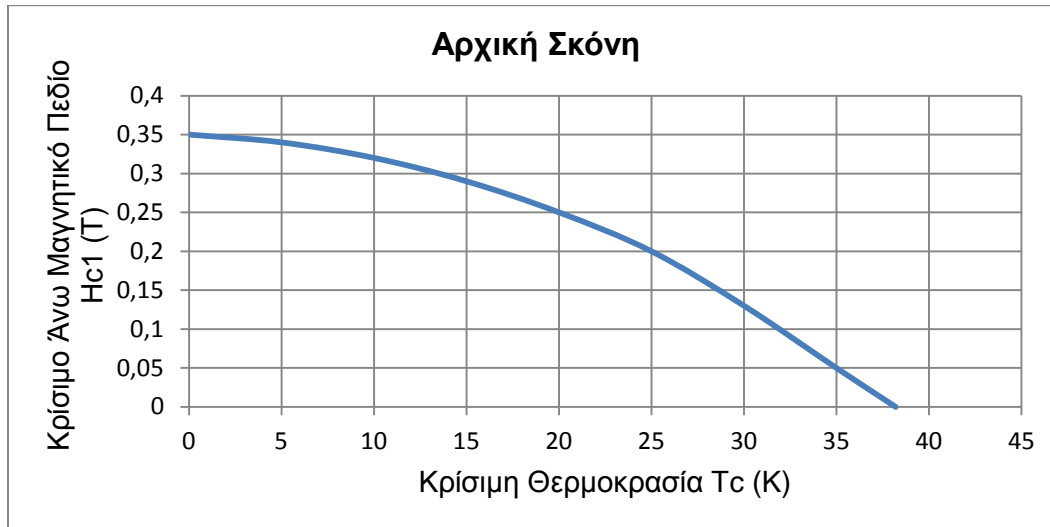
Λόγω της κατεργασίας έχουμε μείωση της έντασης των επιπέδων (101) και (100) μεταξύ των διαγραμμάτων 1 και 2-3, προφανώς από την συμπίεση όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία.

Η καμπύλη που είναι στην αρχή των αξόνων (κόκκινος κύκλος στο 3^ο διάγραμμα), μας δείχνει ότι το υλικό είναι λιγότερο κρυσταλλικό από τα άλλα 2 (μεγαλύτερη κλίση και επιφάνεια), πράγμα αναμενόμενο αλλά σε μεγαλύτερο ίσως βαθμό. Το 3ο δείγμα είχε προσβληθεί από νερό, το οποίο βάσει της θεωρίας (ενότητα 4.3) κάνει το MgB_2 λιγότερο κρυσταλλικό. Αναμέναμε ίσως αυτό να φαινόταν περισσότερο, όμως το δείγμα δεν εμβαπτίστηκε πλήρως σε νερό, μόνο επιφανειακά και όσο εισχώρησε, ενώ μεγάλο μέρος από αυτό χάθηκε κατά την μικρή έκρηξη που ακολούθησε λίγα λεπτά μετά. Επομένως είναι λογικό να φαίνεται, λίγο μόνο, λιγότερο κρυσταλλικό.

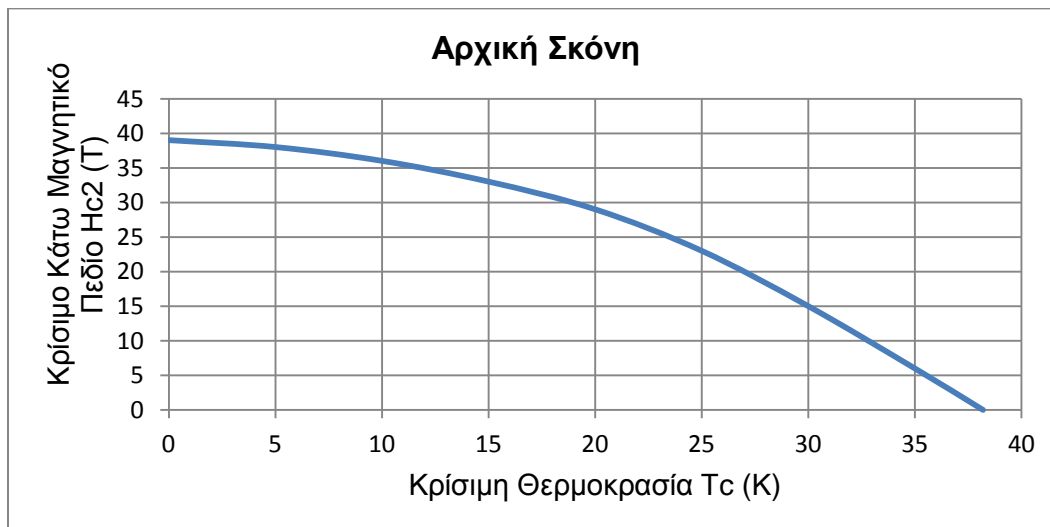
6.3.4. Υπεραγώγιμες Μετρήσεις

Τα δείγματα που μελετήθηκαν ήταν ακατέργαστη σκόνη και σκόνη κατεργασμένη (χωρίς προσβολή νερού). Όπως είπαμε και στον σχεδιασμό των πειραμάτων, η κατεργασμένες σκόνης ελήφθησαν μετά το 2^ο και το 3^ο πάσο και προέρχονται από το δείγμα Cu-MgB₂.

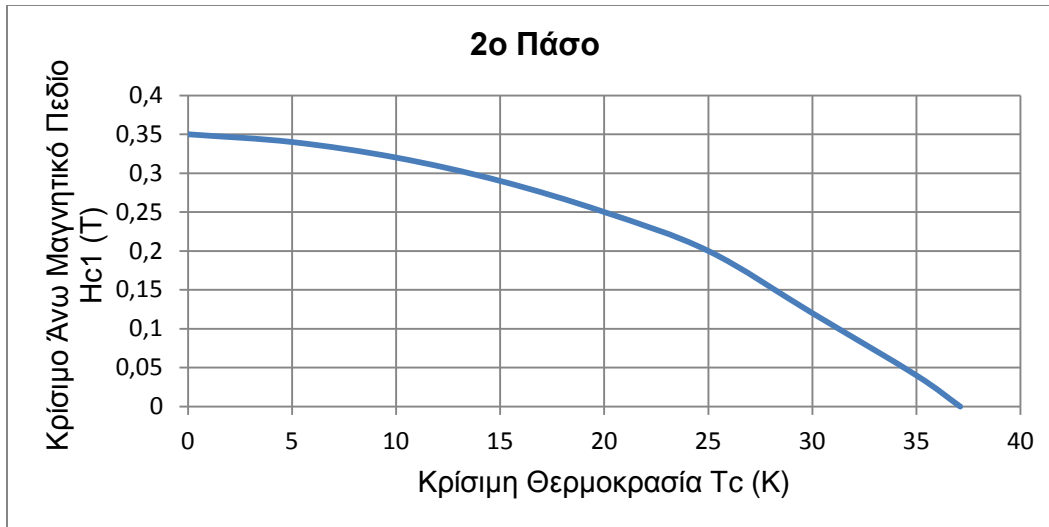
Οι μετρήσεις που έγιναν για την κρίσιμη θερμοκρασία και το κρίσιμο μαγνητικό πεδίο (άνω και κάτω) δίνουν τα παρακάτω διαγράμματα:



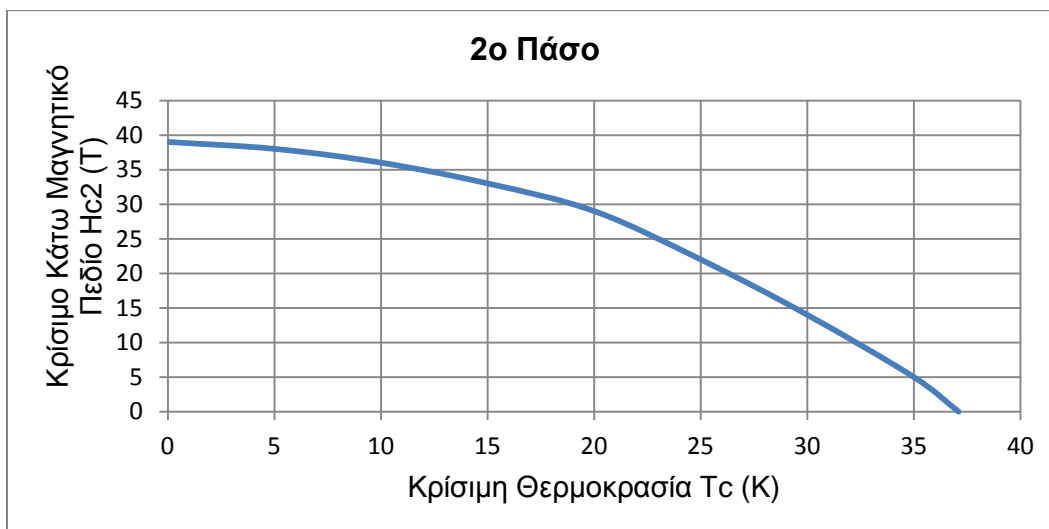
Σχ. 6.20: Διάγραμμα υπεραγωγίων μετρήσεων, Hc1-Tc, για την ακατέργαστη σκόνη MgB₂.



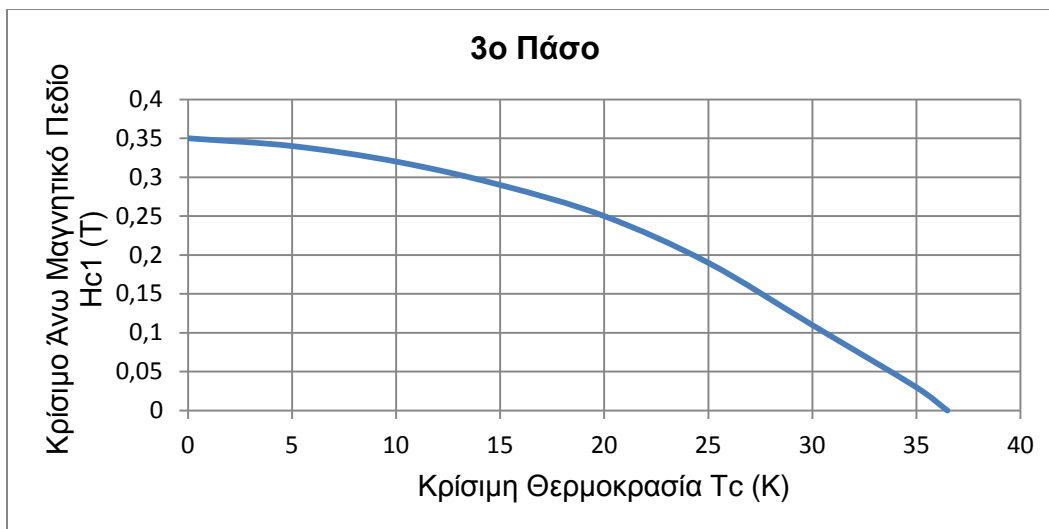
Σχήμα 6.21: Διάγραμμα υπεραγωγίων μετρήσεων, Hc2-Tc, για την ακατέργαστη σκόνη MgB₂.



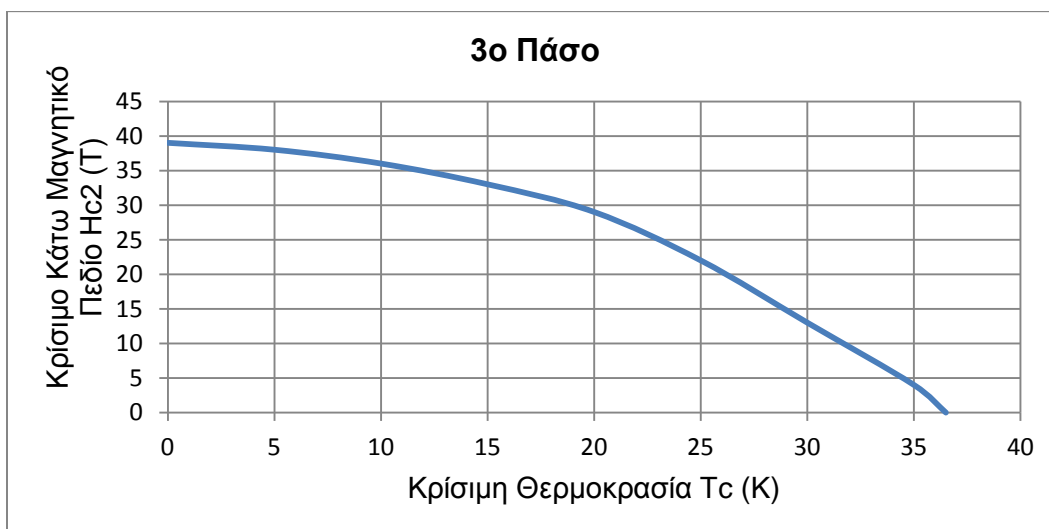
Σχ. 6.22: Διάγραμμα υπεραγώγιμων μετρήσεων, H_{c1}-T_c, για την σκόνη MgB₂ μετά το 2ο πάσο.



Σχ. 6.23: Διάγραμμα υπεραγώγιμων μετρήσεων, H_{c2}-T_c, για την σκόνη MgB₂ μετά το 2ο πάσο.



Σχ. 6.24: Διάγραμμα υπεραγώγιμων μετρήσεων, H_{c1} - T_c , για την σκόνη MgB_2 μετά το 3ο πάσο.



Σχ. 6.25: Διάγραμμα υπεραγώγιμων μετρήσεων, H_{c2} - T_c , για την σκόνη MgB_2 μετά το 3ο πάσο.

Βλέπουμε ότι η κρίσιμη θερμοκρασία μειώνεται αρκετά, ενώ το μαγνητικό πεδίο ελάχιστα, όσο περισσότερο κατεργαζόμαστε το τεμάχιο. Παράλληλα, η μορφή της καμπύλης δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου ενώ συγχρόνως είναι ίδιας μορφής με αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία για το MgB_2 . Συνοπτικά, για την κρίσιμη θερμοκρασία συναρτήσε της κατεργασίας, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Σχ. 6.26: Διάγραμμα μεταβολής της Tc για την σκόνη MgB₂, κατά την όλη κατεργασία.

Επομένως, υπάρχει μείωση της Tc, από 38,2K αρχικά, στους 37,1K και 36,5K μετά το 2^ο και το 3^ο πάσο αντίστοιχα. Παρ' όλα αυτά, η μείωση δεν είναι σημαντική καθώς θα θέλαμε την ίδια διάταξη για ψύξη του υπεραγωγού στους 38K και στους 36K, με λίγο περισσότερη δαπανούμενη ενέργεια.

7. Τελικά Συμπεράσματα

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

Η επιλογή των υλικών φάνηκε ορθή, γιατί ακόμα και όταν έσπασαν τα δοκίμια με την μεταλλική μήτρα αλουμινίου, δοκιμάστηκαν ακόμα 2 περιπτώσεις αλουμινίου (παχύτερο τοίχωμα ή πιο μαλακό) που κατέληξαν σε παρεμφερή αποτελέσματα. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο χαλκός 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 σε γενικές γραμμές για τον χαλκό καλές, παρ' όλο που δεν χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις που υπάρχουν στην βιομηχανία.

Η μοντελοποίηση παρουσίασε ίσως τα περισσότερα προβλήματα, καθώς γεωμετρικές ατέλειες, ασυνέχειες του υλικού, ανισοτροπικότητα κ.ά. που υπήρχαν κατά την κατεργασία δεν γινόταν να ληφθούν υπόψιν στο μοντέλο, οπότε η όλη μοντελοποίηση βασίζεται σε ονομαστικές διαστάσεις, ιδανική γεωμετρία και ιδανικά υλικά. Το μοντέλο προσομοίωσης θα μπορούσε να εξετασθεί στο μέλλον σε περισσότερες δοκιμές για να φανεί κατά πόσο είναι αξιόπιστο.

Μετάπειτα, 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.

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. 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. Ι. Σιμπιζή, Βασικές Εργαστηριακές Ασκήσεις Υλικών, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2009
10. Δ. Τσακίρη, Κατεργασίες κράματος αλουμινίου με Laser, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
11. Αλ. Αθανασίου-Ιωάννου, Μορφοποίηση του υπεραγωγού MgB_2 με τη μέθοδο PIT και χαρακτηρισμός του, ΕΜΠ, Αθήνα 2010
12. Α. Κανάραχος, Χρ. Προβατιδής, Πεπερασμένα στοιχεία στη μηχανολογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2000
13. Α. Κοντόπουλος, Εισαγωγή στα πυρίμαχα υλικά, Επιστημονικές εκδόσεις ΕΜΠ, 1983

Ξένα

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. G. E. Totten, D. S. MacKenzie, Handbook of Aluminium Volume 1: Physical Metallurgy and Processes
21. K. U. Kainer, Magnesium - Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications
22. 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
23. F. Czerwinski, Magnesium Injection Molding, Magnesium and Its Alloys, Springer, 2008
24. T. Nukami & M. C. Flemings, In Situ Synthesis of TiC, Particulate-Reinforced Aluminum Matrix Composites, Metallurgical and Materials Transactions, Volume 26A, 1995
25. D. G. Hinks, J. D. Jorgensen, H. Zheng, S. Short, Synthesis and stoichiometry of MgB_2 , Materials Science Division, Argonne National Laboratory

26. S. Zhou, A. V. Pan, H. Liu, S. Dou, Single- and multi-filamentary Fe-sheathed MgB₂ wires, Elsevier, 2002
27. 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
28. 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 MgB₂ superconductor, Elsevier, 2001
29. A. G. Mamalis , D. E. Manolacos, M. B. Ioannidis, P. K. Kostazos, Crushing of hybrid square sandwich composite vehicle hollow bodyshells with reinforced core subjected to axial loading: Numerical Simulation, Composite Structures, Vol. 61 2003, pp. 175–186
30. A. A. Milenin, H. Dyja, S. Mroz, Simulation of metal forming during multi-pass rolling of shape bars, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier 2004
31. L. Schwer, Geomaterial Modeling with LS-Dyna, 2001
32. P. Carlone and G. S. Palazzo, Computational Modeling of the Cold Compaction of Ceramic Powders
33. R. Kohler and G. Hofstetter, A cap model for partially saturated soils, International Journal for Numerical and analytical methods in Geomechanics, 2007
34. <http://www.aluminum.org>
35. <http://www.magnesium.com>
36. www.metal.ntua.gr
37. <http://en.wikipedia.org>
38. geoweb.princeton.edu
39. <http://www.memsnet.org>
40. <http://www.tyco.com>
41. <http://science.howstuffworks.com>
42. <http://www.dynasupport.com>
43. <http://www.engineershandbook.com>

