

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥ
MgB₂ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
POWDER-IN-TUBE ΚΑΙ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ**

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΙΩΑΝΝΟΥ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009

Περίληψη:

Η διπλωματική αυτή εργασία ερευνά τα υπεραγωγικά υλικά και κυρίως την Παρασκευή και τις ιδιότητες του υπεραγωγικού υλικού υψηλής θερμοκρασίας διβοριδίου του μαγνησίου (MgB_2) με τη μέθοδο powder in tube "PIT".

Στο πλαίσιο αυτό αναλύεται το φυσικό υπόβαθρο πίσω από τα υπεραγωγικά υλικά, μελετάται η διέλαση της κεραμικής σκόνης του MgB_2 και γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων του φορτίου διέλασης, με τις προβλέψεις διαφόρων θεωρητικών μοντέλων. Επιπλέον, προσδιορίζεται η επίδραση της κατεργασίας τόσο στις υπεραγωγικές ιδιότητες του υλικού όσο και στη μικροδομή του μέσω διάφορων τεχνικών χαρακτηρισμού. Τέλος, αναφέρονται δυνητικές εφαρμογές των υπεραγωγικών υλικών και εξάγονται συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της όλης διαδικασίας.

Λέξεις και Φράσεις κλειδιά: Υπεραγωγικότητα, Υπεραγωγοί Τύπου II, Διβορίδιο του μαγνησίου, Powder in Tube, Διέλαση, Κονιομεταλλουργία, Κεραμικά Υλικά.

Abstract

This diploma thesis is concerned with superconductive materials and mainly with the production of high-temperature superconductor magnesium diboride (MgB_2) using the powder in tube technique "PIT".

The physical background of superconductors is studied and more specifically the extrusion process of the MgB_2 ceramic powder is analysed by comparing the experimental results obtained from measurements of the extrusion load with the predictions of various theoretical models. Furthermore, the effects of the forming procedure on the superconductive properties of the material as well as on its microstructure through various types of characterisation are investigated. Finally, possible applications of superconducting materials are outlined and conclusions are drawn to evaluate the effectiveness of the whole process.

Keyphrases and keywords: Superconductivity, Type II Superconductors, Magnesium Diboride, Powder in Tube, Extrusion, Powder Metallurgy, Ceramic Materials.

Περιεχόμενα:

1.Εισαγωγή	4
2.Υπεραγωγίμα Υλικά	5
Ιστορική Αναδρομή.....	5
Θεωρία Υπεραγωγών.....	7
Διάκριση Υπεραγωγών.....	18
Χαρακτηριστικά Φαινόμενα Υπεραγωγών.....	23
Χαρακτηριστικές Ιδιότητες Υπεραγωγών.....	28
Το Διβορίδιο του Μαγνησίου.....	35
3.Μορφοποίηση Υπεραγωγών	43
Σύνθεση Υπεραγωγίμης Σκόνης.....	43
Παραγωγή και Μορφοποίηση Τελικών Προϊόντων.....	45
4.Διέλαση του MgB_2	48
Η Διέλαση ως Κατεργασία.....	48
Θεωρητικός Υπολογισμός φορτίου Διέλασης MgB_2	53
Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας.....	62
Σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα.....	67
Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	72
5.Χαρακτηρισμός του MgB_2	77
Οπτική Μικροσκοπία.....	77
Περίθλαση Ακτίνων Χ.....	82
Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης.....	86
Υπεραγωγίμες Ιδιότητες.....	103
6.Εφαρμογές Υπεραγωγίμων Υλικών	122
7.Συμπεράσματα	143
8.Προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και περαιτέρω έρευνα	144
Υπόμνημα Α.....	145
Υπόμνημα Β.....	145
Υπόμνημα Γ.....	145
Υπόμνημα Δ.....	146

Αντί-Προλόγου:

Ο γράφων θα ήθελε εδώ να ευχαριστήσει όλους ανεξαιρέτως, όσοι τον βοήθησαν να γίνει πραγματικότητα αυτή η εργασία. Επίσης εδώ θα ήθελε να εφαρμόσει μια πρωτοτυπία:

Από το να ευχαριστήσει όλα τα φυσικά πρόσωπα ονομαστικά για τη βοήθεια τους θα προτιμήσει να αναφέρει όλα τα βιβλία που η μελέτη τους τον βοήθησε να ολοκληρωθεί με αυτό τον τρόπο η συγγραφή της διπλωματικής του εργασίας.

Ένα εξαιρετο βιβλίο για την κατανόηση της υπεραγωγιμότητας είναι το *The Rise of the Superconductors* των Νοτιοαφρικανών P.J.Ford και G.A.Saunders, εκδόσεις CRC Press. Είναι καλοδομημένο και παρουσιάζει τη θεωρία των υπεραγωγών χωρίς μεγάλες παρενθέσεις από τη φυσική (κάτι που το κάνει ιδανικό για μηχανικούς) αλλά κυρίως παρουσιάζει την όλη εξέλιξη της θεωρίας της υπεραγωγιμότητας από την αρχή μέχρι το τέλος, επιτρέποντας στον αναγνώστη να δει την θεωρία εποπτικά, ως κάτι ζωντανό που εξελίσσεται και όχι ως μια νεκρή θεωρία ενός κλάδου της φυσικής.

Το "Ένα Αστéρι Πεθαίνει: Μαύρες τρύπες, Κόκκινοι Γίγαντες και Άσπροι Νάνοι του Jean-Pierre Luminet, εκδόσεις Τραυλός έδειξε στον γράφοντα την αξία του να γράφει κανείς για θέματα φυσικών επιστημών χωρίς να καταντά ανιαρός. Επίσης, του έδειξε πως μπορεί να συνδεθεί η λογοτεχνία με την συγγραφή επιστημονικών κειμένων.

Ένα πολύ καλό βιβλίο παραμένει το *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, του Δ.Παντελή, εκδόσεις Παπασωτηρίου. Παρουσιάζει με άμεσο και χωρίς πλατειασμούς την θεωρία των υπεραγωγών ενώ ταυτόχρονα ίσως είναι το μόνο βιβλίο στην ελληνική βιβλιογραφία που παρουσιάζει όλους τους τρόπους σύνθεσης ενός υπεραγωγίμου υλικού. Ο γράφων του είναι ευγνώμων.

Οι σημειώσεις του Δ. Μανωλάκου για την διέλαση είναι κάτι μοναδικό στην ελληνική βιβλιογραφία: Ποτέ άλλοτε δεν παρουσιάστηκε ένα τεχνικό ζήτημα με τόση διαύγεια, αναλυτικά και δίχως να δημιουργεί απορίες. Αποτέλεσε οδηγό για την παρουσίαση κάθε φάσης της εργασίας όσο πιο αναλυτικά γίνεται.

Τέλος, ένα άρθρο στην εφημερίδα Ελευθεροτυπία μάλλον πριν από 7 χρόνια (το 2002) αποτέλεσε την αφορμή ώστε ο γράφων να έρθει σε επαφή με την υπεραγωγιμότητα και να αρχίσει να ψηλαφίζει τις εφαρμογές της, με τη διάθεση να γνωρίσει καλύτερα αυτή την τόσο εξάψουσα την φαντασία θεωρία.

1. Εισαγωγή.

Υπάρχει πάντοτε κάποια στιγμή που η περιέργεια γίνεται αμάρτημα και ο διάβολος ήταν ανέκαθεν με το μέρος των επιστημόνων.

Anatole France, *La Revolte des Anges*.

Η ανακάλυψη του υπεραγώγιμου φαινομένου ήταν και είναι ένα από τα περισσότερο υποσχόμενα φαινόμενα στην ιστορία της σύγχρονης φυσικής. Από την σύνθεση μιας θεωρίας που θα το εξηγεί πλήρως έως τις εφαρμογές του σε όλους σχεδόν τους κλάδους της βιομηχανίας(ενέργεια, μαζικές μεταφορές, Ιατρική, πειραματική φυσική, υπολογιστές κά), η υπεραγωγιμότητα αναμένεται να φέρει επανάσταση στον τρόπο που γνωρίζουμε τον κόσμο στον οποίο ζούμε.

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται ένα υλικό που βρέθηκε να εμφανίζει υπεραγώγιμες ιδιότητες σχετικά πρόσφατα, το διβορίδιο του μαγνησίου(MgB_2) από την πλευρά της κατεργασίας του ως σκόνη και το πώς επιδρά αυτή στις υπεραγώγιμες του ιδιότητες.

Ο γράφων φιλοδοξεί ώστε η εργασία που συνέγραψε παρακινούμενος από το αιώνιο κίνητρο της μάθησης, την περιέργεια, να γίνει ένα ακόμα λιθαράκι στο λαμπρό παλάτι της κατανόησης της υπεραγώγιμης θεωρίας ακόμα και αν η περιέργεια μερικές φορές είναι αμάρτημα. Στην τελική, ο παράδεισος παραείναι βαρετός...

2. Υπεραγώγιμα Υλικά.

There are more things in heaven and earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy.

William Shakespeare, Hamlet Act 1, Scene V.

A. Ιστορική αναδρομή.

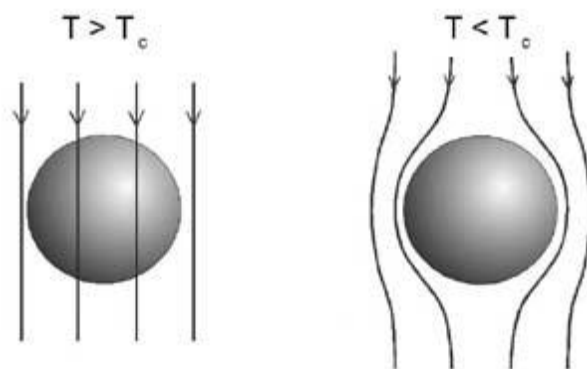
Ήταν το σωτήριο έτος 1911 όταν η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε από τον έναν Ολλανδό φυσικό, τον Heike Kamerlingh Onnes, τρία χρόνια αφού κατάφερε και υγροποίησε το ήλιο, γεγονός το οποίο του έδωσε την ικανότητα και την τεχνική ψύξης ώστε να επιτύχει κρυογενικές θερμοκρασίες μερικών μόλις βαθμών Kelvin. 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. Πλέον αρχίζει ένα από τα πιο συναρπαστικά ταξίδια στον κόσμο των υλικών, πολλά υποσχόμενο. Έτσι στις δύο μέχρι τότε γνωστές κατηγορίες υλικών, αγωγούς και μονωτές, ερχόταν να προστεθεί μια νέα κατηγορία με πρωτόγνωρες ιδιότητες, αυτή των υπεραγωγών.

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 .

Για τα επόμενα είκοσι περίπου χρόνια ακολούθησαν μελέτες για την υπεραγωγιμότητα διάφορων μεταλλικών στοιχείων και κραμάτων. Βρέθηκε ότι πάνω από είκοσι μεταλλικά στοιχεία, υπό κατάλληλες συνθήκες, παρουσιάζουν την ιδιότητα της υπεραγωγιμότητας σε ένα εύρος θερμοκρασιών μεταξύ των 0.35K και των 9.25K.

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 στην ότι όταν ένα υλικό με υπεραγωγίμες ιδιότητες ψυχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη της T_c , η ηλεκτρική αντίσταση γίνεται μηδενική και με την επιβολή σε αυτόν ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μηδενίζεται η ολική μαγνητική ροή Φ σε αυτό.

Το ανεξήγητο αυτό φαινόμενο που ονομάζεται Meissner effect και αναλύεται διεξοδικά παρακάτω, τράβηξε το ενδιαφέρον των ερευνητών, ενώ παράλληλα επιφύλασσε και πολλές εκπλήξεις.



Σχήμα 1: Για $T < T_c$, ο υπεραγωγός αποβάλλει τη μαγνητική ροή από το εσωτερικό του

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 . Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '80 τις υψηλότερες κρίσιμες θερμοκρασίες παρουσίαζαν υπεραγωγία κράματα όπως το Nb₃Sn και το NbTi με υψηλότερη παρατηρούμενη αυτή του Nb₃Ge, που ανακαλύφθηκε από τον Gavalier, η οποία έφθανε τους 23,2K¹.

Το 1986 όμως αποτελεί το έτος ορόσημο όσον αφορά τους υπεραγωγούς, καθώς οι J.Georg Bednorz και Karl Alex Muller ανακοίνωσαν ότι παρατήρησαν το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας σε ένα οξειδίο λανθανίου, βαρίου και χαλκού το La_{2-x}Ba_xCuO₄ (LBCO) με κρίσιμη θερμοκρασία τους 35K^{1,2}, όταν η μεγαλύτερη μέχρι τότε γνωστή τιμή της T_c ήταν 23,2K. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε σε έναν απίστευτο «πυρετό» κατά μήκος των επιστημονικών ομάδων φυσικής στερεάς κατάστασης: πάρα πολλοί από αυτούς εγκαταλείπουν προσωρινά τα αντικείμενα μελέτης τους και μελετούν εντατικά στην έρευνα των υπεραγωγών προσπαθώντας να βρουν υπεραγωγούς με κρίσιμες θερμοκρασίες ακόμα υψηλότερες.¹

Άμεσο αποτέλεσμα ήταν η ανακάλυψη ενώσεων, μέσα στους επόμενους μήνες, με κρίσιμη θερμοκρασία άνω των 77K (θερμοκρασία υγροποίησης του αζώτου).

Οι νέες αυτές ενώσεις ήταν οι La_{2-x}Sr_xCuO₄, Yba₂Cu₃O_{7-x} (YBCO, $T_c = 91,5K$), Bi₂Sr₂CaCu₂O_x (BSCCO, $T_c = 85K$), Ti₂Ba₂Ca₂Cu₃O₁₀ (TBCCO, $T_c = 130K$) και HgBa₂Ca₂Cu₃O_{8+x} ($T_c = 135K$) και ονομάστηκαν υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών (High Temperature Superconductors H.T.S.).²

Η μεγαλύτερη παρατηρηθείσα κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας σήμερα είναι YBa₂Cu₃Se₇ του με 371K υπό πίεση!³

Οι υπεραγωγοί αυτοί είναι ως επί το πλείστον οξειδία με κρυσταλλική δομή περοβοκίτη.¹

Τα νέα επαναστατικά δεδομένα που επέβαλλε η ανακάλυψη αυτού του είδους των υπεραγωγών ήταν βασικά δύο:

i) Αφενός το τεράστιο άλμα που έγινε στο επίπεδο των κρίσιμων θερμοκρασιών αφού μέχρι τότε η πρόοδος στον τομέα αυτόν ήταν της τάξεως των λίγων βαθμών Kelvin ανά δεκαετία και

ii) Αφετέρου η χρήση του υγρού αζώτου για την επίτευξη των κρίσιμων θερμοκρασιών το οποίο είναι πολύ πιο εύχρηστο και οικονομικό από το υγρό ήλιο.

Εάν κάποτε ανακαλυφθούν υπεραγωγοί με T_c υψηλότερη της θερμοκρασίας δωματίου, τότε θα αλλάξει ριζικά η τεχνολογία και ο κόσμος όπως τον ξέρουμε αφού η αναγνώριση ότι ένα μέταλλο με μηδενική αντίσταση μπορεί να μεταφέρει πολύ υψηλά ρεύματα χωρίς απώλεια ενέργειας κάνει προφανή την σπουδαιότητα του φαινομένου αυτού.

B. Η θεωρία της υπεραγωγιμότητας.

I. Οι εξισώσεις London (η πρώτη πετυχημένη προσπάθεια).¹

Μία από τις πρώτες προσπάθειες εξήγησης του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας, με βάση τις δύο βασικές της ιδιότητες, πραγματοποιήθηκε το 1935 από τους αδερφούς F.& H. London, οι οποίοι για την περιγραφή των αναπτυσσόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων πρότειναν τις ακόλουθες εξισώσεις

$$E = \frac{\partial(\Lambda J_s)}{\partial t} \quad (1)$$

$$h = -c \cdot \nabla \times (\Lambda J_s) \quad (2)$$

όπου:

E: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

J_s: πυκνότητα ρεύματος της υπεραγωγίμης κατάστασης

h: η μαγνητική επαγωγή σε μικροσκοπικό επίπεδο

c: ταχύτητα του φωτός

Λ: είναι μια φαινομενολογική παράμετρος

$$\Lambda = 4\pi\lambda^2 / c^2 = \frac{m}{n_s e^2} \quad (3)$$

όπου:

n_s: είναι η πυκνότητα των υπεραγωγίμων ηλεκτρονίων

λ: το βάθος διείσδυσης

m: η μάζα των υπεραγωγίμων ηλεκτρονίων

e: το φορτίο των υπεραγωγίμων ηλεκτρονίων.

Η τιμή του μεγέθους της πυκνότητας των ηλεκτρονίων κυμαίνεται από την μηδενική τιμή για $T=T_c$, ως μια οριακή τιμή της τάξεως του n , για $T \ll T_c$.

Στην Εξ. (5) εισάγεται το μέγεθος h το οποίο υποδηλώνει την τιμή της πυκνότητας ροής του μαγνητικού πεδίου. Το h αντιστοιχεί, σε μικροσκοπική κλίμακα στο μέγεθος B .

Η Εξ. (4) περιγράφει την τέλεια αγωγιμότητα, καθώς ένα ηλεκτρικό πεδίο επιταχύνει τα υπεραγωγίμα ηλεκτρόνια. Η εξίσωση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τον νόμο του Ohm που περιγράφει την ταχύτητά τους (ένταση) ως προς την αντίσταση των κανονικών αγωγών.

Η δεύτερη εξίσωση London (2), όταν συνδυαστεί με την εξίσωση Maxwell:

$$\text{curl}h = 4\pi J/c \quad (4)$$

όπου:

h : η μαγνητική επαγωγή σε μικροσκοπικό επίπεδο

J : η πυκνότητα ρεύματος

c : η ταχύτητα του φωτός,

τότε καταλήγει στην εξίσωση:

$$V^2 h = \frac{h}{\lambda^2} \quad (5)$$

όπου:

λ : το μήκος διείσδυσης.

Η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει το φαινόμενο Meissner, δηλαδή τον αποκλεισμό (λαμβάνοντας υπ' όψη το βάθος διείσδυσης λ) από την μάζα του υπεραγωγού, ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Το βάθος διείσδυσης δεν έχει κάποια σταθερή τιμή, αλλά το μέτρο του εξαρτάται από την θερμοκρασία με βάση την παρακάτω εξίσωση

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-1/2} \quad (6)$$

όπου:

T : η εξεταζόμενη θερμοκρασία

T_c : η κρίσιμη θερμοκρασία του υπεραγωγού.

Μία άλλη εξίσωση που είναι πιο ακριβής από τις προαναφερθείσες εξισώσεις London, είναι η κβαντική εξίσωση, που εισάγει την έννοια του διανύσματος του δυναμικού A , η οποία ανακαλύφθηκε από τον F.London.

Θεωρώντας αφ' ενός ότι η ορμή p δίνεται από τον τύπο:

$$p = \frac{mV + eA}{c} \quad (7)$$

όπου:

m : η μάζα του ηλεκτρονίου

V : η ταχύτητα του ηλεκτρονίου

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

A : το δυναμικό

c : η ταχύτητα του φωτός

και αφ' ετέρου ότι με την απουσία εξωτερικά επιβαλλόμενου πεδίου, το σύστημα του πλέγματος θα έχει μηδενική ορμή, προκύπτει η Εξ. (8), η οποία εκφράζει την μέση τοπική ταχύτητα των ηλεκτρονίων, παρουσία πεδίου

$$\langle V_s \rangle = -eA/mc \quad (8)$$

όπου:

V_s : η μέση τοπική ταχύτητα των ηλεκτρονίων

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

A : το δυναμικό

m : η μάζα του ηλεκτρονίου

c : η ταχύτητα του φωτός

Η εξίσωση αυτή ισχύει αν θεωρηθεί σαν δεδομένο ότι για κάποιο λόγο η κυματοσυνάρτηση των υπεραγωγίων ηλεκτρονίων παραμένει 'άκαμπτη' και διατηρεί την ιδιότητα της θεμελιώδους κατάστασης στην οποία $\langle p \rangle = 0$. Συμβολίζοντας την πυκνότητα των ηλεκτρονίων, που συμμετέχει στην θεμελιώδη κατάσταση σαν n_s , ισχύει

$$J_s = n_s e \langle V_s \rangle = \frac{-n_s e^2 A}{mc} = \frac{-A}{\Lambda_c} \quad (9)$$

όπου:

J_s : η πυκνότητα του υπεραγωγίου ρεύματος

n_s : η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην υπεραγωγίμη κατάσταση

V_s : η μέση τοπική ταχύτητα των ηλεκτρονίων

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Διαφορίζοντας την Εξ. (9) ως προς τον χρόνο, προκύπτει η Εξ. (1), ενώ παίρνοντας το curl προκύπτει η Εξ. (2). Έτσι, η Εξ. (5) εμπεριέχει σε συμπυκνωμένη μορφή και τις δύο εξισώσεις London.

Η Εξ. (9) δεν αποσαφηνίζει την πραγματική τιμή του n_s , αλλά το άνω όριο αυτής παρέχεται από την ολική πυκνότητα των αγωγίων ηλεκτρονίων n . Λαμβάνοντας υπ' όψην την Εξ. (3) προκύπτει

$$\lambda_L(0) = \left(\frac{mc^2}{4\pi n_s e^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

όπου:

n_s : η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στην υπεραγωγίμη κατάσταση

m : η μάζα του ηλεκτρονίου

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

c : η ταχύτητα του φωτός

II. Η θεωρία BCS(η καλύτερη εξήγηση).^{1,2}

Παρόλο την πρακτικότητα και χρησιμότητα των εξισώσεων των αδερφών London, δεν κατάφεραν να απαντήσουν σε σημαντικά προβλήματα όπως η μέτρηση του λ , του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου H_c , αλλά και ερωτήματα όπως την εξήγηση του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας και της απότομης μετάβασης του υλικού στην κατάσταση αυτή.

Στην αρχή, οι επιστημονικές εργασίες μέσω των παρατηρήσεων των δομών των υπεραγωγών, είχαν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι κατά την εμφάνιση της υπεραγωγιμότητας δεν παρουσιαζόταν μεταβολή στην

συμμετρία ή στις σταθερές του πλέγματος των υπεραγωγών. Ωστόσο, το 1950 ανακαλύφθηκε το φαινόμενο των ισοτόπων (που ωστόσο είχε ερευνηθεί πρώτα από τον Onnes το 1922). Σύμφωνα με αυτό, για ένα συγκεκριμένο μέταλλο, η κρίσιμη θερμοκρασία του T_c εξαρτάται από την μάζα του πυρήνα (δηλαδή από τη μάζα των ισοτόπων ενός στοιχείου M) και ειδικότερα από τον παράγοντα $\frac{1}{M^2}$.

Η εξήγηση του φαινομένου αυτού είναι η ακόλουθη: Κατά την μετάβαση μίας ένωσης στην υπεραγώγιμη κατάσταση παρατηρείται διέγερση των μορίων αυτής με αποτέλεσμα την ταλάντωσή τους. Η συχνότητα ταλάντωσης ν ενός διατομικού μορίου, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_r}} \Leftrightarrow \nu = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{k}{m_r}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

όπου:

m_r : η ανηγμένη μάζα του διατομικού μορίου δηλαδή ο αρμονικός μέσος

όρος των ατομικών μαζών m_1, m_2 δηλ. $m_r = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$

k : η σταθερά του Boltzmann

Από την παραπάνω εξίσωση διαφαίνεται ότι η ταλάντωση μεταβάλλει την συχνότητά της κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συχνότητα της ν να είναι ανάλογη του όρου $\left(\frac{1}{m_r}\right)^{\frac{1}{2}}$. Αυτό οδήγησε τους επιστήμονες στην υπόθεση ότι η

ιδιότητα της υπεραγωγιμότητας, εκτός από τα υπεραγώγιμα ηλεκτρόνια, σχετίζεται και με τον τρόπο ταλάντωσης του πλέγματος. Τα κβάντα αυτής της ταλάντωσης του πλέγματος ονομάζονται φωνόνια.

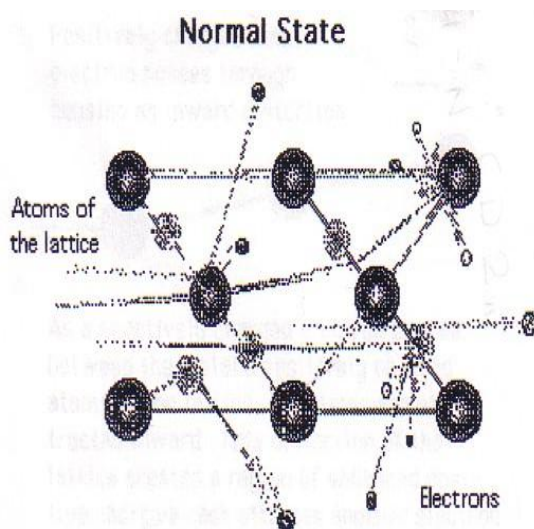
Το 1957 οι John Bardeen, Leon N. Cooper και J. Robert Schrieffer ανακοίνωσαν την θεωρία τους γνωστή ως BCS. Ο Bardeen μάλιστα βραβεύτηκε με 2^ο Nobel Φυσικής για αυτή την θεωρία και έγινε ο μόνος άνθρωπος με 2 Nobel στον ίδιο τομέα.

Γνωστό είναι ότι μέρος της ηλεκτρικής αντίστασης των υλικών στην κανονική τους κατάσταση, οφείλεται στις κρούσεις που λαμβάνουν μέρος ανάμεσα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια και στα παλλόμενα ιόντα που έχουν μετακινηθεί από τις θέσεις του πλέγματος, λόγω της θερμότητας. Παράλληλα τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τις διάφορες προσμίξεις που έχει το υλικό, κάτι το οποίο επίσης αυξάνει την αντίσταση που προβάλλει το υλικό στην κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα σε αυτό. Με την ανακάλυψη του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας, η επιστημονική κοινότητα αντιλήφθηκε ότι το προαναφερθέν σχετικά απλοϊκό μοντέλο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν επαρκούσε ώστε να ερμηνεύσει το φαινόμενο. Δηλαδή, παρόλο που στις χαμηλές θερμοκρασίες που λαμβάνει χώρα η υπεραγωγιμότητα, το πλάτος της παλμικής κίνησης του πλέγματος έχει μειωθεί δραματικά, ωστόσο, δεν εξηγείται η απότομη μετάβαση στην κατάσταση υπεραγωγιμότητας, ενώ παράλληλα τα ηλεκτρόνια πάντοτε θα

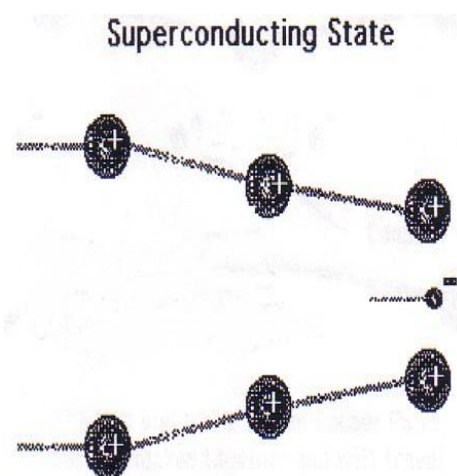
υφίστανται ορισμένες κρούσεις κατά την κίνησή τους, οπότε η πλήρης εξαφάνιση της ηλεκτρικής αντίστασης παρέμενε ανεξήγητη. Η δημοσίευση το 1957 της θεωρίας BCS ήταν λιαν επιτυχής στην ερμηνεία των διαφόρων ιδιοτήτων της υπεραγωγιμότητας και στα μοναδικά φαινόμενα που συμβαίνουν.

Η κεντρική ιδέα της θεωρίας αυτής 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.

Για να πάρουμε τα πράγματα από την αρχή, σε θερμοκρασία δωματίου, το κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού δεν είναι ακίνητο αλλά, λόγω απορρόφησης της θερμικής ενέργειας, ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας του με ένα πλάτος x_0 και μία συχνότητα ω_0 . Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, η συχνότητα ταλάντωσης παραμένει η ίδια, αλλά το πλάτος ή αλλιώς η απόσταση στην οποία φθάνει το ιόν από τη θέση ισορροπίας μειώνεται και σε θερμοκρασίες της τάξης των μερικών Kelvin όπου έχουμε το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, η ταλάντωση του πλέγματος είναι σχεδόν μηδαμινή. Έτσι, κατεβαίνοντας τον άξονα της θερμοκρασίας, έχουμε σιγά-σιγά τον σχηματισμό αγωγίων οδών μέσα στον μονοκρυσταλλο του υλικού όπου το πλέγμα δεν παρεμβάλλεται και οι σκεδάσεις των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους στις διευθύνσεις αυτές είναι θεωρητικά μηδαμινές.



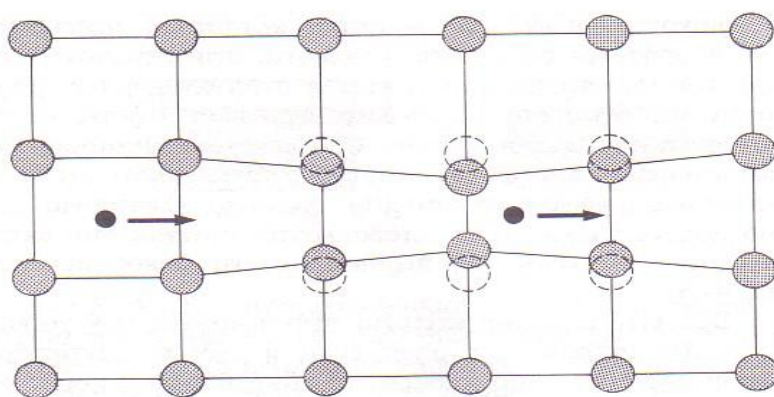
Σχήμα 2 Μικροσκοπικά η αντίσταση που προβάλλει το πλέγμα στη κίνηση των ηλεκτρονίων και συνεπώς στην μετάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος



Σχήμα 3 Η τοπική χωρική παραμόρφωση του πλέγματος κατά την διέλευση ηλεκτρονίου στην υπεραγώγιμη φάση

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 υπεραγωγίων αυτών οδών που 'σχηματίζονται' ενδιάμεσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού όπως φαίνεται στο σχήμα 4, 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.



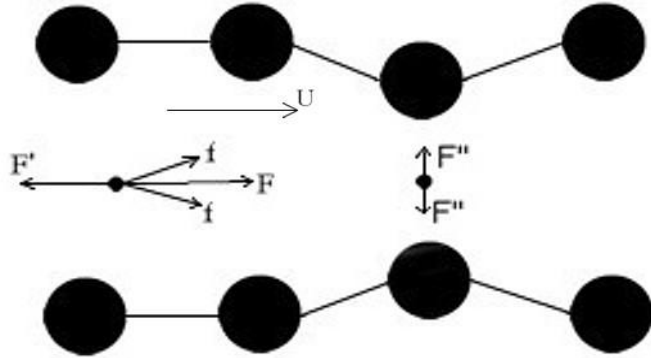
Σχήμα 4 Έμμεση αξονική ελκτική δύναμη στο δεύτερο ηλεκτρόνιο λόγω της παραμόρφωσης του πλέγματος που προκύπτει λόγω της κίνησης του πρώτου

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 υπεραγωγίων οδών κατά τις οποίες οι σκεδάσεις των ηλεκτρονίων είναι μηδαμινές, δεν είναι δυνατός σε όλα τα υλικά. Όταν λοιπόν το ηλεκτρόνιο έλκει προς τα μέσα τα εκατέρωθέν του ιόντα, η συνισταμένη των δυνάμεων που δρουν σ' αυτό, είναι μηδέν (σχήμα 5). Στη συνέχεια, στο δεύτερο ηλεκτρόνιο ασκούνται οι ελκτικές δυνάμεις από τα θετικά ιόντα που έχουν μετακινηθεί από τις θέσεις ισορροπίας τους προς τα μέσα, των οποίων η συνισταμένη είναι κατά τη διεύθυνση κίνησης του πρώτου ηλεκτρονίου. Επίσης, ασκείται η απωθητική δύναμη του

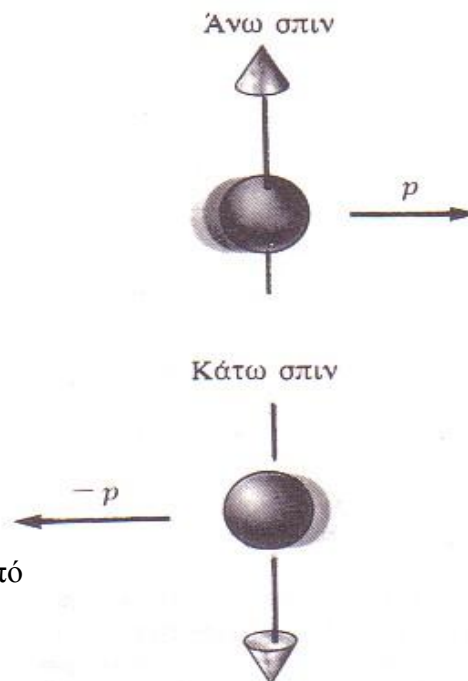
προπορευμένου ηλεκτρονίου λόγω ομωύμου φορτίου κατά Coulomb, η οποία έχει φορά αντίθετη της κίνησης όπως φαίνεται στο σχήμα 5 αλλά είναι ασθενέστερη των ελκτικών. Έτσι, το δεύτερο ηλεκτρόνιο ακολουθεί ισορροπώντας σε μία πολύ συγκεκριμένη απόσταση το πρώτο, η οποία απόσταση λέγεται **μήκος συνάφειας ξ** .



Σχήμα 5. Ανάλυση των δυνάμεων που λαμβάνουν χώρα σε ένα ζεύγος Cooper: f, F'' : ελκτικές δυνάμεις ηλεκτρονίου με πυρήνα, F' : απωστική δύναμη ηλεκτρονίου με ηλεκτρόνιο.

Επειδή η ταλάντωση του πλέγματος λόγω του πρώτου ηλεκτρονίου είναι κβαντισμένη και για αυτό παράγονται φωνόνια, ο μηχανισμός που αναλύθηκε ονομάζεται και μηχανισμός λόγω φωνονίων (από την ελληνική λέξη φωνή). Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να κατανοηθεί ότι η ροή ενός υπεραγωγίου ρεύματος σε έναν υπεραγωγό δεν αποτελείται από ένα ζεύγος Cooper, αλλά από 'συρμούς' ηλεκτρονίων, όπου το κάθε ηλεκτρόνιο αποτελεί το δεύτερο μέλος του ζεύγους με το προηγούμενο του και παράλληλα το πρώτο μέλος με το επόμενο. Το κάθε ηλεκτρόνιο δηλαδή συμμετέχει ταυτόχρονα σε δύο ζεύγη Cooper. Έτσι δημιουργούνται σειρές ηλεκτρονίων που ταξιδεύουν μέσα στο πλέγμα του υλικού από υπεραγωγίμες οδούς.

Το ζεύγος Cooper αποτελείται από δύο ηλεκτρόνια με αντίθετες ορμές, ίσα μέτρα και αντίθετα spin (σχήμα 6). Επομένως, στην υπεραγωγίμη κατάσταση αλλά με απουσία υπερρευσμάτων, το ζεύγος Cooper αποτελεί ένα σύστημα με μηδενική ολική ορμή και μηδενικό spin. Αφού λοιπόν τα ζεύγη Cooper έχουν μηδενικό spin, είναι μποζόνια και, επομένως, όλα τους μπορούν να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση, ενώ, αντίθετα τα μεμονωμένα ηλεκτρόνια είναι φερμιόνια, με spin $\frac{1}{2}$ και πρέπει να ικανοποιούν την απαγορευτική αρχή του Pauli, η οποία επιτρέπει ένα μόνο ηλεκτρόνιο σε μία συγκεκριμένη κατάσταση και συγκεκριμένο spin.



Σχήμα 6 Το ζεύγος Cooper αποτελείται από ηλεκτρόνια με αντίθετο spin μεταξύ τους

Στη θεωρία BCS η θεμελιώδης κατάσταση αποτελείται από όλα τα δέσμια ζεύγη ηλεκτρονίων. Στη πράξη δηλαδή, όλα τα ζεύγη Cooper βρίσκονται στην ίδια κβαντική κατάσταση μηδενικής ορμής.

Οι κυματοσυναρτήσεις των ζευγών Cooper έχουν σφαιρική συμμετρία, διότι έχουν μηδενικό spin και επομένως μηδενική στροφορμή. Αφού τα ηλεκτρόνια αποτελούν δέσμια κατάσταση, οι τροχιές τους μεταβάλλονται συνεχώς έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ τους να είναι ίση περίπου με ένα μήκος συνάφειας.

Η θεωρία BCS είχε ιδιαίτερη επιτυχία στην ερμηνεία των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των υπεραγωγών, όπως είναι η μηδενική αντίσταση και η αποβολή της μαγνητικής ροής. Από καθαρά ποιοτική άποψη, μπορεί κανείς να πει ότι για ελαττωθεί η ορμή ενός οποιουδήποτε ζεύγους Cooper, λόγω χάρη με σκέδασή του, πρέπει ταυτόχρονα να ελαττωθεί η ορμή όλων των ζευγών Cooper. Δεν είναι δυνατόν, βάση της θεωρίας, να μεταβληθεί η ταχύτητα ενός ζεύγους Cooper μόνον, χωρίς ταυτόχρονα να μεταβληθεί ισοποσα και η ταχύτητα όλων των υπολοίπων ζευγών που ακολουθούν. Πολλοί συγγραφείς περιγράφουν αυτή τη συλλογική κατάσταση με τον όρο 'κολεκτιβιστική κατάσταση'.

Ένας παραλληλισμός που έγινε, παρομοιάζε τα ηλεκτρόνια των ζευγών με τους ορειβάτες που είναι δεμένοι μεταξύ τους. Εάν ένας από αυτούς ξεστρατίσει εξαιτίας των ανωμαλιών του μονοπατιού, που στην περίπτωσή μας οφείλονται στις θερμικές ταλαντώσεις των ατόμων του πλέγματος, οι υπόλοιποι ορειβάτες θα τον επαναφέρουν στην τάξη. Έτσι οι διάφορες ανωμαλίες του πλέγματος και οι ταλαντώσεις του δεν επηρεάζουν τα ζεύγη Cooper και σε απουσία ηλεκτρικής αντίστασης, το ρεύμα διατηρείται στο διηνεκές.

Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι στις ταλαντώσεις του πλέγματος οφείλεται κατά ένα μέρος αφ' ενός η ηλεκτρική αντίσταση των κανονικών μετάλλων και αφ' ετέρου, η υπεραγωγιμότητα. Έτσι, μέταλλα όπως τα Cu, Ag και Au που έχουν μικρές ταλαντώσεις πλέγματος σε θερμοκρασία δωματίου και είναι καλοί αγωγοί, δεν είναι υπεραγωγοί. Αντιθέτως, τα Pb, Sn και Hg, αλλά και άλλοι μέτριοι αγωγοί που έχουν μεγάλες ταλαντώσεις πλέγματος σε θερμοκρασία δωματίου, είναι υπεραγωγοί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στο ότι οι δεσμοί μεταξύ των ιόντων του υλικού πρέπει να έχουν την ανοχή και ελαστικότητα σε παραμορφώσεις, διότι αλλιώς δεν υπάρχουν οι προϋποθέσεις δημιουργίας της δυναμικής αυτής κατάστασης των ζευγών Cooper. Μάλιστα η θεωρία BCS προβλέπει και μια σχέση που περιγράφει την το όλο φαινόμενο όπου η παράμετρος ενεργειακού χάσματος καθορίζεται ως εξής:

$$E_g = 1.76kT_c = 2hW_v \exp - \frac{1}{NV} \quad (12)$$

όπου k = σταθερά του Boltzmann.

W_v = Συχνότητα δόνησης του πλέγματος.

T_c = Κρίσιμη θερμοκρασία (πάνω από την οποία το υλικό παύει να είναι υπεραγωγός)

N = Αριθμός των διαθέσιμων ηλεκτρονικών καταστάσεων ανά μονάδα ενέργειας στο στερεό.

V = διαφορά δυναμικού της ελκυστικής αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων.

Η παραπάνω εξίσωση δεν αποδίδει τέλεια αποτελέσματα επειδή είναι υπεραπλουστευμένη. Το πιο ακριβές μοντέλο βασισμένο στη θεωρία BCS αναπτύχθηκε από τους Eliashberg και McMillan χρησιμοποιώντας ακριβή πειραματικά δεδομένα από δονήσεις κρυσταλλικών πλεγμάτων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η υπεραγώγιμη κατάσταση οφείλεται στη συλλογική δράση όλων μαζί των ζευγών Cooper. Η συμπύκνωση όλων των ζευγών στην ίδια κβαντική κατάσταση κάνει το σύστημα να μοιάζει με ένα γιγαντιαίο κβαντομηχανικό σύστημα, όπως ένα μακρομόριο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι υπεραγωγοί έχουν κβαντική συμπεριφορά σε μακροσκοπική κλίμακα, ενώ τα επιμέρους άτομα και μόρια εκδηλώνουν τη κβαντική τους συμπεριφορά μόνον σε μικροσκοπική κλίμακα.

Η συμπυκνωμένη συμπεριφορά των ζευγών Cooper περιγράφεται με μία και μόνον σύμφωνη κυματοσυνάρτηση ψ . Γενικότερα η κυματοσυνάρτηση περιγράφει την συνάρτηση κύματος (από την υπόθεση De Broglie) του ηλεκτρονίου $\psi = \exp\{i(kx - \omega t)\}$. Ωστόσο για τα ζεύγη Cooper, κάθε ηλεκτρόνιο-κύμα συμβάλλει με το άλλο και η κυματοσυνάρτηση που τα περιγράφει για ολόκληρο τον όγκο του υπεραγωγού και είναι της μορφής:

$$\psi_0(r_1 - r_2) = \left[\sum_{k > k_f} g_k \cos k \cdot (r_1 - r_2) \right] (\alpha_1 \beta_2 - \beta_1 \alpha_2) \quad (13)$$

όπου r_1 και r_2 είναι οι σχετικές συντεταγμένες των ηλεκτρονίων ενός ζεύγους Cooper, τα $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ και β_2 αναφέρονται αντιστοίχως στο άνω και κάτω spin (α, β) του πρώτου και δευτέρου (1,2) ηλεκτρονίου ενός ζεύγους Cooper, το $k > k_f$ αντιστοιχίζεται με τα ηλεκτρόνια που έχουν κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από το επίπεδο Fermi.

Όπως είναι κατανοητό, δεν έχουν όλα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τη ικανότητα να γίνουν υπεραγωγοί. Ο αριθμός των υπεραγώγιμων ηλεκτρονίων n_s είναι σαφώς μικρότερος από αυτόν των αγωγιμων στην κανονική κατάσταση του υλικού που συμβολίζεται ως n_n .

III. Η θεωρία GL των Ginzburg – Landau (μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση).¹

Η μικροσκοπικής κλίμακας θεωρία BCS δίνει πολύ καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου οι καταστάσεις την ευνοούν, όπως όταν το ενεργειακό χάσμα είναι συνεχές στον χώρο. Υπάρχουν όμως πολλές περιπτώσεις όπου το όλο ενδιαφέρον προκύπτει από την ύπαρξη χωρικής ανομοιογένειας. Αυτού του είδους περίπτωση είναι οι υπεραγωγοί τύπου II που θα αναπτυχθούν

παρακάτω. Επίσης η θεωρία BCS δεν προβλέπει την ύπαρξη υπεραγωγών άνω των θερμοκρασιών των 30K(οι θερμικές ταλαντώσεις του κρυστάλλου είναι τόσο έντονες που θα έσπαγαν το ζεύγος Cooper). Σε τέτοιες περιπτώσεις, η αποκλειστικώς μικροσκοπικής αντιμετώπισης θεωρία έχει πολλές δυσκολίες και η χρησιμοποίηση της πιο μακροσκοπικής θεωρίας GL είναι επιτακτική.

Η θεωρία των Ginzburg-Landau (GL), η οποία διατυπώθηκε το 1950, επτά χρόνια νωρίτερα από την εμφάνιση της θεωρίας BCS, επικεντρώθηκε στην μελέτη των υπεραγωγίων ηλεκτρονίων παρά στην διέγερση αυτών. Οι Ginzburg-Landau εισήγαγαν την κυματοσυνάρτηση ψ , για τις δευτέρας τάξεως φάσεις εκπομπής, η οποία περιγράφει την τοπική πυκνότητα των υπεραγωγίων ηλεκτρονίων σε ένα σημείο χ του υπεραγωγού, έτσι όπως ορίζεται από τις εξισώσεις London και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:
$$n_s = \psi(\chi)^2$$

Η ανωτέρω εξίσωση με τους κατάλληλους μαθηματικούς μετασχηματισμούς και με την εισαγωγή του μεγέθους της ελεύθερης ενέργειας και των συντελεστών διαστολής μετασχηματίζεται, μετά από διαφοροποίηση, στην ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{i \cdot V} - \frac{e}{c \cdot A} \right)^2 \Psi + \beta \Psi^2 \Psi = -\alpha(T) \Psi \quad (14)$$

Η αντίστοιχη εξίσωση για το υπεραγωγίο ρεύμα είναι:

$$j_s = \frac{e \cdot \hbar}{i \cdot 2 \cdot m} (\Psi \cdot \nabla \cdot \Psi - \Psi \nabla \Psi) - \frac{e^2}{m \cdot c \cdot \Psi^2 \cdot A} \quad (15)$$

όπου:

e : το φορτίο των σωματιδίων

m : η μάζα των σωματιδίων

\hbar : η σταθερά του Planck

Ψ : η κυματοσυνάρτηση $\Psi = \exp\{i(kx - \omega t)\}$ του ηλεκτρονίου

α, β : οι συντελεστές διαστολής

A : το δυναμικό στο εξεταζόμενο σημείο

Με τις παραπάνω εξισώσεις δόθηκε η δυνατότητα να εξεταστούν δύο στοιχεία τα οποία αγνοούσαν οι εξισώσεις London. Τα στοιχεία αυτά είναι μη γραμμικές συνέπειες των ισχυρών πεδίων που έχουν σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του n_s , καθώς και οι χωρικές διαφοροποιήσεις του n_s . Το μεγάλο πλεονέκτημα που παρουσίασε η θεωρία GL ήταν η δυνατότητα περιγραφής της ενδιάμεσης κατάστασης των υπεραγωγών στην οποία η υπεραγωγιότητα συνυπάρχει με την κανονική κατάσταση κατά την παρουσία μαγνητικών πεδίων που βρίσκονται κοντά στην τιμή του H_c . Το 1959 όμως, ο Gorkon απέδειξε ότι η θεωρία GL ήταν μία οριακή περίπτωση της θεωρίας BCS, η οποία ίσχυε για θερμοκρασίες κοντά στο T_c , στις οποίες η ψ μπορεί να θεωρηθεί σαν μια κυματοσυνάρτηση η οποία περιγράφει την κίνηση της μάζας ενός ζευγαριού Cooper.

Η θεωρία GL εισάγει ένα χαρακτηριστικό μήκος το οποίο ονομάζεται μήκος συνάφειας ($\xi(T)$) το οποίο αποδίδεται από την εξίσωση:

$$\xi(T) = \frac{h}{(2 \cdot m \cdot a(T))^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

Το μήκος συνάφειας $\xi(T)$ περιγράφει την απόσταση στην οποία η τιμή του $\psi(x)$ (στο σημείο x) μπορεί να μεταβάλλεται χωρίς να προκαλεί αύξηση της ενέργειας. Σε έναν καθαρό υπεραγωγό και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της T_c , το ξ παρουσιάζεται ανεξάρτητο της θερμοκρασίας δηλ. $\xi(T) = \xi_0$, (ξ_0 είναι το μήκος της διείσδυσης κατά Pippard).

Εντούτοις, το $\xi(T)$ αποκλίνει μέσω του παράγοντα $(T_c - T)^{-\frac{1}{2}}$ καθώς το a μηδενίζεται με το $T_c - T$. Ο λόγος των μηκών διείσδυσης (GL, Pippard) ορίζει την παράμετρο GL:

$$k = \frac{\lambda}{\xi} \quad (17)$$

Η παράμετρος k είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας και παίρνει τιμές πολύ χαμηλότερες της μονάδας ($k \ll 1$). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείται μία θετική επιφανειακή ενέργεια πλέγματος στην φάση όπου συνυπάρχουν η υπεραγωγιμότητα και η κανονική κατάσταση.

IV. Νέες προσεγγίσεις.¹

Η θεωρία Anderson- Chakravarty

Προς κάλυψη των θεωρητικών κενών που παρουσίαζαν τα προαναφερθέντα θεωρητικά μοντέλα, οι Anderson και Chakravarty παρουσίασαν μία νέα θεωρητική άποψη για τους υπεραγωγούς υψηλών θερμοκρασιών και πιο συγκεκριμένα για τα κεραμικά μίγματα του Cu-O και για την ένωση του YBCO.

Με βάση την άποψη αυτή, δεν είναι ακριβής η παραδοχή ότι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια διέρχονται μέσα από ένα κρυσταλλικό πλέγμα, δεν αλληλεπιδρούν ισχυρά με τα υπάρχοντα ηλεκτρόνια και άτομα. Αντιθέτως, τέτοιες αλληλεπιδράσεις υπάρχουν και όπως υπολόγισαν, μπορεί να είναι τόσο ισχυρές ώστε να διαχωρίσουν το ηλεκτρόνιο σε δύο θεμελιώδη σωματίδια: το holon και το spinon. Το holon διατηρεί το φορτίο του ηλεκτρονίου και το spinon διατηρεί το spin αυτού. Τα σωματίδια αυτά απαιτούν ενέργεια για να διατηρηθούν χωριστά και έτσι διατηρούνται σε αυτή την κατάσταση μόνο όταν η ένωση βρίσκεται στην κανονική κατάσταση. Όταν η ένωση ψύχεται και μεταβαίνει στην υπεραγωγίμη κατάσταση, τα σωματίδια αυτά επανενώνονται σε ηλεκτρόνια τα οποία όπως συμβαίνει και στην θεωρία BCS σχηματίζουν μεταξύ τους ζεύγη. Θεωρώντας ότι τα ζεύγη αυτά των ηλεκτρονίων δεν είναι ουσιαστικά δύο μεμονωμένα σωματίδια, αλλά συμπεριφέρονται σαν κύματα, θεωρείται εφικτή η μετακίνησή τους από το ένα επίπεδο Cu-O σε κάποιο άλλο. Κατά την μετακίνησή τους τα κύματα των ηλεκτρονίων, εκτός από το ότι διέρχονται μέσα από τα επίπεδα Cu-O διέρχονται και από ενδιάμεσα

επίπεδα ατόμων όπως είναι του Y και του Ba. Καθώς όμως ένα ζευγάρι ηλεκτρονίων διέρχεται μέσα από αυτά τα επίπεδα, χάνει ένα μικρό μέρος της κινητικής του ενέργειας με αποτέλεσμα να γίνεται πιο σταθερό. Στην περίπτωση αυτή, όταν αρχίζει η θέρμανση της ένωσης, είναι πιο δύσκολο να επαναδιαχωριστούν τα ηλεκτρόνια, οπότε και η υπεραγωγιμότητα διατηρείται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Στις θερμοκρασίες περιβάλλοντος, τα περισσότερα ηλεκτρόνια του πλέγματος έχουν διαχωριστεί σε holons και spinos και δεν διατηρούνται στην μορφή των ζευγών που είναι η αιτία της υπεραγωγιμότητας λόγω των ισχυρών αλληλεπιδράσεων που υφίστανται στα επίπεδα των Cu-O.

Αν αυτή η θεωρία επαληθευτεί θα σημαίνει επανάσταση στην φυσική στοιχειωδών σωματιδίων γιατί θα έχει προβλεφθεί πως το ηλεκτρόνιο αποτελείται από μικρότερα σωματίδια κάτι που προς το παρόν θεωρείται απίθανο.

Η θεωρία των Scalapino –Pines

Οι Scalapino – Pines στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας υψηλών θερμοκρασιών ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο παρεμφερές της θεωρίας BCS. Κατά το μοντέλο αυτό, δεν είναι το αρνητικό φορτίο των κινούμενων ηλεκτρονίων η αιτία που προκαλεί την διαταραχή του κρυσταλλικού πλέγματος μέσα από το οποίο διέρχονται, αλλά το πολύ μικρό μαγνητικό πεδίο που αυτά δημιουργούν με την κίνησή τους. Το μαγνητικό πεδίο που σχηματίζεται από την κίνηση ηλεκτρονίων, συμπαρασύρει τα κοντινά άτομα του πλέγματος, διαταράσσοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο των ατόμων Cu. Η διαταραχή αυτή που προκαλούν τα κινούμενα ηλεκτρόνια έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία των ζευγών ηλεκτρονίων λόγω της μεταξύ τους έλξης. Για τα σχηματιζόμενα ζεύγη των ηλεκτρονίων ισχύουν τα ήδη γνωστά από την θεωρία BCS. Πάντως, οι προσπάθειες για την δημιουργία ενός νέου θεωρητικού μοντέλου για την ικανοποιητική ερμηνεία της υπεραγωγιμότητας υψηλών θερμοκρασιών συνεχίζονται καθ' όλη κανένα από τα μοντέλα που υπάρχουν μέχρι τώρα δεν την εξηγεί ικανοποιητικά.

Γ. Διάκριση Υπεραγωγών.^{1,4,5}

Οι υπεραγωγοί μπορούν να διακριθούν σε 2 κατηγορίες(στην I και στην II) αναλόγως το βάθος διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό τους.

Σύμφωνα λοιπόν με την διαμαγνητική συμπεριφορά των υπεραγωγών χωρίζονται σε 2 τύπους:

- ❖ Υπεραγωγοί τύπου I. Παρουσιάζουν όλα τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- ❖ 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 διεύδυση 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. Στη συνέχεια αναλύονται οι υπεραγωγοί τύπου II τόσο γιατί σε αυτούς ανήκει το MgB_2 όσο και γιατί είναι εξαιρετικά ενδιαφέροντες.

(i) Οι Υπεραγωγοί τύπου II. 1,4

Οι τύπου II υπεραγωγοί αναπτύχθηκαν τις δεκαετίες του 1950 και 1960 και διέφεραν αρκετά από τους κλασικούς υπεραγωγούς που ήταν γνωστοί μέχρι τότε. Η βασικότερή τους διαφορά έγκειται στην ύπαρξη μίας μικτής κατάστασης που αποτελείται από τη ταυτόχρονη συνεύρεση υπεραγωγίμης και κανονικής φάσης μέσα στο σώμα του υλικού. Χαρακτηριστικό των υπεραγωγών αυτών είναι ότι έχουν δύο κρίσιμες τιμές του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Τι καθορίζει ωστόσο αν ένας υπεραγωγός θα είναι τύπου II και όχι τύπου I; Το κλειδί εδώ είναι η παράμετρος GL (ο λόγος λ/ξ) όπως αναλύθηκε στην θεωρία GL . Αν το

$\frac{\lambda}{\xi} \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$, τότε ο υπεραγωγός είναι τύπου II αλλιώς ο υπεραγωγός είναι τύπου

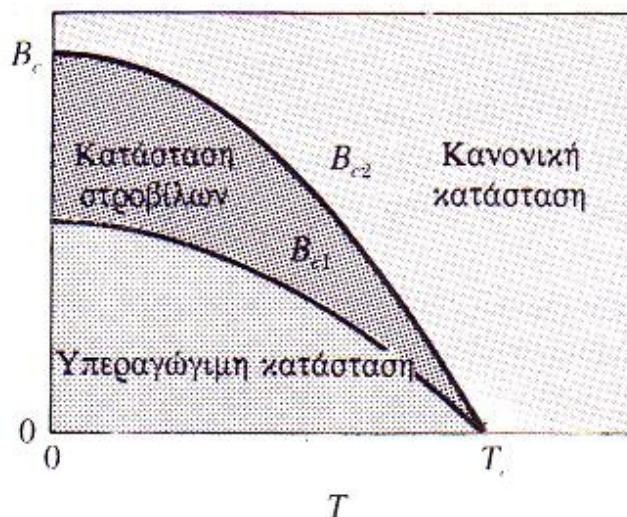
I.

Τα ερωτήματα που τίθενται εδώ είναι γιατί αυτά τα μεγέθη παίζουν το μεγαλύτερο ρόλο και γιατί οι υπεραγωγοί II έχουν μεγαλύτερο όριο λ/ξ ?

Το μήκος διεύδυσης λ λειτουργεί ανάμεσα στα όρια της επιφάνειας του υλικού και ανεξαρτήτως τύπου I & II. Το ίδιο και για το μήκος συνάφειας ξ που υπάρχει ανεξαρτήτως είδους υπεραγωγού.

Ο λόγος λ/ξ πάλι έχει μικρότερη τιμή στους υπεραγωγούς τύπου II(όπως τα μέταλλα) επειδή σε αυτούς δαπανάται μεγαλύτερη ενέργεια για να αυξηθεί ο μήκος διεύδυσης λ (αφού οι υπεραγωγοί τύπου II τείνουν να σχηματίζουν όσα περισσότερα όρια μπορούν ανάμεσα στην κανονική και την υπεραγωγίμη κατάσταση) με αποτέλεσμα το μήκος συνάφειας ξ να είναι λιγότερο ευσταθές αφού δαπανάται για την διατήρηση του μικρότερη ενέργεια.

Σχήμα 7. Μικτή κατάσταση υπεραγωγιμότητας σε υπεραγωγούς τύπου II συναρτήσει του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και της θερμοκρασίας



Το πιο ενδιαφέρον σχετικά με τους υπεραγωγούς τύπου II είναι η ενδιάμεση κατάσταση.

Η ενδιάμεση κατάσταση (mixed state or flux pinning) εμφανίζεται στους υπεραγωγούς τύπου II για εντάσεις μαγνητικού πεδίου μεταξύ της άνω και κάτω κρίσιμης τιμής. Αποτέλεσμα είναι η σταδιακή διείσδυση των δυναμικών γραμμών μέσα στο υλικό δημιουργώντας κανονικές περιοχές (normal phases) που βρίσκονται σε επαφή με τις υπεραγωγίμες περιοχές. Η διείσδυση του πεδίου, κατά περιοχές, δημιουργεί τα λεγόμενα ροοειδή ή φλαξόνια (fluxoids ή vortices), τα οποία διατάσσονται κατά κανονικό τρόπο δημιουργώντας το λεγόμενο πλέγμα Abrikosov και περιστοιχίζονται από κυκλικά υπερρεύματα (supercurrents).

Στο κέντρο καθενός από αυτά τα φλαξόνια, το μαγνητικό πεδίο έχει την μέγιστή του τιμή και ελαττώνεται εκθετικά προς τα έξω, με χαρακτηριστικό βάθος διείσδυσης, δηλαδή ακτίνα του φλαξονίου, μικρότερο του λ . Πηγή που δημιουργεί το B σε κάθε φλαξόνιο είναι τα υπερρεύματα που το περιβάλλουν, τα οποία και θωρακίζουν την υπόλοιπη υπεραγωγίμη φάση του υλικού. Αντίθετα με την αύξηση της έντασης του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλείται ο ερπυσμός και η εξάπλωση των φλαξονίων (flux creep) λόγω της αύξησης της δύναμης Lorentz, με αποτέλεσμα την μείωση της έκτασης της υπεραγωγίμης φάσης.

Όταν ένας υπεραγωγός τύπου II βρίσκεται στη μικτή κατάσταση και εάν τα ρεύματα είναι επαρκώς μεγάλα, έχει παρατηρηθεί ότι τα φλαξόνια μπορεί να κινηθούν κάθετα προς την διεύθυνση του ρεύματος μέσα και έξω από τον υπεραγωγό χωρίς αντίσταση. Αυτό συμβαίνει γιατί ο υπεραγωγός ψάχνει πάντοτε τη θερμοδυναμικά σταθερότερη κατάσταση στο δεδομένο μαγνητικό πεδίο.

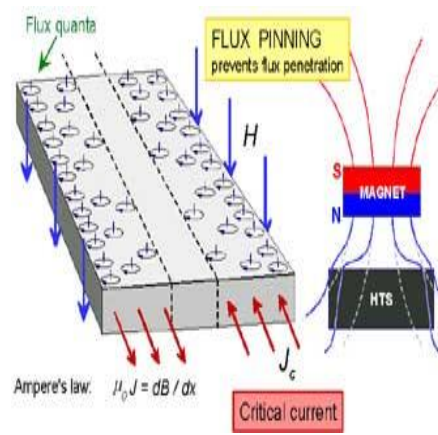
Η κίνηση αυτή των φλαξονίων αντιστοιχεί σε μεταβολή της ροής συναρτήσει του χρόνου και μεταφράζεται σε ηλεκτρική αντίσταση. Οι ακαθαρσίες και οι ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος θέτουν εμπόδια στην μεταπήδηση των φλαξονίων προκαλώντας το φαινόμενο της αγκύρωσης των φλαξονίων (flux pinning effect).

Η αγκύρωση των φλαξονίων έχει ενδιαφέρουσες συνέπειες:

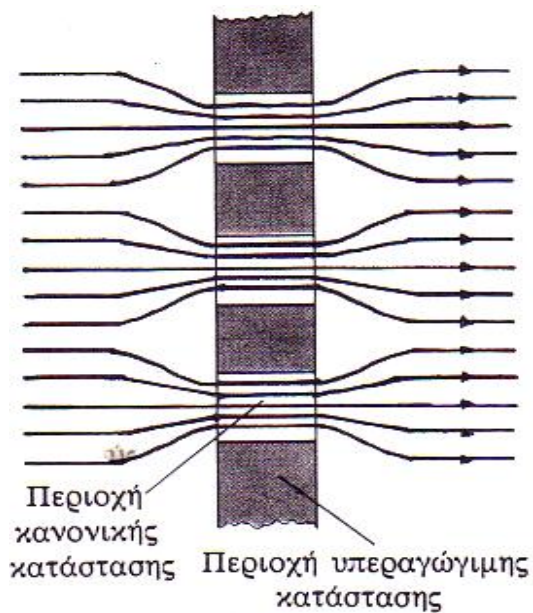
- ❖ Κάνει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις μηδενικές.
- ❖ Γενικά οι καμπύλες μαγνήτισης είναι αντιστρεπτές και κάθε μία τιμή του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου δίδει μία μόνον τιμή του εσωτερικού πεδίου B . Κατά την αγκύρωση των φλαξονίων ωστόσο, η κατάσταση αλλάζει και είναι δυνατόν να διαφέρει το πεδίο μέσα στον υπεραγωγό από το πεδίο ενός ιδεώδους υπεραγωγού τύπου II.

Η κρίσιμη τιμή του ρεύματος, στους υπεραγωγούς τύπου II, προσδιορίζεται από την τιμή του ρεύματος η οποία όταν πολλαπλασιαστεί επί την

μαγνητική ροή στα φλαξόνια δίνει τη δύναμη Lorentz, η οποία είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη αγκύρωσης.



Σχήμα 8 'Διάτρηση' μέρους του υλικού από μαγνητικές γραμμές στη μικτή κατάσταση υπεραγωγιότητας.

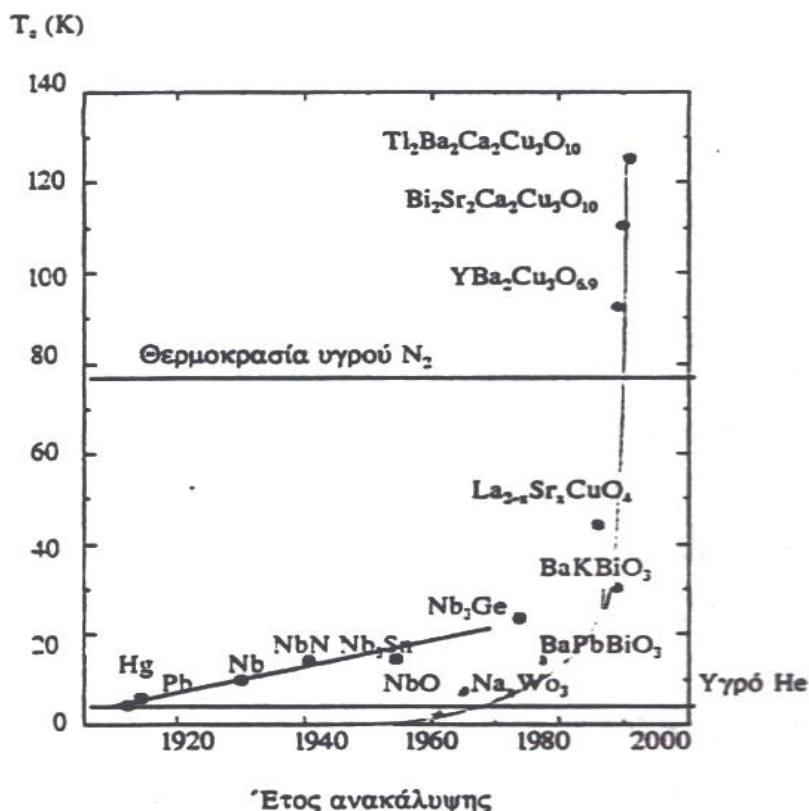


Η μεταλλουργική κατεργασία των υπεραγωγών πολλές φορές βελτιώνει την υπεραγωγιότητα τύπου II (αύξηση του J_c) λόγω προσμίξεων ή πυκνότητας διαταραχών κατά την διαμόρφωση.

(ii) Οι Υπεραγωγοί υψηλών κρίσιμων θερμοκρασιών ($high T_c$)^{4,5}

Οι υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών είναι μια ομάδα υπεραγωγών τύπου II που έχουν κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από 30K.

Το γιατί παρουσιάζουν τόσο υψηλή θερμοκρασία μετάβασης παραμένει ένα από τα μεγάλα άλυτα προβλήματα της φυσικής. Διάφορες εξηγήσεις έχουν δοθεί αλλά καμία δεν κατάφερε να λύσει όλα τα προβλήματα.



Διάγραμμα 9: Ιστορική αναδρομή στους υπεραγωγούς

Η ανακάλυψη τους, ειδικά όσων έχουν κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από το σημείο βρασμού του υγρού άζωτου (77K) τράβηξε άμεσα την προσοχή των ερευνητών επί του χώρου. Αν είναι δυνατή η παραγωγή ενός υπεραγωγού με T_c θερμοκρασίας δωματίου που θα είναι εύκολα παρασκευασμένος τότε θα ακολουθούσε μια τεχνολογική επανάσταση. Ωστόσο μέχρι τώρα έξω από βιομηχανίες, νοσοκομεία και ερευνητικά κέντρα οι υπεραγωγοί παραμένουν ένα άπιαστο όνειρο.

Ανάμεσα σε αυτούς τους υπεραγωγούς είναι και το MgB_2 , ένα συνηθισμένο υλικό που παρουσιάζει την ψηλότερη θερμοκρασία μετάβασης (39K) ανάμεσα στους συμβατικούς υπεραγωγούς.

Το ενδιαφέρον για τις δυνατότητές του είναι μεγάλο γιατί είναι φθηνή τόσο η διαμόρφωση όσο και η παραγωγή του.

Όσο πιο υψηλή είναι η κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης στην υπεραγωγίμη κατάσταση τόσο περισσότερα πλεονεκτήματα έχουν οι υπεραγωγοί. Η ψύξη με υγρό άζωτο είναι 50 φορές φτηνότερη από την ψύξη με υγρό ήλιο και η

ψυκτική εγκατάσταση πολύ φτηνότερη. Επίσης, η κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων είναι πιο εύκολη όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία.

Δ) Χαρακτηριστικά φαινόμενα υπεραγωγών.^{1,4}

I. Το φαινόμενο Meissner (Meissner effect)

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών είναι τόσο σημαντικές όσο και οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Οι μαγνητικές ιδιότητες όμως δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη θεωρώντας ότι η υπεραγώγιμη κατάσταση χαρακτηρίζεται αποκλειστικά και μόνο από την μηδενική ηλεκτρική αντίσταση.

Το 1933 οι W. Meissner και R. Ochsenfeld καθώς μετρούσαν την κατανομή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό δειγμάτων κασιτέρου και μόλυβδου, κατά την ψύξη τους κάτω από την θερμοκρασία μετάβασης τους T_c παρουσία μαγνητικού πεδίου, διαπίστωσαν ότι τα δείγματα στην κρίσιμη θερμοκρασία τους έγιναν αυθόρμητα τέλει διαμαγνήτες αποβάλλοντας όλη τη μαγνητική ροή από το εσωτερικό τους. Αυτό το πείραμα απέδειξε για πρώτη φορά ότι οι υπεραγωγοί είναι τέλεια διαμαγνητικά υλικά παρουσιάζοντας την εξής ιδιότητα: Όταν η ηλεκτρική αντίσταση σε έναν υπεραγωγό γίνει μηδενική, τότε η επιβολή σε αυτόν ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου επάγει στο εσωτερικό του τέτοια ρεύματα ($I = -L \frac{d\Phi}{dt}$), ώστε να μηδενίζεται η ολική μαγνητική ροή Φ σε αυτό.

Δηλαδή μέσα σε ένα υλικό υπάρχουν μαγνητικά δίπολα που δημιουργούν μόνο τους ένα μαγνητικό πεδίο εντός του υλικού ικανό να ενισχύσει ή να αποσβέσει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι αντίρροπο του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου ή ομόρροπο.

Υλικά που το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό ενισχύεται αν περάσει μέσα από αυτά (επειδή το μαγνητικό τους πεδίο γίνεται ομόρροπο του εξωτερικού) λέγονται φερρομαγνητικά ή σιδηρομαγνητικά.

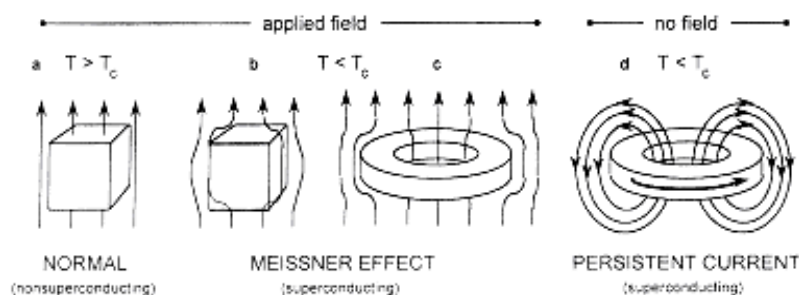
Υλικά που το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό δεν μεταβάλλεται αν περάσει μέσα από αυτά (επειδή το μαγνητικό τους πεδίο είναι ανύπαρκτο) λέγονται διαμαγνητικά.

Υλικά που το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό αποσβένεται αν περάσει μέσα από αυτά (επειδή το μαγνητικό τους πεδίο γίνεται αντίρροπο του εξωτερικού) λέγονται παραμαγνητικά και στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο χαρακτηρισμός των υπεραγωγών που περιγράφει το φαινόμενο Meissner.

Όταν πλέον ένας υπεραγωγός διαρρέεται από μαγνητική ροή Φ σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της T_c, τότε η μαγνητική ροή διέρχεται μέσα από το υλικό αφού. Αν η θερμοκρασία του γίνει ίση ή μικρότερη της T_c, τότε η μαγνητική ροή παύει να διέρχεται μέσα από το υλικό του υπεραγωγού και διέρχεται έξω από αυτό. Όταν λοιπόν στη συνέχεια μηδενίσουμε το

εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, η μαγνητική ροή Φ παγιδεύεται στο εσωτερικό του δακτυλίου και αναπτύσσεται σε αυτόν τέτοιο ρεύμα ώστε η Φ να διατηρείται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. (Έχει καταστεί δυνατή η διατήρηση ακόμη και για ένα χρόνο). Μάλιστα σε ένα τέτοιο πείραμα που έγινε από τον S.S.Collins στη Βρετανία το 1956, το ηλεκτρικό ρεύμα παρέμεινε σταθερό διαρρέοντας έναν υπεραγωγό δακτύλιο επί 2,5 χρόνια.

Το φαινόμενο της μη εισόδου των μαγνητικών γραμμών στο εσωτερικό του υπεραγωγού, ονομάζεται φαινόμενο **Meissner (Meissner effect)** (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 10: Εγκλωβισμός μαγνητικής ροής εντός δακτυλίου

Απόρροια αυτής της μοναδικής ιδιότητας των υπεραγωγών είναι το εξής φαινόμενο: Όταν πάνω σε έναν υπεραγωγό, ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία ίση ή μικρότερη της T_c του, τοποθετηθεί ένας μαγνήτης τότε παρατηρούμε ότι ο μαγνήτης δεν μένει σταθερός πάνω στον υπεραγωγό αλλά αιωρείται ακριβώς πάνω από αυτόν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητική αιώρηση (levitation), και παρατηρήθηκε πρώτη φορά σε πειράματα που διεξήγαγε ο Ρώσος φυσικός V.K.Arkadyev το 1945. αυτό συμβαίνει γιατί ο υπεραγωγός πλέον δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο όμοιο με το εξωτερικά επιβαλλόμενο με αποτέλεσμα από τον νόμο του Faraday να δημιουργείται απωστική δύναμη μεταξύ του μαγνήτη και του υπεραγωγού.



Σχήμα 11: Μαγνητική αιώρηση μαγνήτη πάνω από έναν υπεραγωγό ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη της T_c

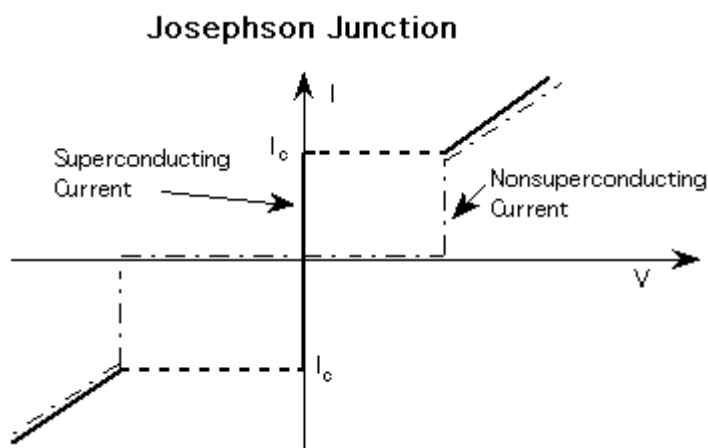
Το κυριότερο χαρακτηριστικό του Meissner effect είναι το ότι η παγιδευμένη ροή σε υπεραγωγό μπορεί να λάβει μόνο διακριτές τιμές, δηλαδή $\Phi = n \cdot \Phi_0$ (18), όπου η ποσότητα Φ_0 ονομάζεται φλαξόνιο και

αντιστοιχεί σε ένα κβάντο μαγνητικής ροής, έχοντας τιμή ίση με $\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$.

II.. Το φαινόμενο Josephson (Josephson effect)

Αν δύο μέταλλα χωρίζονται από ένα μονωτή, αυτός παίζει τον ρόλο του φράγματος δυναμικού και εμποδίζει την διακίνηση των ηλεκτρονίων από το ένα μέταλλο στο άλλο. Εάν όμως το πάχος του μονωτή είναι πολύ μικρό, της τάξης των 2nm, τότε τα ηλεκτρόνια μπορούν να το διαπεράσουν για μια διαφορά δυναμικού. Στην περίπτωση που αντί για μέταλλο έχουμε υπεραγωγό και πιο συγκεκριμένα ένα υπεραγωγίμο δακτύλιο στον οποίο έχει εγκλωβιστεί μαγνητική ροή και ο οποίος δεν είναι συνεχής αλλά διακόπτεται από μονωτικό υλικό πάχους μικρότερου του μήκους συνάφειας ξ (coherence length) που θα εξηγηθεί παρακάτω, τότε τα ηλεκτρόνια διέρχονται διαμέσου του μονωτή (Josephson tunneling) χωρίς να προκαλέσουν πτώση τάσης σε αυτόν όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4. Δηλαδή ο μονωτής ουσιαστικά είναι αόρατος για τα ηλεκτρόνια. Με άλλα λόγια αν δύο υλικά σε υπεραγωγίμη φάση χωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα μονωτή, τότε το ρεύμα μπορεί να περάσει από το ένα υλικό στο άλλο αγνοώντας τον μονωτή και ταυτόχρονα να διατηρεί την υπεραγωγίμη κυματοσυνάρτησή του!

Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **Josephson effect** και η ένωση υπεραγωγού-μονωτή-υπεραγωγού (S.I.S.) ονομάζεται **Josephson junction**.



Σχήμα 12: Απεικόνιση συμπεριφοράς ένωσης S.I.S. στην διέλευση ρεύματος

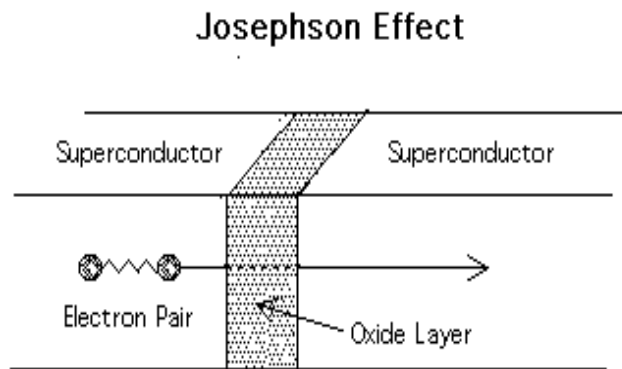
Ανακαλύφθηκε το 1962 από τον Άγγλο φυσικό B. Josephson ο οποίος πρόβλεψε ότι εάν δυο υπεραγωγίμα υλικά τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο και διαχωρίζονται μόνο από ένα πολύ λεπτό μονωτικό στρώμα ($<10^{-7} \text{ cm}$), τότε τα δύο υπεραγωγίμα υλικά θα διαρρέονται από συνεχές ρεύμα χωρίς την εφαρμογή τάσης στα άκρα του μονωτή. Το φαινόμενο αυτό όντως παρατηρήθηκε και εξηγείται από το γεγονός ότι το διαχωριστικό

στρώμα είναι πολύ λεπτό έτσι ώστε ζεύγη ηλεκτρονίων έχουν τόσο μεγάλη ενέργεια που περνούν από τον έναν υπεραγωγό στον άλλον χωρίς διάχυση, ονομάστηκε δε dc φαινόμενο Josephson. Το αποτέλεσμα του φαινόμενου είναι η εμφάνιση υπεραγωγίμου ρεύματος με πυκνότητα

$$J_s = J_c \sin\varphi \quad (19)$$

όπου J_c η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος για $\varphi=90^\circ$ και φ η διαφορά φάσεων των κυματοσυναρτήσεων του ζεύγους στον κάθε υπεραγωγό.

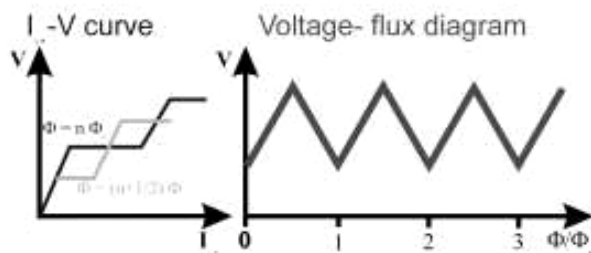
Στο φαινόμενο Josephson δηλαδή η τάση κατά μήκος της επαφής εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο. Ένα μικρό μαγνητικό πεδίο μπορεί να μειώσει το ρεύμα Josephson, προκαλώντας την εμφάνιση μιας τάσης στην επαφή. Όταν η επαφή γίνεται αντιστάτης, παραμένει μέχρι το ρεύμα κατά μήκος της επαφής να εξαλειφθεί



Σχήμα 13: Μηχανισμός του φαινόμενου Josephson

Προβλέφθηκε και παρατηρήθηκε βέβαια και το ac φαινόμενο Josephson. Αυτό συμβαίνει όταν εφαρμοσθεί διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο υπεραγωγών οι οποίοι διαχωρίζονται με λεπτό μονωτικό στρώμα. Στην περίπτωση αυτή θα παρατηρήσουμε ότι οι υπεραγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (ac current).

Σε έναν υπεραγωγίμο δακτύλιο με S.I.S. επαφή, η παγιδευμένη ροή δεν δύναται να διατηρηθεί όταν επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο, διότι καθώς η εξωτερικά επιβαλλόμενη ροή αυξάνει, ομοίως αυξάνει και το ρεύμα θωράκισης έως την τιμή του κρίσιμου ρεύματος κατωφλίου I_c , η οποία τιμή εξαρτάται από το μήκος και το υλικό της ένωσης S.I.S.. Έτσι η πτώση τάσεως στα άκρα της ένωσης επιβραδύνει την περαιτέρω αύξησή του με αποτέλεσμα ο δακτύλιος να μην μπορεί να διατηρήσει την ροή του που αυξάνει με διακριτό τρόπο κατά $n \cdot \Phi_0$ με $n=1,2,\dots$



Διάγραμμα 14: Απεικόνιση της πτώσης τάσης στα άκρα της ένωσης S.I.S.

III. Κβάντωση της μαγνητικής ροής

Η κβάντωση της μαγνητικής ροής προβλέφτηκε από τον φυσικό Fritz London.

Είναι ένα τόσο περίεργο φαινόμενο που κανείς δεν της έδωσε σημασία για πολλά χρόνια. Αντιθέτως ο Fritz London σε μια ένδειξη της διάνοιάς του, πρότεινε πως η μαγνητική ροή που περνά μέσα από υπεραγωγίμο δακτυλίδι μπορεί να θεωρηθεί κβαντισμένη και διατύπωσε την άποψη ότι η παγιδευμένη ροή είναι κβαντισμένη σε ακέραια πολλαπλάσια του h/e . Δυστυχώς στην εποχή του ήταν αδύνατο με τα τεχνικά μέσα της εποχής να ελέγξει την ορθότητα των θεωριών του.

Το ηλεκτρικό φορτίο e υπεισέρχεται στο παρανομαστή διότι ο London υπέθεσε ότι το υπερρέυμα προέρχεται από μοναχικά (μονήρη) ηλεκτρόνια. Ωστόσο πειράματα μεγάλης ευαισθησίας που έγιναν με τη χρησιμοποίηση πολύ μικρών κυλινδρικών δακτυλίων απέδειξαν ότι το κβάντο της μαγνητικής ροής ήταν το ήμισυ της τιμής την οποία είχε δώσει εντελώς αξιωματικά ο London. Με άλλα λόγια, η μαγνητική ροή δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του h/e , αλλά του $h/2e$. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια όπως αναλύθηκε στην BCS θεωρία εμφανίζονται ανά ζεύγη. Όπως έχουμε ήδη πει η παγιδευμένη ροή σε υπεραγωγό μπορεί να λάβει μόνο διακριτές τιμές, δηλαδή $\Phi = n\Phi_0$ (18), όπου $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$.

Οι κυματοσυναρτήσεις των ηλεκτρονίων που αλληλεπιδρούν όταν το κύκλωμα διαρρέεται κάθετα από μαγνητική ροή, επιτρέπουν την μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου διαμέσου του μονωτικού υλικού για κάθε κβάντο μαγνητικής ροής

IV. Το φαινόμενο Podkletnov (ένα πολλά υποσχόμενο για αυτό και αμφιλεγόμενο φαινόμενο).¹⁴

Το 1992 ο Evgeny Podkletnov δούλεψε πάνω στους περιστρεφόμενους υπεραγωγούς στο πολυτεχνείο του Tampere. Καθώς μελετούσαν έναν περιστρεφόμενο υπεραγωγίμο δίσκο, ο καπνός από την πίπα κάποιου ερευνητή, ενώ διαχεόταν κανονικά μέσα σε όλο το δωμάτιο με το που έφτανε πάνω από τον δίσκο ανέβαινε ξαφνικά κατακόρυφα σε στήλη. Μελετώντας αυτό το φαινόμενο, τοποθετώντας πάνω από υπεραγωγίμους δίσκους διάφορα υλικά, ανεξαρτήτως αγωγιμότητας. Παρατήρησε πως έχαναν περίπου το 0.2% του βάρους τους.

Επαναλαμβάνοντας τα πειράματα το 1996 βρήκε πως μπορεί σε ένα σώμα πάνω από έναν υπεραγωγό η βαρυτική δύναμη να είναι μειωμένη μέχρι και 2%. Μάλιστα το φαινόμενο ήταν εντονότερο αν ο υπεραγωγός περιστρεφόταν.

Έγραψε ένα επιστημονικό άρθρο με τα συμπεράσματά του στο Journal of Physics D, το οποίο αρχικά εγκρίθηκε για δημοσίευση. Ωστόσο το πρωτότυπο άρθρο διέρρευσε και οι εφημερίδες κυκλοφόρησαν άρθρα με τίτλους όπως «Η πρώτη αντιβαρυτική συσκευή του πλανήτη σε λειτουργία» (Sunday Telegraph).

Αμέσως μετά το περιοδικό ακύρωσε τη δημοσίευση του άρθρου ενώ δέχθηκε μια τρομερή επίθεση από διάφορους άλλους φυσικούς. Απολύθηκε από το πολυτεχνείο και αργότερα προσελήφθηκε σε ένα υπεραγωγίμο ερευνητικό κέντρο στη Μόσχα το οποίο δεν κατονόμασε.

Πρόσφατα σε συνεργασία με τον Ιταλό φυσικό Giovanni Modanese του Free University of Bozen-Bolzano ισχυρίζονται πως κατάφεραν να φτιάξουν μια συσκευή που μπορεί να μετατοπίσει ένα εκκρεμές κατά 200 μέτρα εκπέμποντας κάτι σαν «βαρυτική ακτίνα».

Παρότι διάφορες άλλες ερευνητικές ομάδες δημοσίευσαν ανάλογα αποτελέσματα, τα ακριβή πειράματα της ομάδας του δεν επαναλήφθηκαν από καμία άλλη ομάδα.

Οι χαρακτηρισμοί που συνοδεύουν τον Podkletnov μέχρι στιγμής από την επιστημονική κοινότητα είναι διχασμένοι και ορισμένοι από αυτούς ακραίοι. Μένει να αποδειχθεί στο μέλλον αν έχουν δίκιο.

E) Χαρακτηριστικές ιδιότητες υπεραγωγών.^{1,4,5,6}

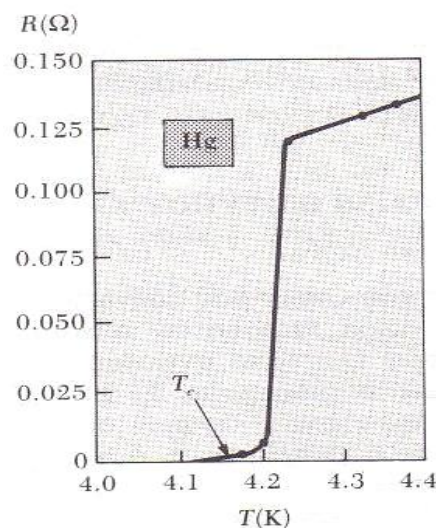
I. Όρια της υπεραγωγίμης κατάστασης

Η διακριτή εξωτερική ιδιότητα των υπεραγωγών είναι η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος με μηδενικές απώλειες ενέργειας. Η ιδιότητα αυτή

όμως, περιορίζεται από τρία όρια πέρα από τα οποία χάνεται και πλέον το υλικό συμπεριφέρεται σαν όλα τα υπόλοιπα.

Το ένα όριο το οποίο οριοθετεί την κατάσταση υπεραγωγιμότητας, είναι η κρίσιμη θερμοκρασία T_c , η οποία είναι χαρακτηριστική του κάθε υλικού. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της ηλεκτρικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για τον υδράργυρο (Σχήμα 15)⁶, καμπύλη την οποία δημοσίευσε ο Ohnes, φαίνεται πως μέχρι την T_c , η αντίσταση του υλικού ακολουθεί κανονικά τον νόμο του Ohm και ξαφνικά στους 4,15K πέφτει στο μηδέν. Άρα, για να έχουμε κατάσταση υπεραγωγιμότητας, πρέπει να βρισκόμαστε στην θερμοκρασιακή περιοχή στην οποία το υλικό παρουσιάζει τις ιδιότητες αυτές.

Διάγραμμα 15: Η αντίσταση του υδραργύρου σε σχέση με τη θερμοκρασία και η μετάπτωσή του σε υπεραγωγίμη κατάσταση στους 4,15K



Ένα δεύτερο όριο στην υπεραγωγίμη κατάσταση τίθεται από το μαγνητικό πεδίο. Όπως παρατηρείται από τον πίνακα 1⁵, υπάρχει ένα μέγιστο μαγνητικό πεδίο H_c , ορισμένο για συγκεκριμένη θερμοκρασία η οποία είναι οπωσδήποτε κάτω από την κρίσιμη, πέρα από το οποίο «καταστρέφεται» η υπεραγωγίμη κατάσταση. Όπως είναι κατανοητό, το μέγιστο μαγνητικό πεδίο το οποίο ονομάζεται κρίσιμο μαγνητικό πεδίο H_c και υπό το οποίο μπορεί να βρεθεί το υλικό και να παραμείνει σε υπεραγωγίμη κατάσταση δεν είναι σταθερό και συγκεκριμένο, αλλά είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται το υλικό. Πιο συγκεκριμένα, το κρίσιμο μαγνητικό πεδίο H_c σχετίζεται θερμοδυναμικά με την ελεύθερη ενεργειακή διαφορά μεταξύ της κανονικής και της υπεραγωγίμης κατάστασης σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο. Το H_c προσδιορίζεται εξισώνοντας την ενέργεια $H^2/8\pi$ ανά μονάδα όγκου, που σχετίζεται με τη κατακράτηση του πεδίου εκτός της μάζας του υλικού και ενάντια της μαγνητικής πίεσης (φαινόμενο

Meissner), με την ελεύθερη ενεργειακή διαφορά μεταξύ της κανονικής και της υπεραγωγίμης κατάστασης.

Δηλαδή:
$$\frac{H_c^2(T)}{8\pi} = f_n(T) - f_s(T) \quad (20)$$

όπου f_n και f_s είναι οι ελεύθερες ενέργειες του Helmholtz ανά μονάδα όγκου στην κανονική και υπεραγωγίμη κατάσταση αντίστοιχα σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο.

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:

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (21)$$

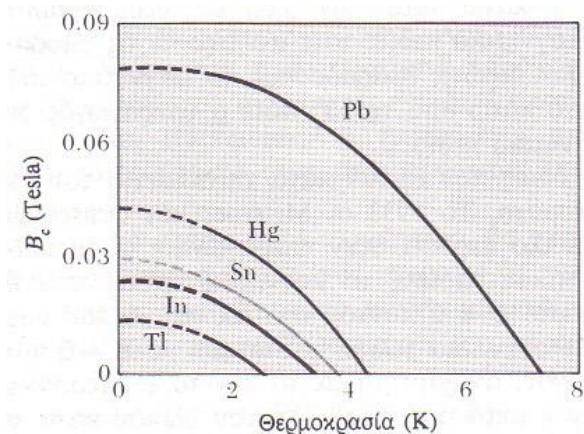
όπου H_0 η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε θερμοκρασία 0K.

<i>Υπεραγωγός</i>	<i>T_c(K)</i>	<i>H_c σε 0 K(Tesla)</i>
<i>Al</i>	1.196	0.0105
<i>Ga</i>	1.083	0.0058
<i>Hg</i>	4.153	0.0411
<i>In</i>	3.408	0.0281
<i>Nb</i>	9.26	0.1991
<i>Pb</i>	7.193	0.0803
<i>Sn</i>	3.722	0.0305
<i>Ta</i>	4.47	0.0829
<i>Ti</i>	0.39	0.010
<i>V</i>	5.30	0.1023
<i>W</i>	0.015	0.000115
<i>Zn</i>	0.85	0.0054

Πίνακας 1. Κρίσιμη θερμοκρασία και κρίσιμο εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο για διάφορα στοιχεία

Από την παραβολική αυτή εξίσωση είναι προφανές ότι παίρνουμε τη μέγιστη τιμή του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου όταν $T=0K$. Επειδή είναι ακόμα αδύνατο να ψυχθεί κάτι στους 0K, βρίσκουμε την μέγιστη τιμή του H_c , το $H_c(0)$, προσδιορίζοντας το H_c στη χαμηλότερη θερμοκρασία που

μπορούμε να φτάσουμε και στη συνέχεια προεκτείνουμε στους 0Κ. Να σημειωθεί ότι το $H_c(0)$ είναι το απόλυτα μέγιστο μαγνητικό πεδίο, πέρα από το οποίο παύει να είναι υπεραγωγίμο ένα υλικό. Με άλλα λόγια, εάν το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο υπερβαίνει το $H_c(0)$ είναι αδύνατο ένα υλικό να γίνει υπεραγωγός σε οιαδήποτε θερμοκρασία. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 16⁶.

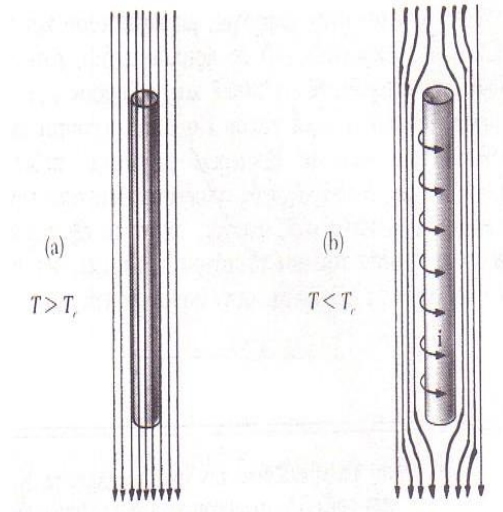


Διάγραμμα 16 Το κρίσιμο εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Κατά αναλογία με την κρίσιμη θερμοκρασία T_c ενός υπεραγωγού ορίζεται και η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος I_c . Πρόκειται για τη μέγιστη τιμή της πυκνότητας ρεύματος που μπορεί να διαρρέει τον υπεραγωγό και να διατηρείται το φαινόμενο της τέλει αγωγιμότητας. Όταν η πυκνότητα του ρεύματος που διαρρέει τον υπεραγωγό υπερβεί την κρίσιμη αυτή τιμή, προκαλείται καταστροφή της υπεραγωγιμότητας. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται υπεραγωγοί ως καλώδια μεταφοράς ρεύματος.

Έστω για παράδειγμα ένα μακρύ κυλινδρικό υπεραγωγίμο καλώδιο (Σχήμα 17) το οποίο μεταφέρει ένα ρεύμα I το οποίο δημιουργεί ένα ομόκεντρο κυκλικό μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του υπεραγωγού, μαγνήτισης $H = \frac{2I}{c\alpha}$ (20^α). Το μαγνητικό αυτό πεδίο είναι εκτός του αγωγού λόγω του προαναφερθέντος φαινομένου Meissner. Όταν τώρα το πεδίο αυξηθεί και φθάσει το κρίσιμο μαγνητικό πεδίο H_c , τότε θα καταστρέψει την υπεραγωγιμότητα. Έτσι το κρίσιμο ρεύμα θα είναι $I_c = \frac{c\alpha H_c}{2}$ (20^β).

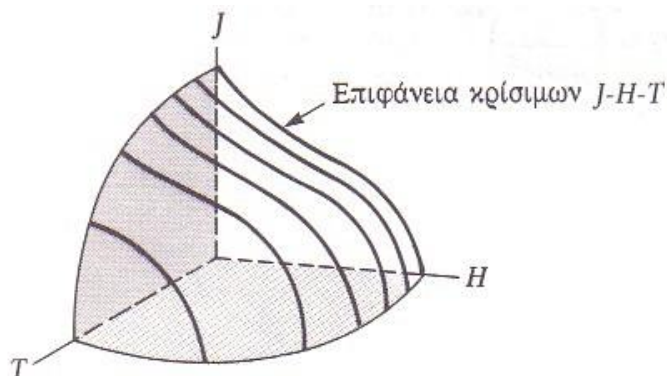
Το κρίσιμο ρεύμα υπολογίζεται αναλυτικά από τις εξισώσεις των London και Maxwell. Συνυπολογίζοντας το βάθος διείσδυσης λ (αναλυτικά στην επόμενη ενότητα), προκύπτει πως η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος είναι $J_c = \frac{I_c}{2\pi\alpha\lambda}$ (20^γ), δηλαδή:



Σχήμα 17. Δημιουργία επιφανειακών δινορρευμάτων που αποτρέπουν την εισχώρηση των μαγνητικών γραμμών στο εσωτερικό του υπεραγωγού

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η εξίσωση του κρίσιμου ρεύματος I_c συναρτήσει του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου H_c εξαρτάται πρώτιστος από τη γεωμετρία του υπεραγωγού.

Στο επόμενο διάγραμμα 18⁶ συγκεντρώνονται οι τρεις περιορισμοί που αναπτύχθηκαν παραπάνω σε ένα σύστημα αξόνων.. Σημειώνεται ότι μέσα από την επιφάνεια και προς το κέντρο των αξόνων έχουμε την υπεραγωγίμη κατάσταση, ενώ σε οποιοδήποτε συνδυασμό J-H-T που βρίσκεται εκτός του χώρου αυτού, δεν υπάρχουν υπεραγωγίμες ιδιότητες.



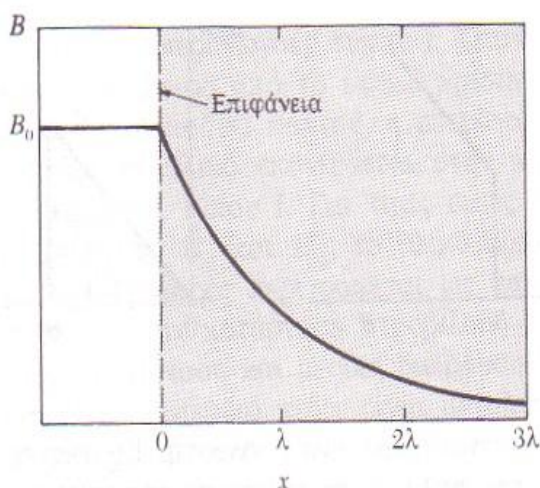
Διάγραμμα 18 Οι τρεις κρίσιμες τιμές της υπεραγωγιμότητας σε συνδυασμό η μία με τις άλλες δύο

II. Το βάθος διείσδυσης (penetration depth)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα μαγνητικά πεδία αποβάλλονται από το εσωτερικό των υπεραγωγών και το υλικό γίνεται τέλεια διαμαγνητικό. Αυτό συμβαίνει με τη δημιουργία επιφανειακών ρευμάτων, τα οποία δημιουργούν τέτοιο μαγνητικό πεδίο το οποίο αντισταθμίζει και εκμηδενίζει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και το εμποδίζει να εισέλθει στο εσωτερικό του υλικού. Στην πραγματικότητα, τα ρεύματα αυτά δεν δημιουργούνται μόνο στην επιφάνεια αλλά διεισδύουν και λίγο μέσα στο κύριο σώμα του υπεραγωγού, σε ένα πάχος στρώματος της τάξης μεγέθους των 10-100 nm το οποίο εξαρτάται από την πυκνότητα των υπεραγωγίμων ηλεκτρονίων στο υλικό, και στο οποίο το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο ελαττώνεται εκθετικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$B(x) = B_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (21)$$

όπου B_0 είναι η τιμή του μαγνητικού πεδίου το οποίο είναι παράλληλο προς την επιφάνεια του υπεραγωγού, x είναι η απόσταση κάποιου σημείου του εσωτερικού του αγωγού από την επιφάνεια και λ είναι η παράμετρος που ονομάζεται βάθος διείσδυσης.



Διάγραμμα 19 Η μαγνήτιση του υπεραγωγού στην επιφάνειά του

Στο διάγραμμα 19 απεικονίζεται η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ενός υπεραγωγού τύπου I, πολύ μεγάλου πάχους εν συγκρίσει με το πάχος του βάθους διείσδυσης, συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια.

Στο σχήμα αυτό ο υπεραγωγός καλύπτει όλη την περιοχή του θετικού άξονα x και όπως φαίνεται, το μαγνητικό πεδίο ελαττώνεται πάρα πολύ σε απόσταση μερικών λ .

Η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από την θερμοκρασία περιγράφεται από την εμπειρική σχέση:

$$\lambda(T) = \lambda_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (22)$$

όπου λ_0 είναι το βάθος διείσδυσης σε $T=0^\circ\text{K}$. Συνεπάγεται από τη σχέση ότι, καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την κρίσιμη τιμή της, το λ τείνει στο άπειρο. Με άλλα λόγια, καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την T_c και ενώ το

δείγμα παραμένει υπεραγωγίμο, το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο διεισδύει όλο και βαθύτερα μέσα στον υπεραγωγό. Τελικά, το μαγνητικό πεδίο καταλαμβάνει όλο τον υπεραγωγό (το λ γίνεται άπειρο) και το υλικό επανέρχεται στην κανονική του κατάσταση.

III. Μήκος συνάφειας και ενεργειακό χάσμα

Μία άλλη σημαντική παράμετρος της υπεραγωγιμότητας είναι το λεγόμενο μήκος συνάφειας ξ (coherence length). Η μέση απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόνια του ζεύγους ονομάζεται **μήκος συνάφειας (ξ)**. Όπως αναλύθηκε στην BCS θεωρία ότι το μήκος συνάφειας είναι η απόσταση κατά την οποία τα ζεύγη Cooper παραμένουν συσχετισμένα δηλαδή μαζί. Να σημειωθεί ότι η σταθερότητα της υπεραγωγίμης κατάστασης εξαρτάται από τον ισχυρό ή όχι συσχετισμό (την αμοιβαία εξάρτηση) των ηλεκτρονίων των ζευγών Cooper.

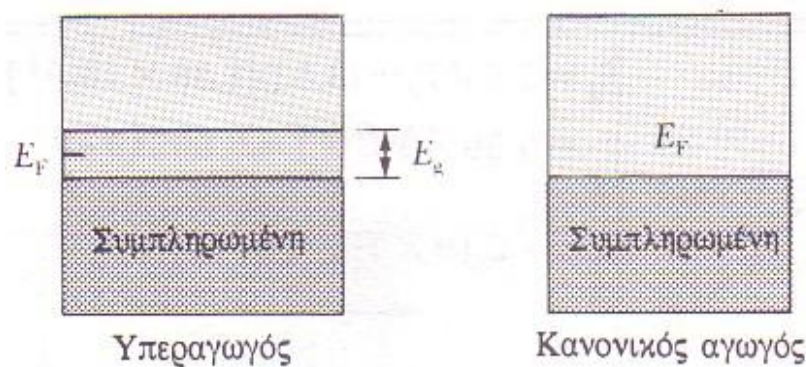
Υπεραγωγός	λ (nm)	ξ (nm)	E_g (meV)
Al	16	160	0,34
Cd	110	760	
Pb	37	83	2,73
Nb	39	38	3,05
Sn	34	23	1,15

Πίνακας 2. Το βάθος διείσδυσης, το μήκος συνάφειας και το ενεργειακό χάσμα διαφόρων κλασσικών υπεραγωγών

Υπάρχει επίσης το ενεργειακό χάσμα E_g ανάμεσα στη θεμελιώδη και τη διεγερμένη κατάσταση του συστήματος το οποίο δεν υφίσταται στους κανονικούς αγωγούς όπως φαίνεται από στο σχήμα 20⁵.

Η ενέργεια Fermi, E_f , των κανονικών αγωγών περιγράφει τη μέγιστη κινητική ενέργεια την οποία μπορούν να έχουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε $T=0 K$.

Το ενεργειακό χάσμα των υπεραγωγών είναι πολύ μικρό, της τάξης κT_c ($\approx 10^{-3}$ eV) στους $0 K$, συγκρινόμενο με αυτό των ημιαγωγών, που είναι περί το 1 eV, ή με την ενέργεια Fermi των κανονικών μετάλλων, η οποία είναι της τάξης των 5eV. Το ενεργειακό χάσμα E_g , των υπεραγωγών αντιστοιχεί στην απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να επιβληθεί για την αποσύζευξη ενός ζεύγους Cooper. Επομένως όσο μεγαλύτερο το ενεργειακό χάσμα τόσο μεγαλύτερη η ευστάθεια της υπεραγωγίμης κατάστασης.



Σχήμα 20

(α) απλουστευμένη παράσταση της δομής των ενεργειακών ζωνών των υπεραγωγών.

Σημειώνεται η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος στις συμπληρωμένες καταστάσεις χαμηλότερης ενέργειας και στις κενές υψηλότερης ενέργειας

(β) Η δομή όμως των ενεργειακών ζωνών των κανονικών αγωγών δεν έχει ενεργειακό

χάσμα. Σε $T=0\text{ K}$ όλες οι καταστάσεις οι οποίες είναι χαμηλότερες από την ενέργεια

Fermi, E_f , είναι συμπληρωμένες, ενώ όλες οι υψηλότερες καταστάσεις είναι κενές.

IV) Ενεργειακό διάκενο(Δ).

Κατά το μετασχηματισμό από την κανονική στην υπεραγώγιμη κατάσταση, παρουσιάζεται αναδιάρθρωση της ηλεκτρονικής δομής κατά τρόπο ώστε τα ηλεκτρόνια να κατανέμονται ανά ζεύγη, τα ζεύγη Cooper όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Η νέα ηλεκτρονική δομή τώρα δημιουργεί ανωμαλία στην συνέχεια των επιτρεπόμενων ενεργειακών σταθμών, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη (2Δ) κοντά στην επιφάνεια Fermi. Η υπέρβαση του ενεργειακού Διακένου (Δ) συνιστά την διάσπαση των ηλεκτρονικών ζευγών και την αναστολή της υπεραγωγιμότητας.

V) Αουτέχεια ειδικής θερμότητας.

Κατά τη μετάβαση από την κανονική στην υπεραγώγιμη κατάσταση, παρατηρείται απότομη αύξηση της ειδικής θερμότητας χωρίς την εμφάνιση της λανθάνουσας θερμότητας. Η απότομη αλλαγή στην ειδική θερμότητα οφείλεται στο ενεργειακό διάκενο (Δ).

Z). Το διβωρίδιο του μαγνησίου MgB_2 .

Στις 10/1/ 2001, από την ερευνητική ομάδα των Ιαπώνων επιστημόνων J. Akimitsu και J. Nagamatsu, ανακαλύφθηκε ότι το διβωρίδιο του μαγνησίου (MgB_2), γνωστό από την δεκαετία του 1950, παρουσιάζει υπεραγώγιμες ιδιότητες με κρίσιμη θερμοκρασία $T_c = 39^\circ\text{ K}$. Η ανακάλυψη

αυτή προκάλεσε το παγκόσμιο ενδιαφέρον αφού το MgB_2 ήταν ο πρώτος συμβατικός υπεραγωγός με τόσο υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία, δηλαδή δεν ήταν οξειδίο. Η κρίσιμη θερμοκρασία μετάπτωσης του υλικού σε υπεραγώγιμη κατάσταση ήταν ασυνήθιστα υψηλή για την απλή δομή που έχει, αφού ήταν σχεδόν διπλάσια από αυτές άλλων απλών ενδομεταλλικών ενώσεων. Έτσι δόθηκε νέα ώθηση στο πεδίο της υπεραγωγιμότητας και οι έρευνες στράφηκαν σε ενώσεις που δεν είναι οξειδία και ειδικότερα σε ενώσεις του Βορίου.

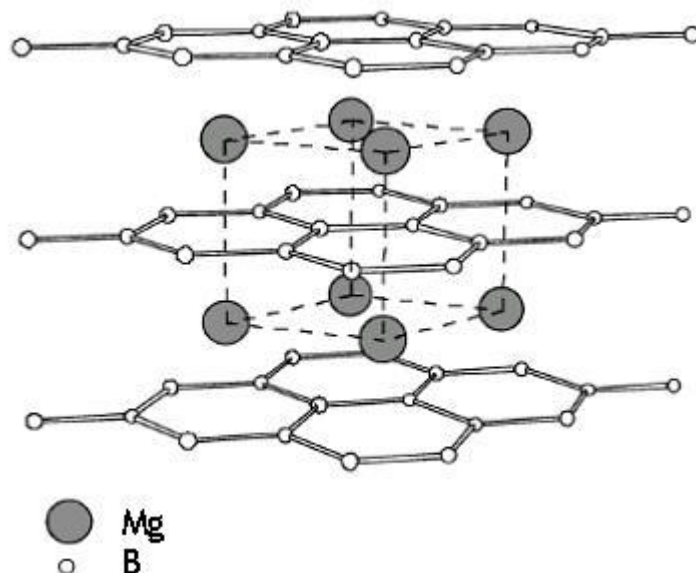
Αυτές οι ευνοϊκές ιδιότητες του MgB_2 του μαγνησίου θέτουν το υλικό αυτό ως ένα ιδανικό σύστημα ώστε να δοκιμαστούν σε αυτό διάφορες θεωρίες της υπεραγωγιμότητας από τις πρώτης αποδοχής εξισώσεις. Επίσης είναι θεμελιώδης η κατανόηση του πως η κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης του υλικού σε υπεραγώγιμη κατάσταση είναι τόσο υψηλή σε σχέση με τα άλλα παρεμφερή σε απλότητα συστήματα. Επίσης, 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 αγώγιμη ηλεκτρονική πυκνότητα και η αγωγιμότητά του στην κανονική κατάσταση είναι μία με δύο τάξεις μαγνήτισης υψηλότερες για το MgB_2 απ' ό,τι των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στα καλώδια.

Αυτές οι ιδιότητες σε συνδυασμό με το μικρό κόστος, το μικρό βάρος και την σχετική ευκολία στην σύνθεσή του και στην δημιουργία του σε μορφή καλωδίων και λεπτών υμενίων, κάνουν το MgB_2 ελκυστικό για πολλές εφαρμογές αφήνοντας πολλές υποσχέσεις για ποικίλλες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας καθώς και ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Η κρυσταλλική δομή του MgB_2 ^{7,2}

Παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευθεί μελέτες για υπεραγωγούς με κρίσιμες θερμοκρασίες έως και 138 K (υπεραγώγιμα 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 οστόσο επίπεδο από το εξάγωνο των ατόμων βορίου. Η κρυσταλλική δομή του MgB_2 δεν διαφέρει από την δομή των περισσότερων βοριδίων, ακολουθώντας έτσι την επονομαζόμενη εξαγωνική δομή τύπου AlB_2 (συμμετρία χώρου $P6/mmm$). Αυτή αποτελείται από γραφιτικού τύπου κυψελοειδείς στοιβάδες ατόμων B (κάθε άτομο B βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο

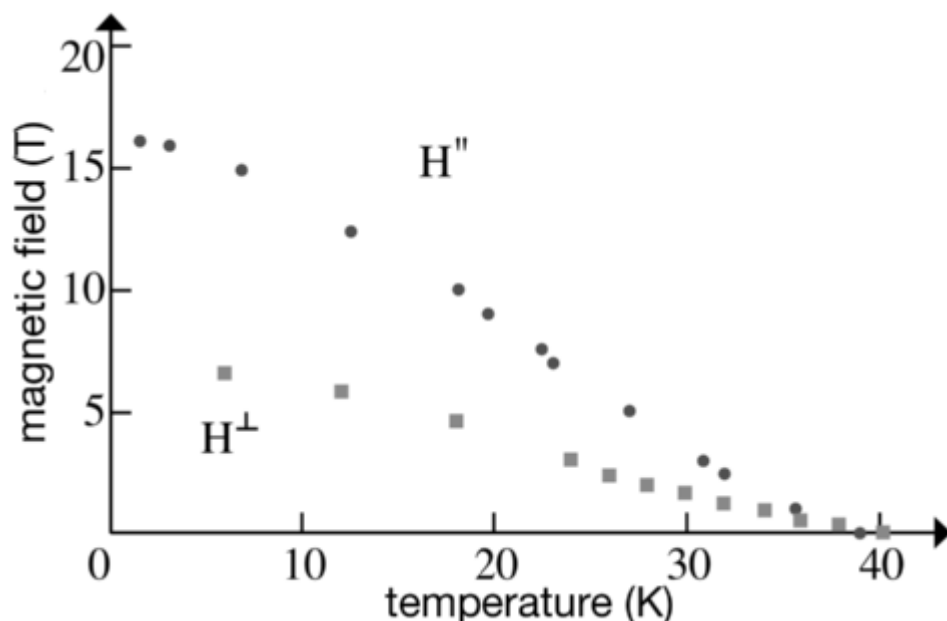
και ισαπέχει από τρία άλλα άτομα B), μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται εξαγωνικής δομής πυκνής διάταξης στοιβάδες ατόμων Mg. Τα άτομα του Mg εντοπίζονται πάνω στον νοητό άξονα που περνά από το κέντρο κάθε εξαγωνικού δακτυλίου που σχηματίζουν τα άτομα B. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται παραστατικά η κρυσταλλική δομή του MgB_2 (για περισσότερες πληροφορίες βλέπε το <7> της βιβλιογραφίας-Nature)



Σχήμα 21: Σχηματική αναπαράσταση της κρυσταλλικής δομής του MgB_2 .

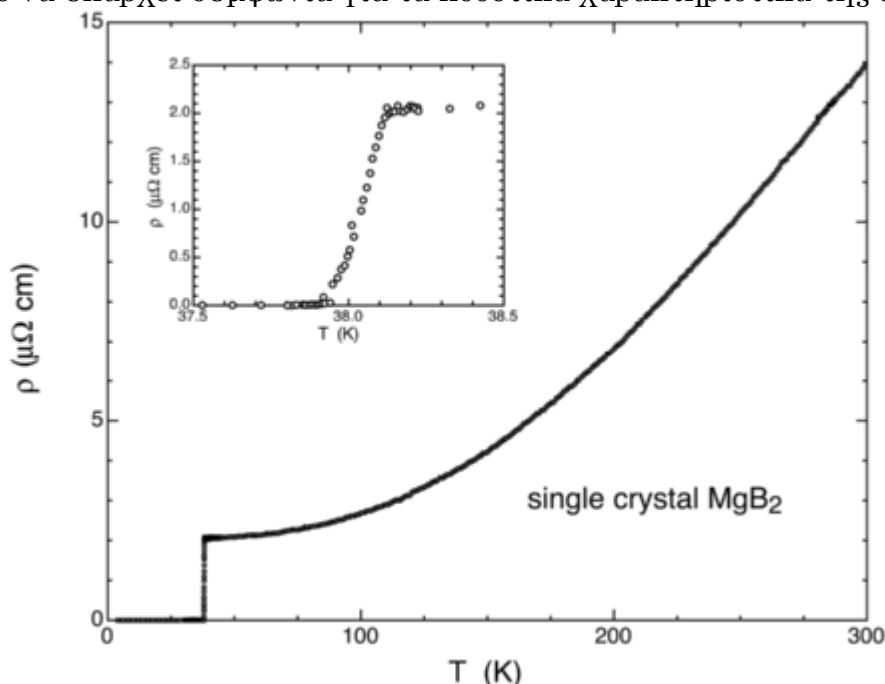
Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του MgB_2 ^{2,7,9,10,11,12,13,15,16}

Το διβωριδίο του Μαγνησίου είναι υπεραγωγός τύπου II με κρίσιμη θερμοκρασία ίση με $T_c=39$ K, μοριακό βάρος $MB=45.93$ g/mol και θερμοκρασία τήξης $T_m=800$. Το χαμηλό κρίσιμο μαγνητικό πεδίο του α είναι στη θερμοκρασία των 0 K, $H_{c1}(0)\sim 0.35$ T, ενώ το άνω κρίσιμο μαγνητικό πεδίο στους 0 K κυμαίνεται μεταξύ $H_{c2}(0)\sim 38$ T. Οι μεταβολές αυτές φαίνονται και στα διαγράμματα 22 και 23.¹⁰ Αν δε το υλικό έχει ακαθαρσίες τότε το άνω κρίσιμο μαγνητικό πεδίο μπορεί μέχρι και να τριπλασιαστεί.⁷ Χαρακτηριστικό του είναι ότι έχει χαμηλή ενέργεια συμπίκνωσης υπό πίεση.



Διάγραμμα 22: Μαγνητικό πεδίο συναρτήσει της Θερμοκρασίας στο MgB₂

Η T_c του MgB₂ 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.



Διάγραμμα 23: Ειδική αντίσταση συναρτήσει της Θερμοκρασίας στο MgB₂

Το μήκος συνάφειας ισούται με $\xi \sim 3.7 \text{ nm}$, ενώ το βάθος διείσδυσης ισούται με $\lambda_0 \sim 850 \text{ \AA}$. Ο λόγος αυτών των δύο δίνει παράγοντα GL $\kappa = \lambda/\xi \sim 22.973$ και είναι χαρακτηριστικός του υλικού.²

Οι διαστάσεις των σχηματιζόμενων εξαγωνικών κυψελίδων του διβοριδίου του Μαγνησίου είναι $a=b=3.086 \text{ \AA}$ και $c=3.524 \text{ \AA}$.¹¹

Τέλος η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος σε εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο 1-2T και σε θερμοκρασία 20 K βρέθηκε να είναι

$J_c=10^5$ A/cm² ¹², ενώ υπό μηδενικό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και σε θερμοκρασία 4.2K βρέθηκε $J_c=10^5$ A/cm² ¹³.

Η σχέση που δίνει την κρίσιμη πυκνότητα του ρεύματος συναρτήσει των διαστάσεων του δείγματος δεν είναι σταθερή. Αναλόγως τη βιβλιογραφία έχουν προταθεί οι τύποι:

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a - \frac{a^2}{3b}} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (23a) \text{ για το <8> της βιβλιογραφίας}$$

$$J_c = \frac{3\Delta M}{2r} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (23b) \text{ για το <15> της βιβλιογραφίας}$$

$$J_c = \frac{3\Delta M}{2\Omega r} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (23\gamma) \text{ για το <16> της βιβλιογραφίας}$$

με ΔM τη διαφορά της μαγνητικής υστέρησης(M) και μονάδες[emu/cm²], r η ακτίνα του δείγματος, Ω ο όγκος του και a,b(cm) οι διαστάσεις της επιφάνειας του δείγματος. Και οι τρεις τύποι στηρίζονται στις παραδοχές του προτύπου του Bean.

Αν μάλιστα το δείγμα νοθευθεί (doping) η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να φέρει αυξάνεται(με την αντίστοιχη πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας).

Η ύπαρξη δύο ενεργειακών χάσμάτων στο MgB₂ έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά και οφείλεται στα τροχιακά των δεσμών B₂ και Mg. Το πρώτο ενεργειακό χάσμα(και μεγαλύτερο) οφείλεται στο σ τροχιακό(εξού και ο συμβολισμός Δσ) ενώ το δεύτερο και μικρότερο ενεργειακό χάσμα οφείλεται στο π τροχιακό(Δπ). Το μέγεθος του πρώτου ενεργειακού χάσματος είναι $\frac{2\Delta\sigma}{k_B T_c} \sim 4.5$ ενώ του δεύτερου $\frac{2\Delta\pi}{k_B T_c} \sim 1.7$ σε θερμοκρασία πλησίον του κρισιμίου

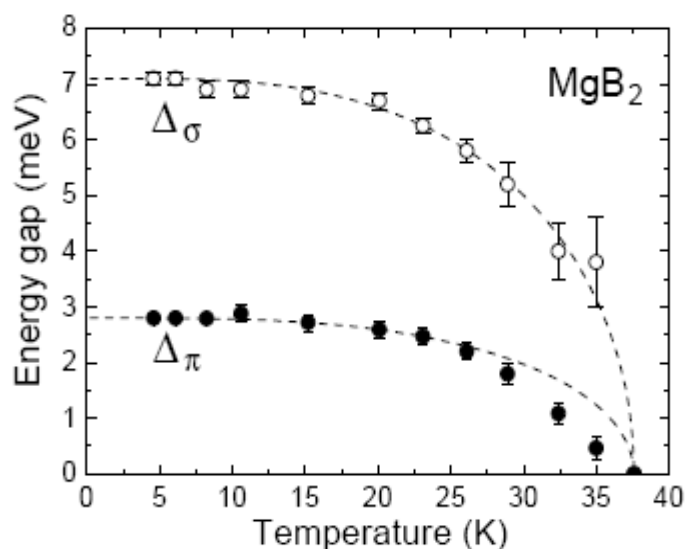
σημείου. Άρα το ενεργειακό χάσμα λόγω του σ τροχιακού είναι περίπου 2.7 φορές μεγαλύτερο από το ενεργειακό χάσμα του π τροχιακού με δυνατότητες ανόδου. Και τα δυο ενεργειακά χάσματα είναι s συμμετρικά ενώ το πρώτο είναι πολύ ανισότροπο ενώ το μικρότερο μπορεί να είναι είτε ισότροπο είτε ελαφρά ανισότροπο.²

Εξήγηση της υπεραγωγιμότητας και της υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας του MgB₂²

Ο μηχανισμός υπεραγωγιμότητας του MgB₂, μπορεί να προσεγγισθεί με ένα μηχανισμό τύπου BCS ο οποίος σχετίζεται με τα φωνόνια του κρυσταλλικού πλέγματος. Συγκεκριμένα, η υπεραγωγιμότητα οφείλεται πρώτιστα στα διδιάστατα μεταλλικά επίπεδα του Βορίου ενώ η υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία σχετίζεται με τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις

ηλεκτρονίων-φωνονίων και τις υψηλές δονητικές ενέργειες των ελαφρών ατόμων του Βορίου.

Οι ηλεκτρονιακές καταστάσεις της στάθμης Fermi, οι οποίες είναι οι κατειλημμένες ηλεκτρονιακές καταστάσεις με την υψηλότερη ενέργεια, είναι κυρίως σ ή π δεσμικά τροχιακά του Βορίου. Οι σ -δεσμικές καταστάσεις περιορίζονται στα επίπεδα του Βορίου. Έτσι η ένωση του διβοριδίου ίσως είναι η μοναδική ένωση που έχει μερικώς κατειλημμένες σ -δεσμικές καταστάσεις που διατάσσονται σε επίπεδη δομή. Επειδή όμως η κατανομή φορτίου στις καταστάσεις αυτές είναι μη συμμετρική σε συνδυασμό με τις εντός επιπέδου θέσεις των ατόμων Βορίου, προκαλείται μια ισχυρή σύζευξη των σ -δεσμικών καταστάσεων στις εντός επιπέδου δονήσεις των ατόμων Βορίου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ζευγών ηλεκτρονίων Cooper που προέρχονται από τις σ -δεσμικές καταστάσεις. Το ισχυρό αυτό ζεύγος οδηγεί και στο υψηλό ενεργειακό χάσμα των 6.2 meV, τη στιγμή που οι άλλοι υπεραγωγοί έχουν ενεργειακό χάσμα της τάξης του 1 meV. Έτσι λοιπόν ο σχηματισμός ισχυρού ζεύγους ηλεκτρονίων, το οποίο εντοπίζεται στα επίπεδα του Βορίου και μόνο στα μέρη της επιφάνειας Fermi, είναι κυρίως υπεύθυνος για την εμφάνιση της υπεραγωγιμότητας.



Διάγραμμα 24: Εξάρτηση των ενεργειακών χάσμάτων του MgB_2 από τη θερμοκρασία

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην υψηλή T_c του διβοριδίου του Μαγνησίου είναι η ύπαρξη και δεύτερου ενεργειακού χάσματος όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό αποδείχθηκε το 2003 από Ιάπωνες επιστήμονες και πιο συγκεκριμένα από την ομάδα του Takashi Takahashi από το πανεπιστήμιο Tohoku, οι οποίοι με τη χρήση φασματοσκοπίας φωτοεκπομπής υψηλής ανάλυσης (high-resolution photoemission spectroscopy / HRPES) κατάφεραν να παρατηρήσουν τα δυο χάσματα με διαχωρισμό των σ και π ζωνών. Τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασίες πάνω και κάτω της T_c (45 K και 7 K αντίστοιχα) όπου βρέθηκε ότι το ενεργειακό χάσμα στις σ -ζώνες είναι 6-7 meV ενώ στις π -ζώνες να είναι μικρότερο, δηλαδή 1-2 meV.

Από τη θεωρία BCS ισχύει ο τύπος:

$$k_B T_c = 1.13 h \omega_D \exp \left[- \frac{1}{V N(\epsilon_F)} \right] \quad (24)$$

όπου

k_B :η σταθερά του Boltzmann

T_c :η κρίσιμη θερμοκρασία

ω_D :η συχνότητα των πλεγματικών ταλαντώσεων

V : η σταθερά αλληλεπίδρασης φωνονίου-ηλεκτρονίου

N :η πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων

ϵ_F :η ενέργεια Fermi

Σύμφωνα με τον τύπο αυτό, η αύξηση της σταθερές αλληλεπίδρασης ηλεκτρονίου-φωνονίου V , προκαλεί αύξηση της κρίσιμης θερμοκρασίας T_c του υπεραγωγού. Το γεγονός ότι το Βόριο είναι ένα σχετικά ελαφρύ στοιχείο ενισχύει την ένταση των αλληλεπιδράσεων . Αν σε αυτό προστεθεί και το γεγονός ότι η χαρακτηριστική συχνότητα των πλεγματικών ταλαντώσεων ω_D είναι αντιστρόφως ανάλογη της μάζας των στοιχείων του πλέγματος, εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι το διβορίδιο του Μαγνησίου έχει υψηλές τιμές V και ω_D . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή τιμή της κρίσιμης θερμοκρασίας T_c .

Βιβλιογραφία.

- I). The Rise of the Superconductors, P.J.Ford, G.A.Saunders, CRC Press.
- II). Room Temperature Superconductivity, Andrei Marouchkine, Cambridge International Science Publishing.
- III). High-temperature superconducting compound YBa₂Cu₃Se₇ with T_c = 371 K, V. D. Shabetnik, S. Yu. Butuzov, and V. I. Plaksii, *Technical Physics Letters* 21 (5): 382-384.
- IV). Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά , Δ. Παντελής, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996.
- V). Μαγνητικά και Υπεραγωγίμα Υλικά, Ευάγγελος Χριστοφόρου, ΕΜΠ, 2007.
- VI). Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Ιωάννης Χρυσουλάκης, Δημήτρης Παντελής, εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- VII). The origin of the anomalous superconducting properties of MgB₂, Hyoung Joon Choi, David Roundy, Hong Sun, Marvin L. Cohen & Steven G. Louie, *Letters to Nature*.
- VIII). Influences of heat treatment and doping on microstructure and superconducting properties of MgB₂ superconductor, G.Yan, Y.Feng, Y.F.Lu, L.Zhu, W.X.Jing, H.H.Weng.
- IX). Handbook of High Temperature Superconductivity: Theory and Experiment, J.Robert Schrieffer (Editor), James S.Brooks (Associate Editor), Springer.
- X). Superconductivity Volume 1: Conventional and Unconventional Superconductors, K.H. Engelmann, J.B. Ketterson, Springer.
- XI). Synthesis and stoichiometry of MgB₂, D.G. Hinks , J.D. Jorgensen, H. Zheng, S. Short, Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Building 223 9700 S. Cass Avenue, Argonne, IL 60439, USA)
- XII). Synthesis of nanocrystalline magnesium diboride (MgB₂) metallic superconductor by mechano-chemical reaction and post-annealing, R.A. Varin , Ch. Chiu, *Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ont., Canada N2L 3G1*, *Journal of Alloys and Compounds* 407 (2006) 268–273
- XIII). Influence of MgB₂ powder quality on the transport properties of Cu-sheathed MgB₂ tapes, H. Fujii, H. Kumakura, H. Togano, Materials Engineering laboratory, National Institute for Materials Science, 1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan, *Physica C* 2001.
- XIV). http://en.wikipedia.org/wiki/Eugene_Podkletnov
- XV). Superconductivity of MgB₂ wires, T.R.Yang, G.Ilonca, A.V.Pop, R.Stiufiuc, O.Fordui, *Physica C*, 388-389, (2003), 125-126.
- XVI). Critical Currents and Vortex dynamics in superconducting MgB₂, Y.Bugoslavsky, G.K.Perkins, X.Qi, L.F.Cohen, A.D.Caplin, *Nature*, accepted for publication on 19/2/01

3. Μορφοποίηση Υπεραγωγών.

φῦσαι δ' ἐν χοάνοισιν ἑείκοσι πᾶσαι ἐφύσων
παντοίην εὖπρηστον ἀϋτμήν ἐξανιεῖσαι,
ἄλλοτε μὲν σπεύδοντι παρέμμεναι, ἄλλοτε δ' αὔτε,
ὄππως Ἥφαιστός τ' ἐθέλοι καὶ ἔργον ἄνοιτο.
χαλκὸν δ' ἐν πυρὶ βάλλεν ἀτειρέα κασσίτερόν τε
καὶ χρυσὸν τιμῆντα καὶ ἄργυρον· αὐτὰρ ἔπειτα
θῆκεν ἐν ἀκμοθέτῳ μέγαν ἄκμονα, γέντο δὲ χειρὶ
ῥαισιτῆρα κρατερήν, ἐτέρηφι δὲ γέντο πυράγρην.
ποίει δὲ πρῶτιστα σάκος μέγα τε στιβαρόν τε
πάντοσε δαιδάλλων, περὶ δ' ἄντυγα βάλλε φαεινήν
τρίπλακα μαρμαρέην, ἐκ δ' ἄργύρεον τελαμῶνα.
πέντε δ' ἄρ' αὐτοῦ ἔσαν σάκεος πτύχες· αὐτὰρ ἐν αὐτῷ
ποίει δαίδαλα πολλὰ ἰδυίησι πραπίδεσσιν

Ομήρου Ιλιάδα, Ραψωδία Σ, στίχοι 470-482, περιγραφή της κατασκευής της ασπίδας του Αχιλλέα από τον Ἥφαιστο.

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.

(Α)Σύνθεση υπεραγωγίμης σκόνης.

Ι) Πυροσυσσωμάτωση σε στερεά κατάσταση (sintering).

Πρόκειται για θερμική κατεργασία όπου η πύρωση του συμπέσματος επιτελείται σε κλίβανο με προστατευτική ατμόσφαιρα (αναγωγική ατμόσφαιρα υδρογόνου ή CO) σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης T_M του βασικού μετάλλου (0.7-0.75 T_M) και διαρκεί 9 με 16 ώρες. Είναι πιθανόν

να πραγματοποιηθεί κάποια τήξη ή πυροσυσσωμάτωση στη ρευστή κατάσταση σε κάποια από τα συστατικά, όπως πχ μπορεί να συμβεί κατά την πυροσυσσωμάτωση σιδηρούχων κόνεων που αναμειγνύονται με χαλκό στην παραγωγή υπέροκληρων καρβιδίων βολφραμίου, όπου ως συνδετική ύλη στην κόνη των καρβιδίων προστίθεται 3-20% κόνη βολφραμίου. Μετά τη συμπίεση ακολουθεί πυροσυσσωμάτωση στους 1350-1500°C ,πλην όμως στους 1130° C εμφανίζεται ήδη ρευστή φάση του κοβαλτίου και σχηματίζεται ένα ευτηκτικό μείγμα.

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

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

II).Μέθοδος συγκαταβύθισης (coprecipitation method).

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

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

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

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

(B). Παραγωγή και μορφοποίηση τελικών προϊόντων.

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

I). Τεχνική παραγωγής συμπαγούς υπεραγωγίμου υλικού.

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

Πρόκειται για τεχνική παρασκευής υπεραγωγίμων μονοκρυστάλλων: Σκόνη υπεραγωγίμου υλικού θερμαίνεται πολύ αργά στο διάστημα 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 10⁴A/cm² σε θερμοκρασία υγρού αζώτου, τιμή πολύ υψηλότερη από αυτή των αντίστοιχων πολυκρυσταλλικών υπεραγωγίμων υλικών. Εφαρμόζεται κυρίως στο υλικό YBCO στο οποίο η μορφοποίηση κατά την τεχνική «σκόνη μέσα σε σωλήνα» εμφανίζει προβλήματα.

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

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

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

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).

II)Τεχνική παρασκευής λεπτών υμενίων και επιστρωμάτων μεγάλου πάχους.

1)Υπεραγώγιμα επιστρώματα με ηλεκτροφόρηση.

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

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

Με αυτή τη μέθοδο ,η σκόνη προσάρεται και τοποθετείται πάνω σε μεταλλικό υποδοχέα, με την εφαρμογή κενού. Με την επιβολή ορισμένης τάσης, γίνεται εξάχνωση της σκόνης(κάθοδος) με κατάλληλη ηλεκτρική εκκένωση , και απόθεση της πάνω σε ειδικά υποστρώματα ($MgO, SrTiO_3$). Το πάχος των επιστρωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 1-1000nm. Ακολουθεί θερμική κατεργασία σε ατμόσφαιρα οξυγόνου.

3) Εξάχνωση με δέσμη Laser (Laser ablation).

Η σκόνη προσάρεται σε μορφή παστίλιας και τοποθετείται απέναντι από την έξοδο της δέσμης laser. Η φωτοχημική αλληλεπίδραση της δέσμης laser με την επιφάνεια του στόχου έχει σαν αποτέλεσμα τη φωτοχημική εξάχνωση (photochemical ablation) των ατόμων του κεραμικού υλικού και τη δημιουργία ενός φωτεινού κώνου, υψηλής θερμοκρασίας, που περιέχει άτομα διεγερμένα σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση(plume). Η εναπόθεση του υλικού στο υπόστρωμα ,σε υψηλή σχετικά θερμοκρασία, ενεργοποιεί μηχανισμούς διάχυσης ατόμων του υποστρώματος στην περιοχή του υμενίου. Για λεπτά υμένια, πάχους 10-1000nm ,τέτοιου είδους μόλυνση θεωρείται καταστροφική για τις υπεραγώγιμες ιδιότητες του υλικού(J,T). Για αυτό η επιλογή του υποστρώματος, πολλές φορές βασίζεται στην κρυσταλλογραφική συγγένεια του με το επίστρωμα και στην χημική του αδράνεια.(πχ $LaAlO_3$). Συχνά, για την παρεμπόδιση της μόλυνσης, προαποτίθεται στο υπόστρωμα ένα film φράγματος διάχυσης(πχ Ta).

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

4)Συνεξάχνωση με δέσμη ηλεκτρονίων(Electron beam coevaporation).

Οι πρώτες ύλες συνεξάχνωνονται κατόπιν βομβαρδισμού τους με δέσμες ηλεκτρονίων. Η στοιχειομετρική τους ανάμειξη οδηγεί στη δημιουργία λεπτού υμενίου(πάχους 1-1000nm) υπεραγωγίμου υλικού πάνω σε υπόστρωμα, συνήθως SrTiO₃. Στη συνέχεια ή και ταυτόχρονα, πραγματοποιείται ανόπτηση σε ατμόσφαιρα οξυγόνου. Οι πυκνότητες ρεύματος σε τέτοια υποστρώματα μπορεί να φτάσουν τα 10⁵ A/cm², σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου.

5)Απόθεση με ψεκασμό πλάσματος.

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

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται χρήση της τεχνικής PIT κατά την οποία σκόνη MgB₂ διελλάσσεται .Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διέλασης ως κατεργασία, των θεωρητικών μοντέλων που την περιγράφουν και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προβλέπουν τα πρότυπα αυτά με τα πειραματικά δεδομένα από την διέλαση του MgB₂.

Βιβλιογραφία.

- I). Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά , Δ. Παντελή, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996

4. Διέλαση του MgB_2 .

An ounce of action is worth a ton of theory
Friedrich Engels.

A.H διέλαση ως κατεργασία.^{1,2,3,5}

Οι κατηγορίες διαμορφώσεων αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα τμήματα των κατεργασιών των υλικών.

Οι διαμορφώσεις αυτές μορφοποιούν τα κατεργαζόμενα υλικά μέσω εξωτερικών δυνάμεων που προκαλούν πλαστικές παραμορφώσεις σε διαφορετικές γεωμετρίες από την αρχική. Τα υλικά αυτά ειθίσαι να έχουν μικρό όριο διαρροής και μεγάλη επιμήκυνση με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν πολύ καλές διαμορφώσεις και μικρές δυνάμεις επανάταξης. Μια από τις κατεργασίες διαμόρφωσης είναι και η διέλαση.

Κατά τη διέλαση (extrusion) το τεμάχιο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου μέσα σε μεταλλικό θάλαμο, στο άλλο άκρο του οποίου ευρίσκεται κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα, και αναγκάζεται να εξέλθει από το άνοιγμα της μήτρας αποδίδοντας προϊόν με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος.

Το 1797 ο Joseph Bramah ένας Άγγλος κλειδαράς κατοχύρωσε την πρώτη διαδικασία διέλασης για την κατασκευή σωλήνων από μόλυβδο(Pb). Περιλάμβανε προθερμαμένο μέταλλο στο οποίο ασκείτο δύναμη ώστε να πέρναγε μέσα από ένα καλούπι μέσω ενός χειροποίητου κατευθυνόμενου εμβόλου. Η κατεργασία δεν εξελίχθηκε περαιτέρω μέχρι ο Thomas Burr να κατασκευάσει την πρώτη υδραυλική πρέσα ισχύος. Μέχρι τότε η κατεργασία ονομαζόταν squirting. Το 1894 ο Alexander Dick επέκτεινε την εργασία σε κράματα χαλκού και ορείχαλκου(brass).^{2,3}

Αναλόγως την διάταξη του μηχανισμού διέλασης και τις κινήσεις των στοιχείων του, υπάρχουν οι ακόλουθες κατηγορίες διέλασης:

❖ Άμεση διέλαση (Direct extrusion)

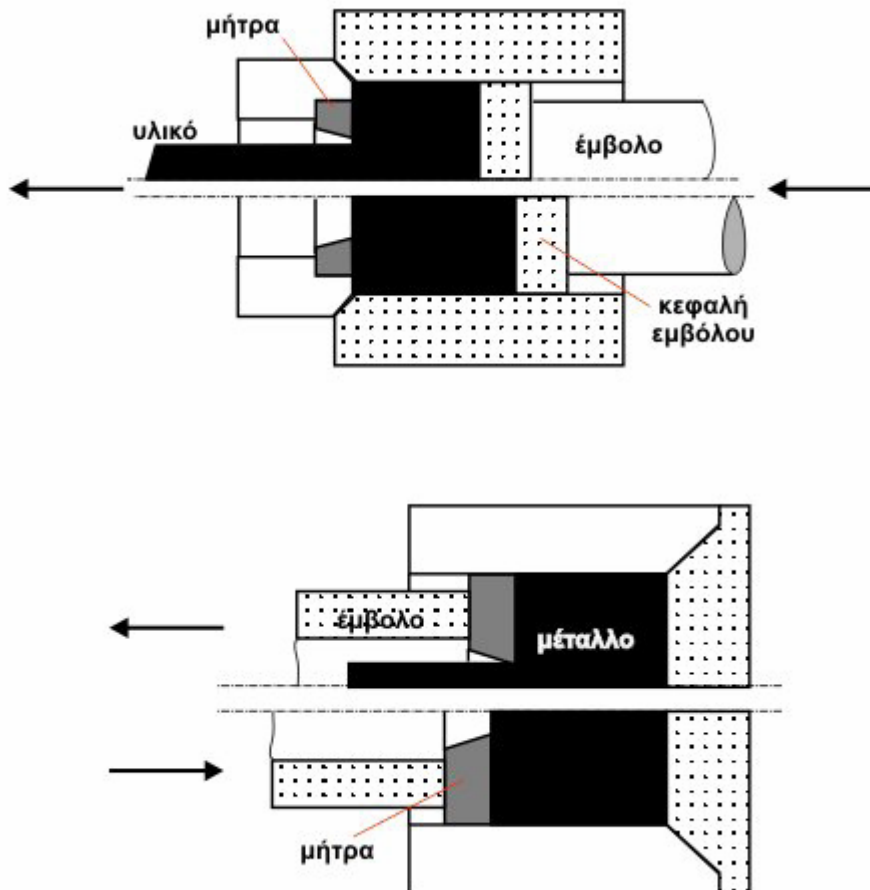
Είναι η κλασική περίπτωση διέλασης όπου η ροή του υλικού έχει την κατεύθυνση της κίνησης του εμβόλου. Το υλικό «ρέει» στα τοιχώματα του μεταλλικού θαλάμου ενώ κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αναπτύσσοντας ισχυρές δυνάμεις τριβής.

❖ Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion)

Σε αυτή την περίπτωση στο μέτωπο του εμβόλου έχει ενσωματωθεί η μήτρα. Με την κίνηση του εμβόλου η μήτρα κινείται ως προς το υλικό, ενώ το τελευταίο παραμένει ακίνητο μέσα στο θάλαμο. Το τελικό προϊόν εξέρχεται από κεντρική οπή στον άξονα του εμβόλου. Να σημειωθεί πως η ροή του

υλικού έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου. Οι τριβές στη διεπιφάνεια υλικού/θαλάμου είναι αμελητέες σε αυτήν την περίπτωση.

Τα δύο αυτά είδη φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 25: Σχηματική απεικόνιση διέλασης

❖ Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion).

Σε αυτή την κατηγορία ο μεταλλικός θάλαμος πληρούται με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο. Η αναπτυσσόμενη υδραυλική πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα στο υλικό, το οποίο και διελάσσεται. Και σε αυτή την κατηγορία δεν υπάρχει καθόλου τριβή του υλικού με τα τοιχώματα του θαλάμου. Ιδιαίτερη προσοχή, ωστόσο, πρέπει να δίνεται στη στεγανότητα της εγκατάστασης.

❖ Κρουστική διέλαση (Impact extrusion)

Πρόκειται για μια μορφή έμμεσης διέλαση που εκτελείται με μεγάλη ταχύτητα εμβόλου. Σε αυτή την περίπτωση ο θάλαμος έχει αντικατασταθεί από αβαθή κοιλότητα και το υλικό αναγκάζεται να περιρρέει το περίγραμμα του εμβόλου. Εφαρμόζεται σε σχετικά μαλακά υλικά (Pb, Zn, Al, Cu) για την παραγωγή μικρού μήκους κυαθίων.

Στην απλή διέλαση διακρίνονται οι ακόλουθες φάσεις:¹

❖ **Φάση I: Αρχική ή μεταβατική φάση**

Γίνεται βαθμιαία πλήρωση του μεταλλικού θαλάμου με το κατεργαζόμενο υλικό ενώ σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην έναρξη εμφάνισης του πρώτου τμήματος προϊόντος στην έξοδο της μήτρας.

❖ **Φάση II: Ευσταθής φάση**

Διεξάγεται η διέλαση με σταθερό ρυθμό. Σε αυτή τη φάση αναπτύσσεται νεκρή ζώνη (ακίνητο υλικό) στην έξοδο της μήτρας ενώ μειώνεται τόσο το μήκος της μπιγέτας μέσα στο θάλαμο (με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης τριβών) όσο και το φορτίο διέλασης, (βαθμιαία) σε μικρότερο βαθμό στη θερμή διέλαση ή για μη κρατυνόμενα υλικά και σε μεγαλύτερο ρυθμό για την ψυχρή διέλαση κρατυνόμενων υλικών.

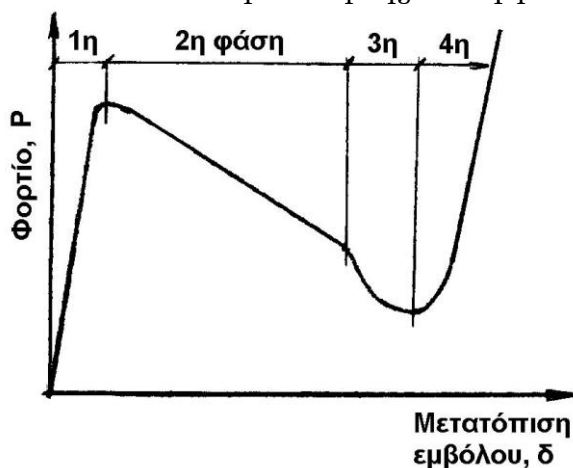
❖ **Φάση III: Φάση αστάθειας**

Σε αυτή τη φάση το μήκος της μπιγέτας μέσα στο μεταλλικό θάλαμο γίνεται πολύ μικρό (το έμβολο πλησιάζει τη νεκρή ζώνη) με αποτέλεσμα να παρατηρείται τριγμός στο εργαλείο διέλασης και θόρυβος. Συνοδεύεται με απότομη μείωση του φορτίου μέχρι μια ελάχιστη τιμή.

❖ **Φάση IV: Ανάπτυξη ελαττώματος**

Τέλος περαιτέρω μείωση του μήκους της μπιγέτας οδηγεί σε απώλεια επαφής του κεντρικού τμήματος της μπιγέτας με την πιέζουσα επιφάνεια του εμβόλου, έτσι ώστε δημιουργείται κεντρική κοιλότητα στο τελικό προϊόν και το υπόλοιπο τμήμα της μπιγέτας παρασύρεται μέσα σ' αυτή την κοιλότητα.

Πλέον το τμήμα που φέρει τη σχηματιζόμενη κοιλότητα θεωρείται ελαττωματικό και αποκρίπτεται ενώ το φορτίο κατεργασίας αυξάνεται απότομα και για αυτό συνιστάται η παύση της κατεργασίας.



Διάγραμμα 26: Δύναμη εμβόλου διέλασης συναρτήσει της μετατόπισης του

Θερμή διέλαση¹

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το φορτίο διέλασης είναι:

(i) Ο τύπος διέλασης (άμεση ή έμμεση)

(ii) Ο λόγος διέλασης R_e .

Ο λόγος διέλασης (αρχική διατομή/τελική διατομή) κυμαίνεται μέχρι τη τιμή 40:1 σκληρά υλικά (χάλυβες) ή αντίστοιχα μέχρι 400:1 σε μαλακά υλικά (Al). Η πίεση του εμβόλου είναι ευθέως ανάλογη του $\ln R_e$ όπως θα αναφερθεί εκτενέστερα σε μεταγενέστερο κεφάλαιο.

Η ταχύτητα εξόδου του τελικού προϊόντος ισούται με το γινόμενο, όπως προκύπτει από τη εξίσωση συνεχείας, οπότε για μεγάλους λόγους διέλασης μπορεί σημειωθούν μεγάλες ταχύτητες ολίσθησης στην έξοδο της μήτρας. Αύξηση της ταχύτητας εμβόλου προκαλεί αύξηση της πίεσης εμβόλου, διότι το υλικό συμπεριφέρεται περισσότερο κρατυνόμενο.

Στις χαμηλές ταχύτητες παρατηρείται ταχύτερη απόψυξη της μπιγέτας. Άμεση συνέπεια αυτού είναι η σκλήρυνση του υλικού και η βαθμιαία αύξηση του φορτίου διέλασης με τη διαδρομή του εμβόλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του υλικού, τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση της χαμηλής ταχύτητας στην απόψυξη του.

Άρα, όπου απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες θα εφαρμόζονται σχετικά μεγάλες ταχύτητες εμβόλου.

(iii) Η θερμοκρασία διέλασης.

Οι μεγάλες θερμοκρασίες κατεργασίας μειώνουν την τάση ροής ή την αντίσταση σε παραμόρφωση του διαμορφωμένου υλικού. Κάποιες χαρακτηριστικές θερμοκρασίες θερμής διέλασης για τα διάφορα υλικά είναι: Χάλυβας (1200°C), χαλκός(Cu) και κράματά του(800°C), αλουμίνιο(Al) και κράματά του (470°C), μόλυβδος(Pb) (230°C) κ.ά.

Οι θερμοκρασίες δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλές γιατί εισάγουν προβλήματα οξειδωσης του κατεργαζόμενου υλικού και του εργαλείου διέλασης, εξασθένησης (softening) των υλικών μήτρας/θαλάμου/εμβόλου και διάσπασης του χρησιμοποιούμενου λιπαντικού. Επομένως η θερμοκρασία κατεργασίας πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, η οποία θα εξασφαλίζει επαρκή πλαστικότητα στο υλικό και δεν θα προκαλεί θερμική συστολή.

Σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται στις σχετικά μεγάλες μειώσεις της διατομής (έργο παραμόρφωσης), οπότε στον υπολογισμό της βέλτιστης θερμοκρασίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αυτή η θερμοκρασιακή μεταβολή για να μην φθάσει το υλικό κοντά στο σημείο τήξης του ή στην περιοχή που λαμβάνει χώρα θερμική συστολή.

(iv) Η ταχύτητα παραμόρφωσης.

Ένα άλλο, διαφορετικό σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας θερμής

διέλασης είναι η λίπανση. Για τα σκληρά υλικά (χάλυβες, κράματα νικελίου κ.α.) αποτελεσματικό λιπαντικό που δεν διασπάται στις υψηλές θερμοκρασίες είναι τήγμα ύαλου, η οποία διατηρεί το ιξώδες της στις υψηλές θερμοκρασίες, έχει καλά χαρακτηριστικά διαβροχής και ενεργεί και ως θερμομονωτικό. Στα μη σιδηρούχα μέταλλα συνήθως δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό ή σπάνια γραφίτης. Ενώ για υλικά που έχουν την τάση να «κολλούν» στα τοιχώματα του εμβόλου καλύπτονται συνήθως με ελαφρά επικάλυψη από μαλακό υλικό (Cu, μαλακός χάλυβας) που εκτός από λιπαντικό λειτουργεί και ως προστατευτικό επίστρωμα έναντι της ατμόσφαιρας. Άλλα χρησιμοποιούμενα στερεά λιπαντικά: γραφίτης και MoS₂.

Η εφαρμογή του λιπαντικού μπορεί να γίνει κατά δύο τρόπους:

- (α) Η μπιγέτα θερμαίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα και επικαλύπτεται με σκόνη υάλου πριν εισέλθει στο μεταλλικό θάλαμο. Το επίστρωμα υάλου παρέχει λιπαντική δράση και συγχρόνως λειτουργεί ως θερμομονωτικό μειώνοντας την απορροή θερμότητας από το υλικό προς το έμβολο και ως προστατευτική επικάλυψη από την επίδραση της ατμόσφαιρας.
- (β) Στην είσοδο της μήτρας τοποθετείται υάλινος δίσκος μπροστά από τη μπιγέτα. Κατά την εκτέλεση της θερμής διέλασης ο υάλινος δίσκος μαλακώνει βαθμιαία, τήκεται και μετατρέπεται σε λεπτή μεμβράνη πάχους γύρω στα 0.03 mm που καλύπτει πλήρως το κατεργαζόμενο υλικό.

Ψυχρή διέλαση ¹

Λόγω της κράτυνσης του υλικού που σημειώνεται σε κάθε ψυχρή κατεργασία, τα φορτία κατεργασίας είναι σχετικά υψηλά. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή των διαφόρων μερών του εμβόλου διέλασης από απόψεως υλικών κατασκευής και αντοχής.

Και στην ψυχρή διέλαση ιδιαίτερη σημασία για την απρόσκοπτη εκτέλεση της ψυχρής διέλασης έχει το σύστημα λίπανσης. Σε αυτήν χρησιμοποιούνται υψηλής πίεσης λιπαντικά και σάπωνες.

Ειδικά για τους χάλυβες πρέπει να εφαρμόζεται χημική επιφανειακή επικάλυψη Zn (φωσφάτωση) σε συνδυασμό με σάπωνα.

Τέλος προσοχή πρέπει να δίνεται στη ακριβή οδήγηση του εμβόλου προς αποφυγή λυγισμού ή θραύσης του. Για το λόγο αυτό προτιμώνται οι κατακόρυφες πρέσες. Παρατηρείται σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας της τάξης των 500-600 °C, λόγω της πρόσδοσης πλαστικού έργου.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΥΣΧΕΡΕΙΑΣ

Για την αξιολόγηση του βαθμού δυσκολίας που εισάγει μια μήτρα στη διεξαγωγή της διέλασης χρησιμοποιούνται οι παράμετροι:

$\Delta_1 = (\text{περίμετρος διατομής προϊόντος}) / (\text{περίμετρος μπιγέτας ισοδύναμης κυκλικής διατομής})$

$\Delta_2 = (\text{περίμετρος διατομής προϊόντος}) / (\text{βάρους ανά μονάδα μήκους})$

$\Delta_3 = (\text{διάμετρος περιγεγραμμένου κύκλου}) / (\text{ελάχιστο πάχος διατομής})$

Η φυσική ερμηνεία αυτών των συντελεστών είναι η εξής:

- Αυξανόμενη της περιμέτρου της διατομής και των λεπτομερειών της (εσοχές, εξοχές) (συνδυασμός των Δ_1 και Δ_2), αυξάνεται η δυσκολία διέλασης.
- Αυξανόμενου του βάρους ανά μονάδα μήκους (μεγάλες διατομές), μειώνεται η δυσχέρεια διέλασης (δείκτης Δ_2).
- Αυξανόμενου του βάρους αυξάνεται η ευκολία διέλασης (δείκτης Δ_3).

Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε στο <1> της βιβλιογραφίας.

B. Θεωρητικός υπολογισμός φορτίου διέλασης MgB_2 .^{1,4}

Με βάση τη μέθοδο λόφος-τριβή μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά η δύναμη του εμβόλου κατά την διέλαση του υλικού καθώς και ισχύς που καταναλώθηκε για την διέλαση.

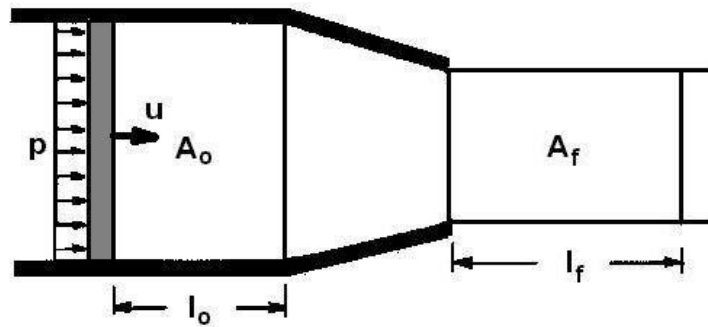
Θα χρησιμοποιηθούν δύο μοντέλα : Το πρώτο δεν λαμβάνει υπόψη το πορώδες του υλικού και προκύπτει από μια διατήρηση όγκου και εξίσωση έργων παραμόρφωσης και έργου εμβόλου. Στο ίδιο μοντέλο θα εμφανιστεί και η ημιεμπειρική σχέση του Johnson

Το δεύτερο λαμβάνει υπόψη του την τριβή αλλά δεν ασχολείται με το πορώδες του υλικού και είναι η κλασική μέθοδος λόφος-τριβή σε συνθήκες διέλασης (για περισσότερες πληροφορίες στο <1> της βιβλιογραφίας).

Για λόγους πληρότητας θα παρουσιαστεί και ένα υπολογιστικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη και το πορώδες του υλικού και την τριβή κατά την κατεργασία αλλά δεν θα υπολογιστεί με βάση αυτό η δύναμη διέλασης.

Υπολογισμός του φορτίου διέλασης σε ομοιογενή παραμόρφωση (απουσία τριβών).¹

Έστω τμήμα της κατεργαζόμενης μπιγέτας μήκους l_o και διατομής A_o το οποίο όταν μετατραπεί σε τελικό προϊόν έχει διατομή A_f και μήκος l_f .



Σχήμα 27: εφαρμογή διατήρησης όγκου κατά τη διέλαση

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης του όγκου :

$$l_o A_o = A_f l_f \rightarrow \frac{A_o}{A_f} = \frac{l_f}{l_o} \quad (24)$$

Η σημειωμένη παραμόρφωση στην έξοδο της μήτρας είναι $\bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$ (25)

Το φορτίο εξωτερικού έργου είναι $W = \text{φορτίο} * \text{ταχύτητα} = P * u = p A_o u$ (26)

Το φορτίο πλαστικού έργου είναι $W_i = A_o \int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma d\varepsilon$ (27)

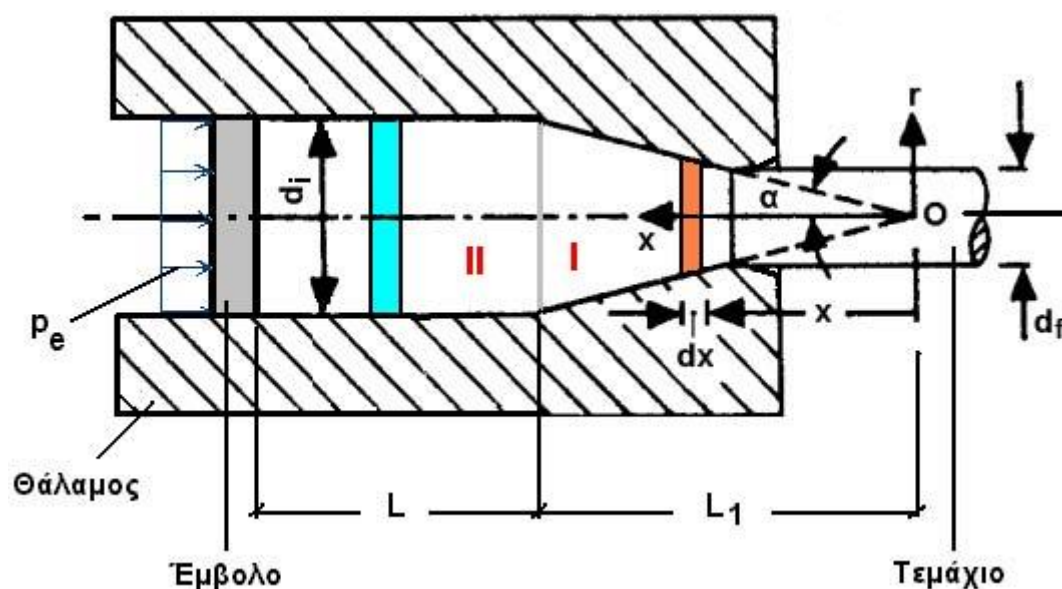
Με την εισαγωγή του ορίου διαρροής $Y = \frac{0}{\bar{\varepsilon}}$ στην εξίσωση των δύο έργων

πλέον η πίεση του εμβόλου υπολογίζεται από την $p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$. (28)

Η ημιεμπειρική σχέση του Johnson βασισμένη στο ίδιο μοντέλο είναι

$$p = \bar{Y} [0.8 + 1.5 \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)]. \quad (29)$$

Μέθοδος Λόφος τριβή σε κωνική μήτρα.¹



Σχήμα 27: Δυνάμεις και πιέσεις στη διέλαση με τη μέθοδο λόφος-τριβή

Δεδομένα του προβλήματος:

- ❖ Διέλαση μέσω κωνικής μήτρας με το έμβολο να ασκεί θλιπτική τάση p_e .
- ❖ Υφίστανται δύο διακεκριμένες περιοχές, η κωνική περιοχή I (μήτρα) και η κυλινδρική περιοχή II (θάλαμος).
- ❖ Συνθήκες τριβής κατά Coulomb ($\tau = \mu p$) στην περιοχή I και συνθήκες sticking στην περιοχή II.
- ❖ Ροή του υλικού μόνο προς τα έξω.
- ❖ Θεωρούμε κυλινδρικό σύστημα αξόνων (r, θ, x) με άξονα x τον άξονα συμμετρίας του σύρματος με αρχή την κορυφή O του κώνου.
- ❖ Σε καθεμιά από τις περιοχές I και II θα μελετηθεί η ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας πάχους dx , σε απόσταση x από τον άξονα, όπου η τριβή θα έχει φορά προς τα αριστερά.

Περιοχή I (μήτρα).

Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας

Από την γεωμετρία του σχήματος προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$r = x \tan a \quad (30)$$

$$dr = dx \tan a \quad (31)$$

$$ds = \frac{dx}{\cos a} \quad (32)$$

Εφαρμόζοντας την στοιχειώδη ισορροπία κατά τον άξονα των x'x:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)\pi(r + dr)^2 - \sigma_x \pi r^2 + 2\pi r p \tan a dx + 2\pi r \mu p dx = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow rd\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot a)]dr = 0 \quad (33)$$

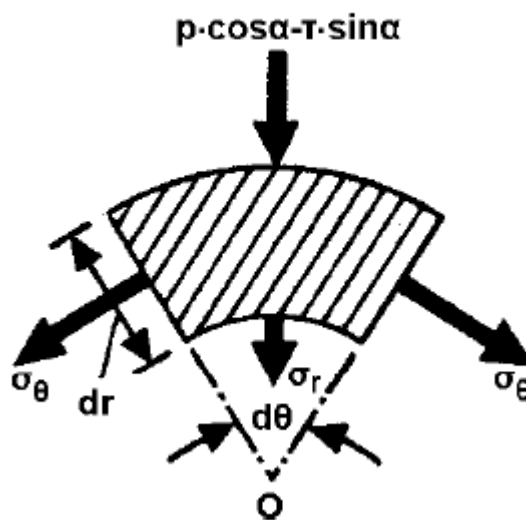
Εισάγοντας το κριτήριο διαρροής

$$\sigma_1 - \sigma_3 = Y \quad (34)$$

Θεωρώντας ως κύριες διευθύνσεις τις x και r αντίστοιχα (δηλαδή $\sigma_x = \sigma_1$ και $\sigma_3 = \sigma_r$), με κατάλληλες τομές της στοιχειώδους λωρίδας, όπως φαίνεται παρακάτω, ελευθερώνονται εσωτερικές τάσεις σ_r και σ_θ .

Από την ισορροπία κατά την ακτινική διεύθυνση r προκύπτει

$$-(p \cos a - \mu p \sin a)(r + dr)d\theta dx - \sigma_r r d\theta dx - 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2} dr dx = 0 \quad (35)$$



Σχήμα 28: ακτινική ισορροπία σε στοιχειώδη λωρίδα στη διέλαση

Θέτοντας $\sigma_r = \sigma_\theta$ και θεωρώντας τη γωνία θ τόσο μικρή ώστε $\sin\theta \sim \theta$ και $\tan a \rightarrow 0$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$-(p \cos a - \mu p \sin a)(r + dr)d\theta dx - \sigma_r r d\theta dx - 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2} dr dx = 0 \Leftrightarrow$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta$$

$$\Leftrightarrow \sigma_r = -p(1 - \mu \tan a) \Leftrightarrow$$

$$\theta \rightarrow 0$$

$$\Leftrightarrow \sigma_r = -p \quad (36)$$

$$a \rightarrow 0$$

Με αντικατάσταση στο κριτήριο διαρροής προκύπτει

$$\begin{aligned}\sigma_x \cdot (-p) &= Y \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow p &= Y - \sigma_x\end{aligned}\quad (37)$$

Λύνοντας πλέον το σύστημα

$$\begin{aligned}p &= Y - \sigma_x \quad (37) \\ rd\sigma_x + 2[\sigma_x + p(1 + \mu \cot a)]dr &= 0 \quad (33)\end{aligned}$$

προκύπτει η σχέση

$$\frac{dr}{r} = -\frac{d\sigma_x}{2[Y(1 + \mu \cot a) - \mu \cot a \sigma_x]}\quad (38)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω ως προς r

$$\text{Προκύπτει } \ln r = \frac{1}{2\mu \cot a} \ln[(1 + \mu \cot a)Y - \mu \cot a \sigma_x] + c \quad (39)$$

Στην έξοδο της μήτρας η ροή είναι ελεύθερη άρα $\sigma_x=0$ και έτσι αντικαθιστώντας στην παραπάνω τα $r=d_f/2$ και $\sigma_x=0$ προκύπτει

$$c = \ln \frac{d_f}{2} - \frac{1}{2\mu \cot a} \ln[(1 + \mu \cot a)Y] \quad (40)$$

Τέλος επιλύοντας το σύστημα των

$$c = \ln \frac{d_f}{2} - \frac{1}{2\mu \cot a} \ln[(1 + \mu \cot a)Y] \quad (40)$$

$$\ln r = \frac{1}{2\mu \cot a} \ln[(1 + \mu \cot a)Y - \mu \cot a \sigma_x] + c \quad (39)$$

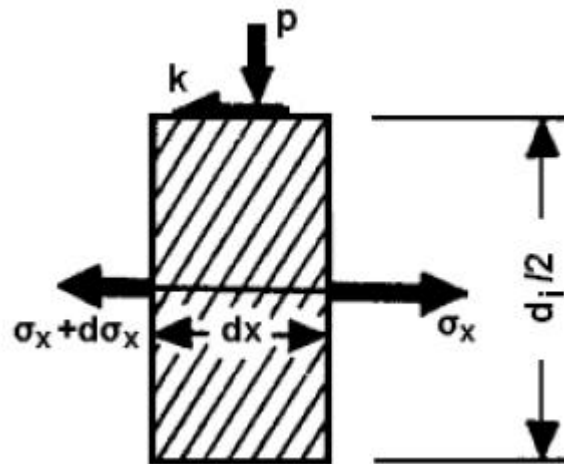
προκύπτει η τάση στην μήτρα:

$$\sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{2r}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \quad (41)$$

Η τάση εισόδου στη μήτρα είναι πλέον

$$\sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \quad (41)$$

Να σημειωθεί πως η τάση εισόδου στη μήτρα είναι θλιπτική!



Σχήμα 29: Ισορροπία στοιχειώδους λωρίδας

Περιοχή ΙΙ(θάλαμος)

Η εξίσωση ισορροπίας στοιχειώδους λωρίδας κατά τον άξονα x είναι

$$\sigma_x + d\sigma_x \frac{\pi d_i^2}{4} - \sigma_x \frac{\pi d_i^2}{4} + k(\pi d_i)dx = 0 \Leftrightarrow \quad (42)$$

$$\Leftrightarrow d\sigma_x = -\frac{4k}{d_i} dx \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \int d\sigma_x = \int -\frac{4k}{d_i} dx \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_x = -\frac{4kx}{d_i} + c \quad (43)$$

Οριακές συνθήκες

I. Στη θέση $x=L_1$ είναι $\sigma_x = \sigma_{xi}$, από την οποία υπολογίζεται η σταθερά ολοκλήρωσης c

$$c = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[\left(\frac{A_i}{A_f} \right)^{\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \quad (40)$$

,όπου μ ο συντελεστής τριβής

II. Στη θέση $x=L+L_1$ είναι (θλιπτική), από την οποία υπολογίζεται η πίεση εμβόλου

$$p = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \quad (43)', \text{όπου } k \text{ το όριο διάτμησης}$$

Y/2

$$\text{Η δύναμη του εμβόλου είναι } P = \sigma_x \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (44).$$

*Μέθοδος Λόφου τριβής σε κωνική μήτρα με πορώδες υλικό.*⁴

Στο πρότυπο αυτό το υλικό δε θεωρείται ως συμπαγές μέταλλο αλλά σκόνη. Ως πορώδες της σκόνης ορίζεται η διαφορά της πυκνότητας του συμπαγούς υλικού (2.6 g/cm³) από την πυκνότητα του υλικού σε σκόνη.

Για να βρεθεί η πυκνότητα του υλικού σε σκόνη μετρήθηκε η μάζα του υλικού που τοποθετήθηκε στο σωλήνα που υπέστη διέλαση και διαιρέθηκε με τον όγκο του σωλήνα (χρησιμοποιήθηκε ο όγκος κυλίνδρου για τον υπολογισμό του.)

Η ισοδύναμη τάση κατά τη διέλαση των πορώδων υλικών δίνεται από τη σχέση

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\beta^{n+0.5}} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + 9a^m \sigma_m^2 \right\} \quad (45)$$

όπου m=0.4 ,n=0.5(46) σταθερές που λαμβάνουν υπόψη τους τις μικροατέλειες

ενώ m=0.75 ,n=0.5 οι σταθερές χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι μικροατέλειες ⁴ (47)

$$\alpha = 0.0185 + 0.183f, \quad (48)$$

$$\beta = 0.73 - f \quad (49)$$

οι συναρτήσεις του πορώδους f για 0.25 < f < 0.6

και

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (50) \text{ η υδροστατική συνιστώσα των τάσεων}$$

Από τη γεωμετρία του σχήματος 57 προκύπτουν οι σχέσεις

$$r = \frac{D}{2} + z_1 \tan \phi \quad (51)$$

$$r = z \tan \phi \quad (52)$$

$$dr = dz_1 \tan \phi \quad (53)$$

$$dr = dz \tan \phi \quad (54)$$

Εξίσωση ισοροπίας στο κυλινδρικό τμήμα(θάλαμο)

$$(\sigma_z + d\sigma_z) \pi r_o^2 - \sigma_z \pi r_o^2 - \mu 2\pi r_o dz = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow r_o^2 d\sigma_z = 2\mu p dz \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2\mu p}{r_o^2} \quad (55), \text{ με } h+h_2 \leq z \leq h+h_2 + h_1$$

Εισάγοντας το κριτήριο διαρροής

$$\sigma_1 = \sigma_r = -p \quad (56)$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta = -p(\alpha\xi\text{ονοσυμμετρια}) \quad (57)$$

$$\sigma_3 = -\sigma_z \quad (58)$$

$$\sigma_{eq} = Y \quad (59)$$

Πλέον

$$Y = \frac{1}{\beta^{n+0.5}} \left\{ \frac{1}{2} [(-p+p)^2 + (-p+\sigma_z)^2 + (-\sigma_z p)^2] + 9a^m \frac{(-2p-\sigma_z)^2}{9} \right\} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (1+4a^m)p^2 - 2\sigma_z(1-2a^m)p + [\sigma_z^2(1+a^m) - Y^2\beta^{2n+1}] = 0 \quad (60)$$

Λύνοντας το παρακάτω τριώνυμο (ως προς p) προκύπτει

$$p = \frac{(1-2a^m)\sigma_z \sqrt{(1+4a^m)Y^2\beta^{2n+1} - 9a^m\sigma_z^2}}{1+4a^m} \quad (61)$$

Πλέον η παραπάνω διαφορική εξίσωση ισοροπίας (55) γίνεται με τη βοήθεια της (61)

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2\mu(1-2a^m)\sigma_z \sqrt{(1+4a^m)Y^2\beta^{2n+1} - 9a^m\sigma_z^2}}{(1+4a^m)r_o^2} \quad (62)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση βρίσκεται η πίεση του εμβόλου σ_z συναρτήσει του αρχικού πορώδους, του συντελεστή τριβής και της αρχικής ακτίνας.

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{20.01*(1-2*(0.15f)^{0.4})\sigma_z \sqrt{(1+4(0.15f)^{0.4})Y^2(1-1.8f^{0.9})^2 - 9(0.15f)^{0.4}\sigma_z^2}}{(1+4(0.15f)^{0.4})r_o^2} \quad (63)$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση είναι 1^{ης} τάξης και επιλυόμενη με τη μέθοδο χωριζόμενων μεταβλητών στο Mathematica οδηγεί στην ακόλουθη λύση:

$$-\beta^{-\frac{1}{2}-n} \frac{\text{Log}\left[\frac{2(\beta^{\frac{1}{2}+n} Y \sqrt{1+4a^m} + \sqrt{Y^2(1+4a^m)\beta^{1+2n} - 9a^m\sigma^2})}{\sigma}\right]}{2\mu(1-2a^m)Y\sqrt{1+4a^m}} = \frac{z}{r^2(1+4a^m)} \quad (64)$$

Πλέον η παραπάνω μη-γραμμική εξίσωση πρέπει να λυθεί ως προς σ . Επιλύοντας την και αυτή στο Mathematica προκύπτει

$$\sigma_z = \frac{4 \exp\left\{\frac{3Y_z \mu \beta}{r^2 \sqrt{1+4\alpha^m}} + \frac{Y_z \mu \beta \sqrt{1+4\alpha^{0.4}}}{r^2}\right\} Y \beta \sqrt{1+4\alpha^{0.4}}}{\exp\left\{-\frac{6Y_z \mu \beta}{r^2 \sqrt{1+4\alpha^{0.4}}} + \frac{2Y_z \mu \beta \sqrt{1+4\alpha^{0.4}}}{r^2}\right\} + 36\alpha^{0.4}} \quad (65)$$

Εαναεισάγοντας το κριτήριο διαρροής αλλά για τα διαφορικά των παραμορφώσεων:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_1 &= \frac{\rho d\varepsilon_{eq}}{2\beta^{2n+1}\sigma_{eq}} (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 + 6\alpha^m \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow d\varepsilon_2 &= d\varepsilon_1 = \frac{\rho d\varepsilon_{eq}}{2\beta^{2n+1}\sigma_{eq}} [-p(1+4\alpha^m) + \sigma_z(1-2\alpha^m)] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow d\varepsilon_3 &= \frac{\rho d\varepsilon_{eq}}{2\beta^{2n+1}\sigma_{eq}} (2\sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_1 + 6\alpha^m \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}) \quad (66) \\ \Leftrightarrow d\varepsilon_1 &= \frac{\rho d\varepsilon_{eq}}{2\beta^{2n+1}\sigma_{eq}} [2p(1-2\alpha^m) - 2\sigma_z(1+2\alpha^m)] \quad (67) \end{aligned}$$

$$\text{Η δύναμη εμβόλου υπενθυμίζεται πως είναι } P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} \quad (44)$$

$$\text{Το πορώδες δίνεται από τη συνάρτηση } f = 1 - \left(\frac{1}{1-f_o} + \frac{9\alpha^m \sigma_m \sigma_{eq}}{\sigma_{eq} \beta^{2n+1}}\right)^{-1} \quad (68)$$

❖ Εφόσον ωστόσο έχει αναφερθεί νωρίτερα πως από την αξονοσυμμετρία του προβλήματος $\sigma_z = \sigma_3$ (58) και $\sigma_1 = \sigma_2 = -p$ (57) και

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{-2p + \sigma_z}{3} \quad (50)$$

και

$$\text{❖ } \sigma_{eq} = Y \quad (59)$$

Επίσης έχει αναφερθεί πως λόγω μικροατελειών ισχύει $m=0.4$, $n=0.5$ (46)

Άρα πλέον η συνάρτηση του πορώδους γίνεται

$$f = 1 - \left(\frac{1}{1-f_o} + \frac{9\alpha^m \sigma_m \sigma_{eq}}{\sigma_{eq} \beta^{2n+1}}\right)^{-1} = 1 - \left(\frac{1}{1-f_o} + \frac{9\alpha^m \left(\frac{-2p + \sigma_z}{2}\right) Y}{Y \beta^{2n+1}}\right)^{-1} \quad (69)$$

Το πορώδες μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της κατεργασίας

με βάση τη σχέση

$$df = \frac{9(1-f)^2 a^m \sigma_m d\varepsilon_{eq}}{\beta^{2n+1} \sigma_{eq}} \quad (70)$$

Αυτή στο κυλινδρικό τμήμα μετατρέπεται στην

$$df = -\frac{3(1-f)^2 a^m \sigma_m d\varepsilon_{eq}}{\beta^{n+0.5} \sigma_{eq}} \frac{1}{\rho} \frac{dz}{z} \sqrt{\frac{1+4a^m}{a^m}} \quad (71)$$

Αλλά αρκετά ειπώθηκαν για τις θεωρητικές σχέσεις.

Όπως έλεγε ο F.Engels “**An ounce of action is worth a ton of theory**”, για αυτό και ως προχωρήσουμε στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.

Γ. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Στα πλαίσια της διπλωματικής άσκησης έγινε διεξαγωγή πειραματικής άσκησης

Το *modus operandi* ήταν το ακόλουθο:

Το MgB₂ υπέστη 3 διαδοχικές ψυχρές διελάσεις σε κατακόρυφη υδραυλική πρέσα, που προκάλεσαν 3 διαδοχικές μειώσεις διατομής:

Η πρώτη από διατομή 13mm σε διατομή 11 mm, η 2^η από 11 σε 10.3 και η 3^η από 10.3 σε 8mm.



Φωτογραφία 50: Φωτογραφία κατά τη διέλαση του MgB₂

1^η διέλαση:

Η γωνία κωνικότητας ($\alpha=\varphi$) κάθε μήτρας ήταν 15°, το διάστημα εξόδου κάθε μήτρας είχε μήκος $h_2=6\text{mm}$, η περιοχή εισόδου μήκος $z=L=h_1=57\text{mm}$ ενώ η περιοχή κωνικότητας είχε ύψος $L_1=h=5\text{mm}$ και μήκος $x=5/\cos 15^\circ \sim 5.17\text{mm}$.

Στο αρχικό σωληνάριο τοποθετήθηκαν 7.9 gr MgB_2 ενώ το σωληνάριο είχε βάρος 16.9 gr, εσωτερικό μήκος 58.5mm, εξωτερικό 60.3 mm και διάμετρο 13mm.

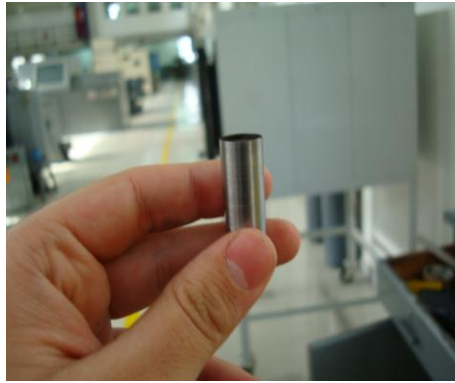
Στις ακόλουθες φωτογραφίες φαίνεται το αρχικό σωληνάριο στο οποίο διελάστηκε το υλικό:



Φωτογραφία 51: το αρχικό σωληνάριο



Φωτογραφία 52: το αρχικό σωληνάριο

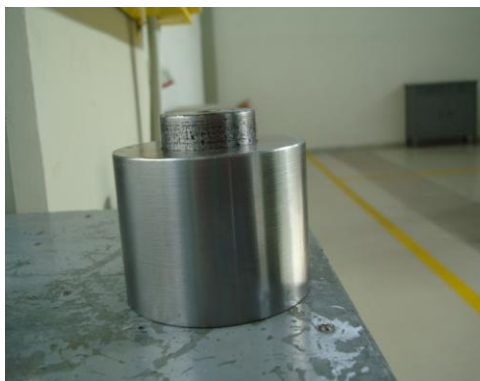


Φωτογραφία 53: Πλάγια όψη του αρχικού σωληνάριου



Φωτογραφία 54: Άνοψη του αρχικού σωληνάριου

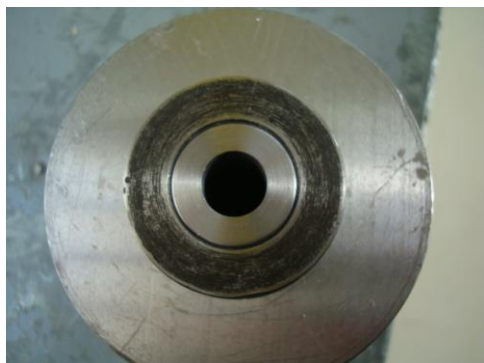
Το διάστημα εξόδου κάθε μήτρας είχε μήκος $h_2=6\text{mm}$, η περιοχή εισόδου μήκος $z=L=h_1=57\text{mm}$ ενώ η περιοχή κωνικότητας είχε ύψος $L_1=h=5\text{mm}$ και μήκος $x=5/\cos 15^\circ \sim 5.17\text{mm}$.



Φωτογραφία 55: Η θέση του σωληνάριου



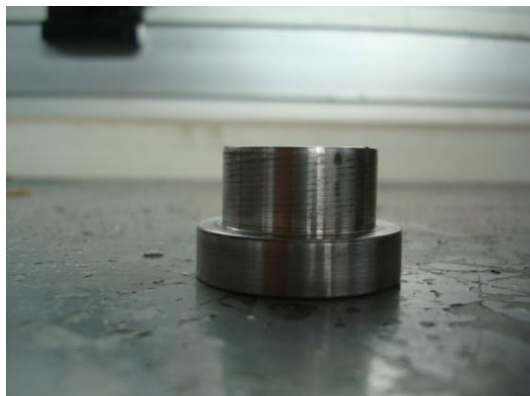
Φωτογραφία 56: Το σύστημα μήτρα-περιοχή αγκίστρωσης



Φωτογραφία 57: Υποδοχή του σωληνάριου στην μήτρα



Φωτογραφία 58: 1^η μήτρα διέλασης



Φωτογραφία 59: 1^η μήτρα



Φωτογραφία 60: 2^η μήτρα



Φωτογραφία 61: 3^η μήτρα



Φωτογραφίες 63 και 64: Όψεις του σωληνάριου στο οποίο πραγματοποιήθηκε η τρίτη διέλαση.

Είναι εμφανής η μείωση του μήκος του μετά από κάθε διέλαση λόγω των τμημάτων που αποκόπηκαν προς χαρακτηρισμό. Επίσης φαίνεται και η μείωση του πάχους του σωληνάριου λόγω των συνεχών διελάσεων.

Οι απώλειες μάζας MgB₂ κατά την προετοιμασία της διέλασης κρίνεται πως ήταν 0.1gr.

Επομένως η πυκνότητα του MgB₂ στο σωληνάκι είναι

$$\rho_{\sigma\kappa} = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \frac{D^2}{4} l_{\varepsilon\sigma}} = \frac{(7.9-0.1)gr}{3.14 \frac{13^2 mm^2}{4} 58.5mm} \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \rho_{\sigma\kappa} = \frac{7.8gr}{7760.9mm^3} = 0.001005 gr / mm^3 = 1.005 gr / cm^3$$

Συγκρινόμενο με την πυκνότητα του MgB₂ ως υλικό $\rho=2.6 \text{ g/cm}^3$ προκύπτει το πορώδες ως υλικό

$$f = \frac{2.6-1.005}{2.6} = 0.613$$

Ως λιπαντικό κατά τη διέλαση χρησιμοποιήθηκε γραφίτης και βενζίνη με αποτέλεσμα ο συντελεστής τριβής μεταξύ των δύο μετάλλων να θεωρείται περίπου $\mu \sim 0.05$.

Η πρέσα ήταν υδραυλική με δυνατότητα άσκησης δύναμης μέχρι και 100tn ενώ τοποθετήθηκε σε αυτήν αναλογικό μετρητή δύναμης πάνω στο έμβολο με ευαισθησία 10kN/V.



Σχήματα 65 και 66: Η υδραυλική πρέσα στην οποία έγινε η κατεργασία

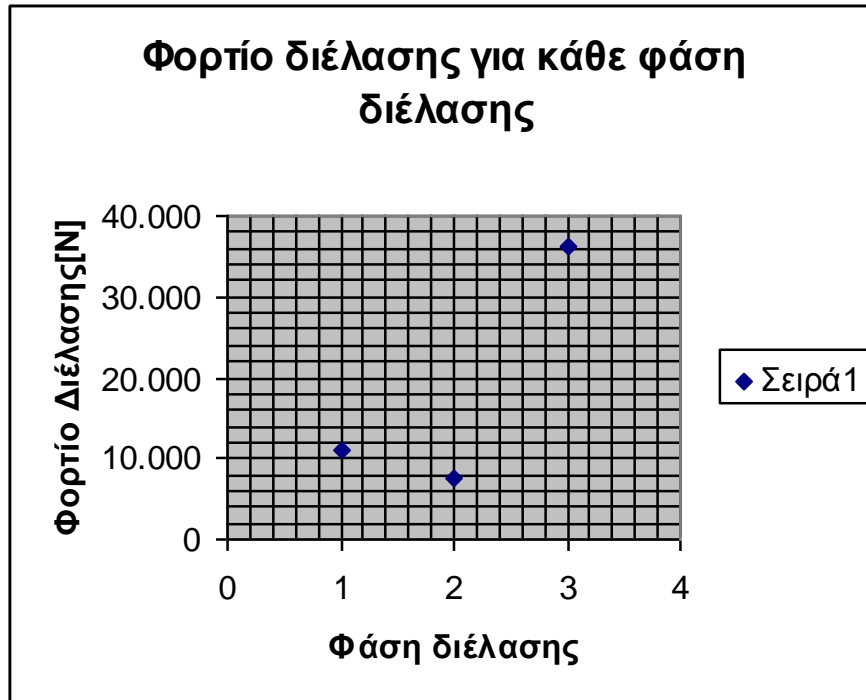
Μετά από την διέλαση ,τμήματα από το δείγμα αποκόπηκαν προς χαρακτηρισμό(οπτικό,X-Ray Diffraction,Υπεραγωγίμο και Scanning Electron Microscope) και το υπόλοιπο τμήμα υπέστη δεύτερη διέλαση στην ίδια πρέσα.

Κατά την 1^η φάση διέλασης μετρήθηκε δύναμη στο δείγμα μεγέθους $F_1=11.120\text{kN}$, κατά την 2^η φάση διέλασης μετρήθηκε δύναμη στο δείγμα μεγέθους $F_2=7.500\text{kN}$ και κατά την 3^η φάση διέλασης μετρήθηκε δύναμη $F_3=36.250\text{kN}$.

Δ. Σύγκριση θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα.

Κατά την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας μετρήθηκε από μετρητή η δύναμη του εμβόλου για κάθε διέλαση.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:



Διάγραμμα 67: Πειραματικές μετρήσεις δύναμης διέλασης

1 ^η φάση διέλασης	2 ^η φάση διέλασης	3 ^η φάση διέλασης	
11.120kN	7.500kN	36.250kN	Δύναμη
13mm	11mm	10.3mm	Αρχική διατομή
11mm	10.3mm	8mm	Τελική Διατομή

Πίνακας 3: Πειραματικά μεγέθη

Το όριο διαρροής του MgB₂ στο σωληνάριο βρέθηκε πειραματικά από συμπίεση σε πρέσα της εταιρίας Instron ίσο με 43kN/13mm² ή Y~243MPa.

Πλέον θα γίνει σύγκριση τους για κάθε διέλαση με βάση τις 2 θεωρητικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

Πρώτη(1^η) φάση διέλασης:

Μέθοδος ομοιογενούς παραμόρφωσης:

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$ (28) για μεταβολή της διατομής από

13mm σε 11mm

προκύπτει τάση $p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) \sim 0.334Y = 7.0594 \text{ kN/mm}^2$.

Άρα το φορτίο είναι(44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 5.3882 \text{ kN}$

Από τη σχέση του Johnson $p = \bar{Y}[0.8 + 1.5 \ln(\frac{A_o}{A_f})]$ (29) προκύπτει τάση

$$p = \bar{Y}[0.8 + 1.5 \ln(\frac{A_o}{A_f})] = Y(0.8 + 1.5 * 0.334) \sim 1.3Y = 2.5529 \text{ kN/mm}^2.$$

Επομένως το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 3.3885 \text{ kN}$

Μέθοδος λόφου τριβής σε κωνική μήτρα δίχως πορώδες:
Προκύπτουν δύο σχέσεις από το λόφο τριβής:

Σχέση στην κυλινδρική περιοχή:

$$p = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \quad (43)'$$

Σχέση στην κωνική περιοχή(μήτρα):

$$\sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \quad (41)$$

Η τάση που προκύπτει στην πρώτη περίπτωση είναι:

$$\begin{aligned} (43)' \rightarrow p &= Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow p &= Y \frac{1 + 3.732\mu}{\mu} \left[\left(\frac{13}{11} \right)^{7.464\mu} - 1 \right] + 8.769Y \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow p &= Y \frac{1 + 3.732 * 0.05}{0.05} \left[\left(\frac{13}{11} \right)^{7.464 * 0.05} - 1 \right] + 8.769Y \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow p &= 0.148325Y + 8.769Y = 3.8344 \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

Το δε φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 28.762 \text{ kN}$

Αντίθετα από τις σχέσεις στην κωνική περιοχή μήτρα προκύπτει τάση

$$\begin{aligned} (41) \rightarrow \sigma_z &= Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \sigma_z &= Y \frac{1 + 0.05 * 3.732}{0.05 * 3.732} \left[1 - \left(\frac{13}{11} \right)^{7.464 * 0.05} \right] \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \sigma_z &= -0.409072Y = -9.57228 * 10^7 \end{aligned}$$

Το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = -12.7055 \text{ kN}$

Δεύτερη (2^η) φάση διέλασης:

Μέθοδος ομοιογενής παραμόρφωσης:

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $\rightarrow p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$ (28) για μεταβολή της διατομής από 11mm σε 10.3mm

Προκύπτει φορτίο $p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) \sim 0.065Y$

Συνεπώς το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 1.501 \text{ kN}$

Από τη σχέση του Johnson $p = \bar{Y}[0.8 + 1.5 \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)]$ (29) προκύπτει

$$p = \bar{Y}[0.8 + 1.5 \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)] = Y(0.8 + 1.5 * 0.065) \sim 0.8975Y$$

Το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 20.726 \text{ kN}$

Μέθοδος λόφου τριβής σε κωνική μήτρα δίχως πορώδες:

Σχέση στην κυλινδρική περιοχή:

$$p = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \quad (43)'$$

Σχέση στην κωνική περιοχή (μήτρα):

$$\sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \quad (41)$$

Η τάση που προκύπτει στην κυλινδρική περιοχή είναι:

$$(43)' \rightarrow p = Yp = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4Y0.057}{2 * 0.011} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p = Y \frac{1 + 3.732\mu}{3.732\mu} \left[\left(\frac{11}{10.3} \right)^{7.464\mu} - 1 \right] + 10.363Y \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p = Y \frac{1 + 3.732 * 0.05}{3.732 * 0.05} \left[\left(\frac{11}{10.3} \right)^{7.464 * 0.05} - 1 \right] + 10.363Y \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p = 0.15795Y + 10.363Y = 10.521Y$$

Το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 242.962 \text{ kN}$

Τάση στην κωνική περιοχή:

$$(41) \rightarrow \sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \sigma_z = Y \frac{1 + 0.05 * 3.732}{0.05 * 3.732} \left[1 - \left(\frac{11}{10.3} \right)^{7.464 * 0.05} \right] \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow \sigma_z = -0.157959Y$$

Το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = -3.64776 \text{ kN}$

Τρίτη (3^η) φάση διέλασης:

Μέθοδος ομοιογενής παραμόρφωσης:

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$ (28) για μεταβολή της διατομής από

10.3mm σε 8mm

Προκύπτει φορτίο $p = \bar{Y} \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right) \sim 0.2527Y$

Συνεπώς το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 5.11653 \text{ kN}$

Από τη σχέση του Johnson $p = \bar{Y} [0.8 + 1.5 \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)]$ (29) προκύπτει

$$p = \bar{Y} [0.8 + 1.5 \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)] = Y (0.8 + 1.5 * 0.2527) \sim 1.17905Y$$

Το φορτίο είναι (44) $\rightarrow P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 23.872 \text{ kN}$

Μέθοδος λόφου τριβής σε κωνική μήτρα δίχως πορώδες:

Σχέση στην κυλινδρική περιοχή:

$$p = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4kL}{d_i} \quad (43)'$$

Σχέση στην κωνική περιοχή(μήτρα):

$$\sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \quad (41)$$

Η τάση που προκύπτει στην κυλινδρική περιοχή είναι:

$$(43)' \rightarrow p = Yp = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu} \left[\left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} - 1 \right] + \frac{4Y0.057}{2 * 0.0103} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p = Y \frac{1 + 3.732\mu}{3.732\mu} \left[\left(\frac{10.3}{8} \right)^{7.464\mu} - 1 \right] + 11.068Y \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p = Y \frac{1 + 3.732 * 0.05}{3.732 * 0.05} \left[\left(\frac{10.3}{8} \right)^{7.464 * 0.05} - 1 \right] + 11.068Y \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow p \sim 11.6969Y$$

Το φορτίο είναι $P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = 236.832 \text{ kN}$

Τάση στην κωνική περιοχή:

$$(41) \rightarrow \sigma_z = Y \frac{1 + \mu \cot a}{\mu \cot a} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_f} \right)^{2\mu \cot a} \right] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_z = Y \frac{1 + 0.05 * 3.732}{0.05 * 3.732} \left[1 - \left(\frac{10.3}{8} \right)^{7.464 * 0.05} \right] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_z = -0.628903Y = -1.52823 * 10^8$$

Το φορτίο είναι $P = \sigma_z \frac{\pi d_i^2}{4} = -12.733 \text{ kN}$ (44)

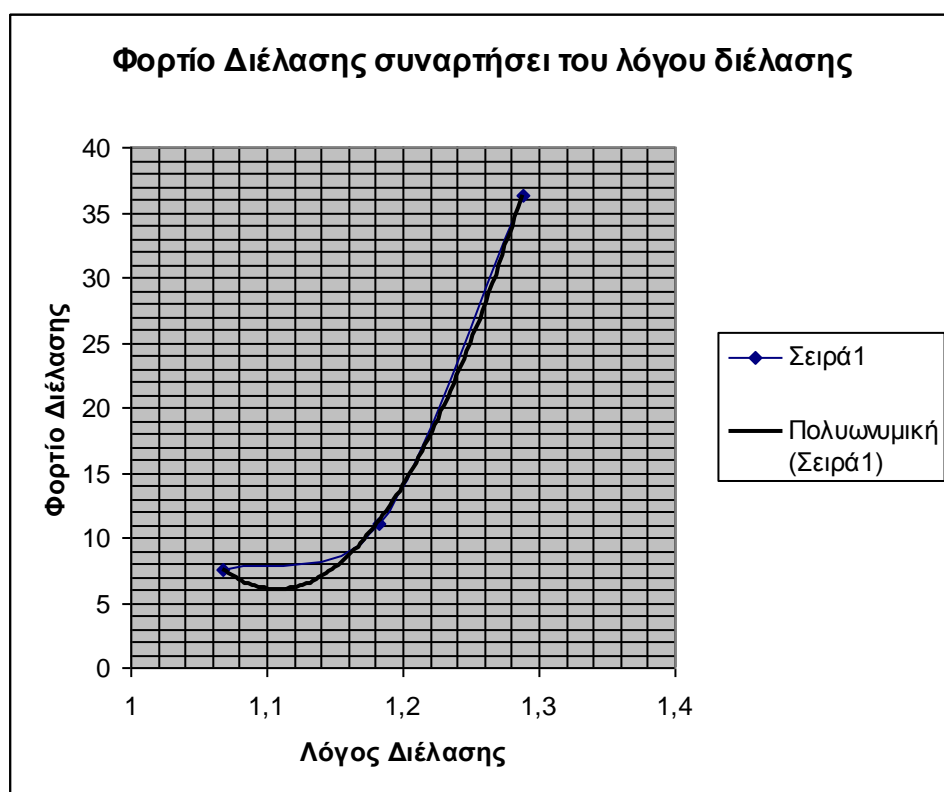
E. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα τα αποτελέσματα που προέβλεπε κάθε θεωρητικό μοντέλο. Να σημειωθεί πως επειδή η εφαρμογή του λόφου τριβή σε κυλινδρική περιοχή σημείωνε μεγάλη απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα και τα υπόλοιπα πρότυπα, δεν αναλύθηκε στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

1 ^η διέλαση	φάση	2 ^η διέλαση	φάση	3 ^η διέλαση	φάση	
11.120		7.500		36.250		Φορτίο Διέλασης[kN]
13		11		10.3		Αρχική διατομή[mm]
11		10.3		8		Τελική Διατομή[mm]
5.3882		1.501		5.11653		Μοντέλο δίχως τριβές
12.7055		3.6477		12.733		Λόφος Τριβή σε κωνική περιοχή
3.3885		20.726		23.872		Εμπειρική σχέση
28.762		252.926		236.832		Λόφος Τριβή σε κυλινδρική περιοχή

Πίνακας 4: Τιμές θεωρητικών προτύπων διέλασης

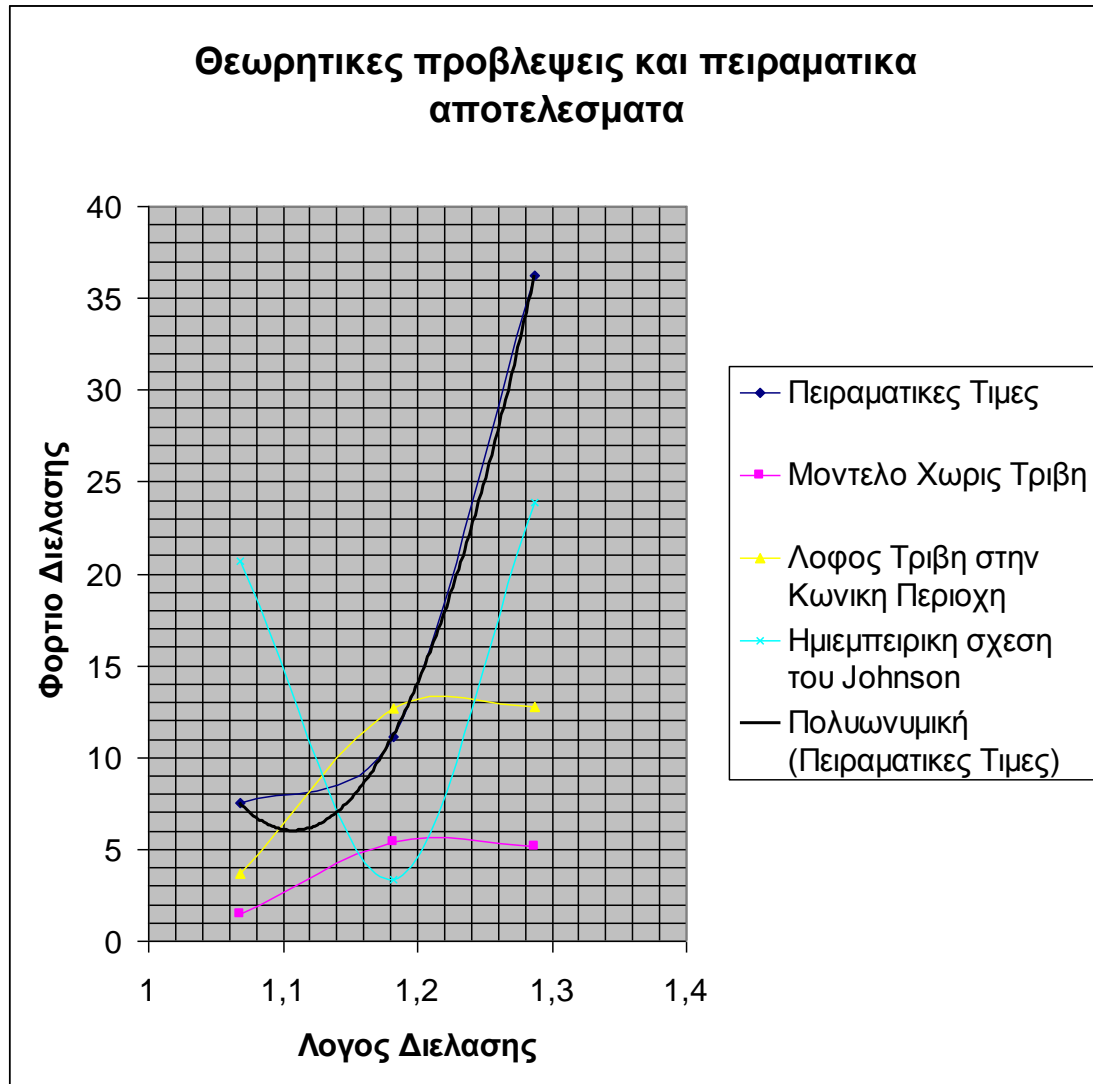
Η σύγκριση των τιμών αυτών γίνεται καλύτερα αντιληπτή μέσω των ακόλουθων διαγραμμάτων



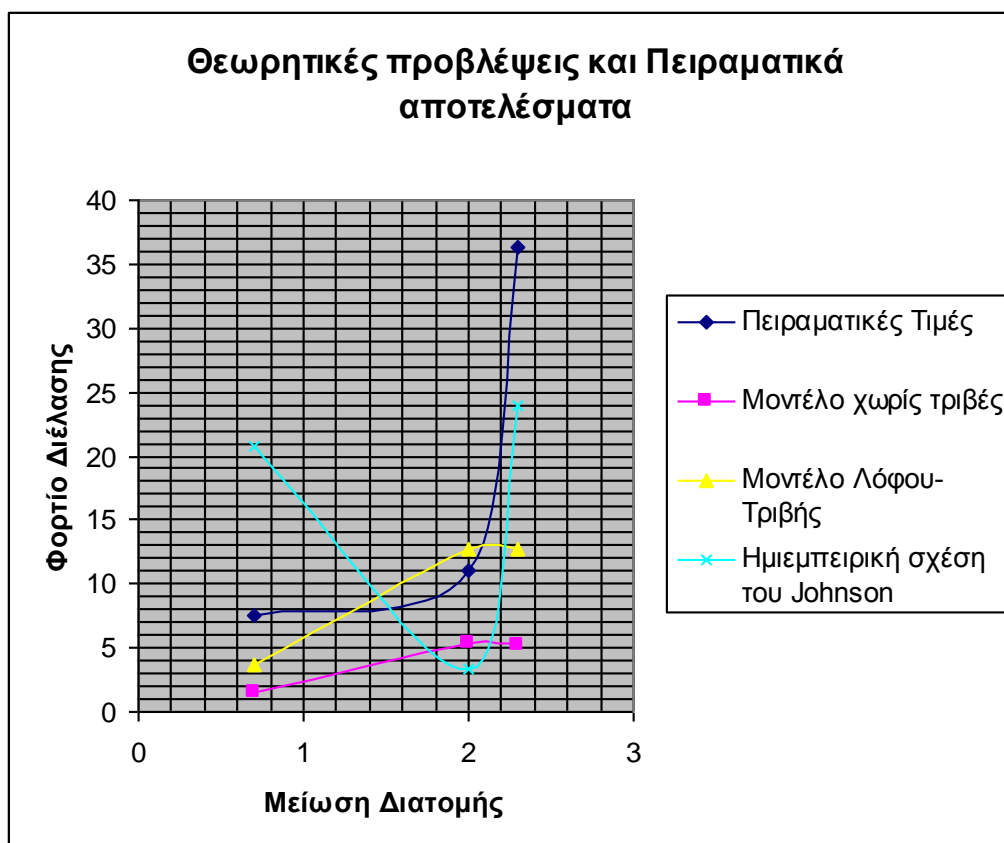
Διάγραμμα 68: Φορτίο διέλασης συναρτήσει του λόγου διέλασης

Εύκολα παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα πως το φορτίο ακολουθεί μια πολυωνυμική συνάρτηση (3^{ου} βαθμού) συναρτήσει του λόγου διατομής της κατεργασίας.

Στο επόμενο γράφημα φαίνονται οι προβλέψεις του φορτίου διέλασης από κάθε θεωρητικό μοντέλο σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Και πάλι, εμφανίζεται το φορτίο διέλασης να συνδέεται με το λόγο διέλασης με μια πολυωνυμική συνάρτηση (το φορτίο διέλασης αυξάνει όσο αυξάνεται ο λόγος διέλασης). Μάλιστα, όσο αυξάνεται ο βαθμός του πολυωνύμου, τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 69: Συγκριτικές τιμές των προτύπων διέλασης συναρτήσει του λόγου διέλασης



Διάγραμμα 70: Συγκριτικές τιμές των προτύπων διέλασης συναρτήσει της μείωσης διατομής

Συγκριτικά εμφανίζεται μια απόκλιση των θεωρητικών προβλέψεων από τα πειραματικά δεδομένα, αρκετά μεγάλη για την χρησιμοποίησή τους για υπολογισμούς αλλά ταυτόχρονα εμφανίζονται οι προβλέψεις να είναι αρκετά κοντά στα πειραματικά δεδομένα για χρησιμοποίησή τους για έναν πρώτο υπολογισμό της τάξης του φορτίου διέλασης. Η προσέγγισή τους κρίνεται δε καλύτερη σε μικρούς λόγους διέλασης από ότι σε μεγάλους.

Κανένα θεωρητικό πρότυπο δεν εμφανίζεται να υπερέχει σαφώς έναντι του άλλου: Κάποιες εκφράσεις είναι πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα για μεγάλους λόγους διέλασης(πχ η σχέση του Johnson) και άλλες εκφράσεις προσεγγίζουν καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα σε μικρούς λόγους διέλασης(πχ το μοντέλο λόφος-τριβή). Κάποια δε πρότυπα προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα με βάση τη μείωση της διατομής και όχι το λόγο διέλασης(πχ η σχέση του Johnson). Πάντως το μοντέλο λόφος τριβή με ολοκλήρωση στην κωνική περιοχή της μήτρας εμφάνισε και για τους 3 λόγους διέλασης τη μικρότερη απόκλιση

Βιβλιογραφία.

- I). Κατεργασίες I ,Δ. Μανωλάκος, ΕΜΠ.
- II). Drozda Tom, Wick Charles, Bakerjian Ramon, Veilleux Raymond F., Petro Louis, [*Tool and manufacturing engineers handbook*](#), SME, ISBN 0872631354.
- III). Joseph Bramah. (2009). In *Encyclopædia Britannica*. Retrieved August 21, 2009, from Encyclopædia Britannica Online: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/77465/Joseph-Bramah>
- IV). Διέλαση Διμεταλλικών και πορώδων υλικών, Σπυρίδων Ράπτης, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
- V). Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών :Μη-συμβατικές κατεργασίες, Α.Μάμαλης, εκδόσεις Άνωση, Αθήνα 2000

5. Χαρακτηρισμός του MgB_2 .

Selume Proferre

“Προς το φως”

Μετά την διέλαση του υλικού, κρίθηκε απαραίτητος ο χαρακτηρισμός αυτού και των ιδιοτήτων του ώστε να γίνει η σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες δομές MgB_2 και να βγουν συμπεράσματα για το πώς η διέλαση επηρέασε αυτές τις ιδιότητες.

Ο χαρακτηρισμός που έγινε ήταν καταστροφικός(οπτική μικροσκοπία, SEM, XRD, υπεραγωγίμος) πάντα ωστόσο με την βοήθεια ορατής ή αόρατης ακτινοβολίας. Είναι το φως δηλαδή ,ορατό ή αόρατο, που μας βοηθά να χαρακτηρίσουμε τον κόσμο μας. Τι ποιο λογικό λοιπόν τότε από το να στρεφόμεστε προς αυτό;

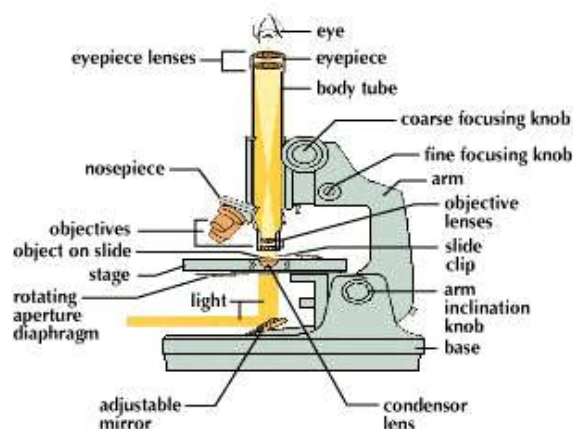
A. Οπτική μικροσκοπία.¹

Η οπτική μικροσκοπία είναι εδώ και δεκαετίες μια πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης και χαρακτηρισμού της δομής των υλικών(ειδικά στην μεταλλογραφία).Η πηγή ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται κυρίως είναι λευκό φως ενώ η διακριτική ικανότητα είναι της τάξης των 200nm (μεγεθυντική ικανότητα X100) με της ίδιας τάξης περίπου βάθους πεδίου.

Η διακριτική ικανότητα δ , είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δυο διακριτών σημείων του υλικού που κατά την απεικόνισή τους παρουσιάζονται ως διαχωρισμένα. Η διακριτική ικανότητα εκφράζεται είτε μέσω της απόστασης αυτής, δ , είτε μέσω της (μέγιστης)μεγέθυνσης ή μεγεθυντικής ικανότητας A. Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση δ , τόσο πιο μεγάλη είναι και η διακριτική ικανότητα αλλά και η μεγεθυντική ικανότητα. Η διακριτική ικανότητα είναι ανάλογη του δείκτη διάθλασης του μέσου που παρεμβάλλεται μεταξύ του αντικειμένου και του συστήματος φωτισμού και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος, λ , της πηγής.

Βάθος πεδίου D, ορίζεται η μέγιστη διαδρομή κατά μήκος του άξονα του μικροσκοπίου χωρίς να αλλοιωθεί η ποιότητα της απεικόνισής του. Η αρχή λειτουργίας αλλά και τα βασικά στοιχεία ενός απλού οπτικού μικροσκοπίου ανάκλασης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 70:

PARTS OF A LIGHT MICROSCOPE



Σχήμα 71: μέρη ενός οπτικού μικροσκοπίου

Η προετοιμασία του δοκιμίου που απαιτείται για τη συγκεκριμένη μέθοδο περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

1)Κοπή δοκιμίων.

2)Λείανση της προς παρατήρηση επιφάνειας. Πραγματοποιείται είτε με μηχανικές είτε με ηλεκτροχημικές μεθόδους και αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της επιφάνειας. Για μηχανική λείανση χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά με σκληρούς κόκκους από Al_2O_3 ή SiC , των οποίων η αποξεστική δράση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του μέσου μεγέθους των λειαντικών κόκκων. Χρησιμοποιώντας λειαντικά χαρτιά με μικρότερους κόκκους, η λείανση γίνεται όλο και πιο λεπτομερής. Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας ονομάζεται στίλβωση και περιλαμβάνει λείανση με ειδικά βελούδα.

3)Χημική προσβολή.

Η λεία μεταλλική επιφάνεια εμβαπτίζεται σε αντιδραστήριο κατάλληλης χημικής σύστασης, που εξαρτάται από το προς μελέτη υλικό, και για χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα ως μερικά λεπτά. Κατά την εμβάπτιση αυτή, το όριο των κόκκων διαβρώνεται εκλεκτικά από το χημικό αντιδραστήριο. Επίσης άτομα που ανήκουν σε διαφορετικά κρυσταλλικά πλέγματα(δηλαδή σε διαφορετικές φάσεις), διαλύονται με διαφορετικούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα τη δημιουργία αντίθεσης στην επιφάνεια και την εμφάνιση και απεικόνιση των μικροδομικών χαρακτηριστικών κατά την οπτική μικροσκοπική παρατήρηση. Ωστόσο το στάδιο αυτό μπορεί να παραληφθεί αν το δείγμα είναι ευαίσθητο στη χημική προσβολή.

Η τεχνική απεικόνισης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή του κάθετου φωτισμού ή αλλιώς φωτεινού πεδίου. Σε αυτήν οι επίπεδες επιφάνειες φαίνονται φωτεινές ενώ οι πλάγιες(όρια κόκκων)φαίνονται σκοτεινές.

Εκτός από αυτή την τεχνική υπάρχουν δύο άλλοι τρόποι φωτογραφίας του οπτικού μικροσκοπίου:

Πλάγιος φωτισμός: Η φωτεινή δέσμη προσπίπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου υπό γωνία μετά από κατάλληλη μετατόπιση του συμπυκνωτή φακού, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίθεσης και την ευκολότερη διάκριση διαφόρων στοιχείων της μικροδομής.

Σκοτεινό πεδίο: Η φωτεινή δέσμη προσπίπτει από πλάγια θέση στην επιφάνεια του δοκιμίου με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ακτινοβολία να μη διέρχεται διαμέσου του αντικείμενου φακού. Έτσι οι επίπεδες περιοχές της επιφάνειας του δοκιμίου φαίνονται μαύρες και οι πλάγιες(όρια κόκκων)φαίνονται λευκές. Ο φωτισμός σκοτεινού πεδίου αυξάνει την αντίθεση στις περιπτώσεις εικόνας χαμηλής φωτεινότητας και δεν είναι τόσο διαδεδομένος όσο αυτός του φωτεινού πεδίου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το δείγμα λειάνθηκε δίχως όμως να υποστεί χημική προσβολή διότι το χημικό αντιδραστήριο θα προκαλούσε σημαντική φθορά στο δείγμα.

Οι φωτογραφίες του δοκιμίου από την 1^η φάση διέλασης που λήφθηκαν με το οπτικό μικροσκόπιο είναι οι ακόλουθες:

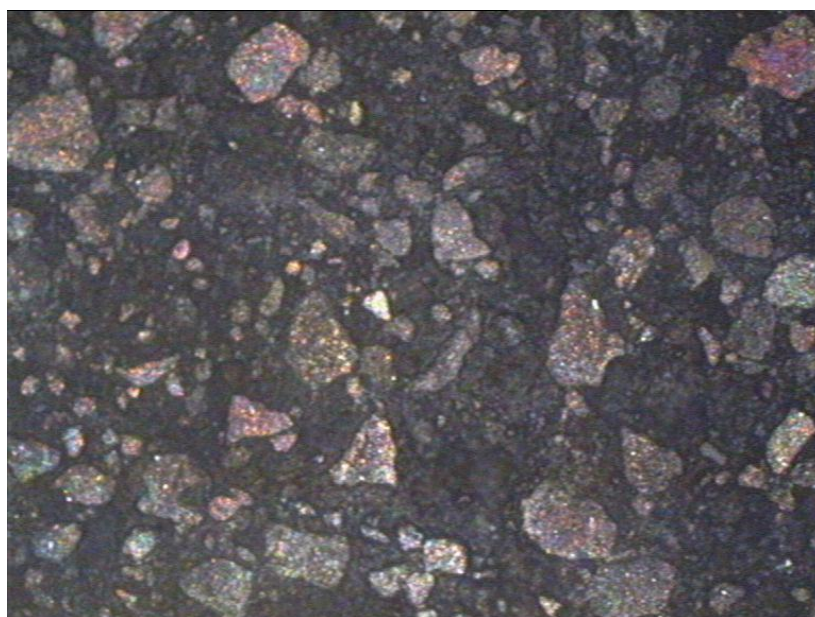
A. Μεγέθυνση του δείγματος 50 φορές.



Φωτογραφία 72:Οπτική φωτογραφία του δείγματος σε μεγέθυνση x50 φορές

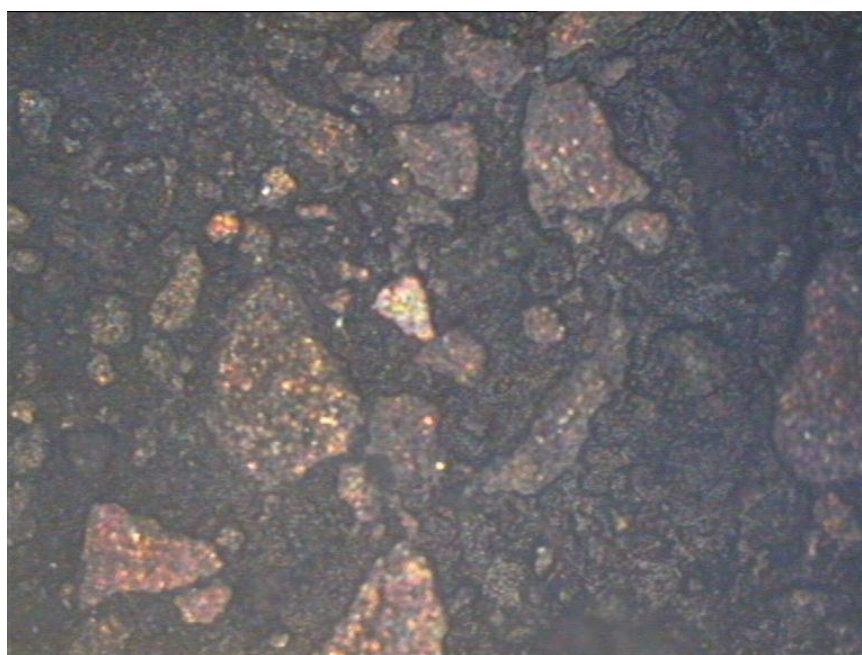
Το υλικό φαίνεται εδώ πως είναι διφασικό, αποτελείται δηλαδή από δύο φάσεις ξεχωριστές μεταξύ τους, το μαγνήσιο (Mg) και το βόριο (B). Το μαγνήσιο είναι οι κόκκοι που φαίνονται φωτεινοί στην φωτογραφία (επειδή το μαγνήσιο είναι μέταλλο και έχει έντονο γυαλιστερό χρώμα) ενώ το βόριο είναι η μαύρη επιφάνεια ανάμεσα στους κόκκους του μαγνησίου (αμέταλλο σε χρώμα σκούρο καφέ). Στην φωτογραφία, φαίνονται οι κόκκοι καθώς και τα όρια τους. Να σημειωθεί πως η υπεραγωγιμότητα του MgB_2 παρατηρείται στα όρια των κόκκων του Βορίου.

B. Μεγέθυνση του δείγματος 100 φορές.



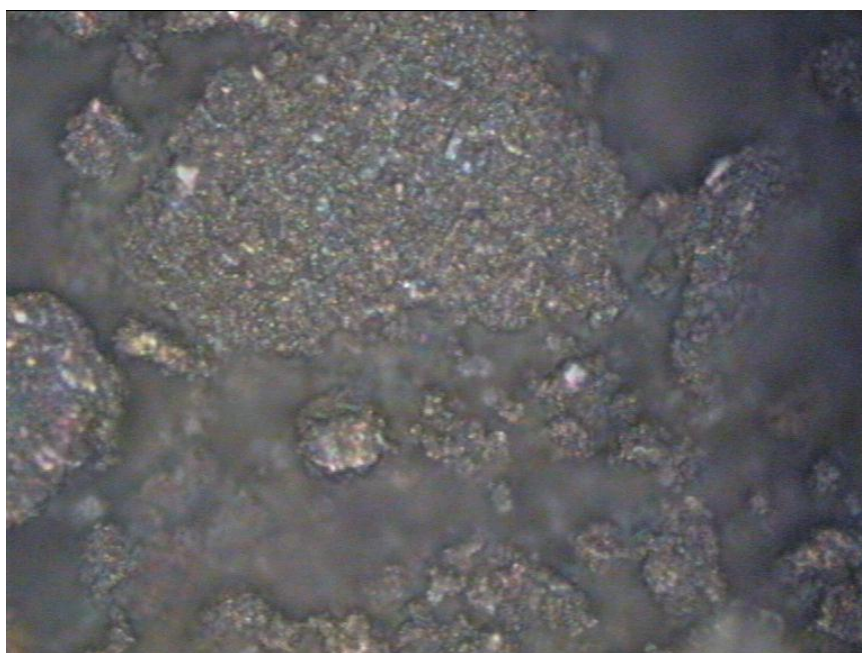
Φωτογραφία 73:Οπτική φωτογραφία του δείγματος σε μεγέθυνση x100 φορές

C. Μεγέθυνση του δείγματος 200 φορές.



Φωτογραφία 74:Οπτική φωτογραφία του δείγματος σε μεγέθυνση x200 φορές

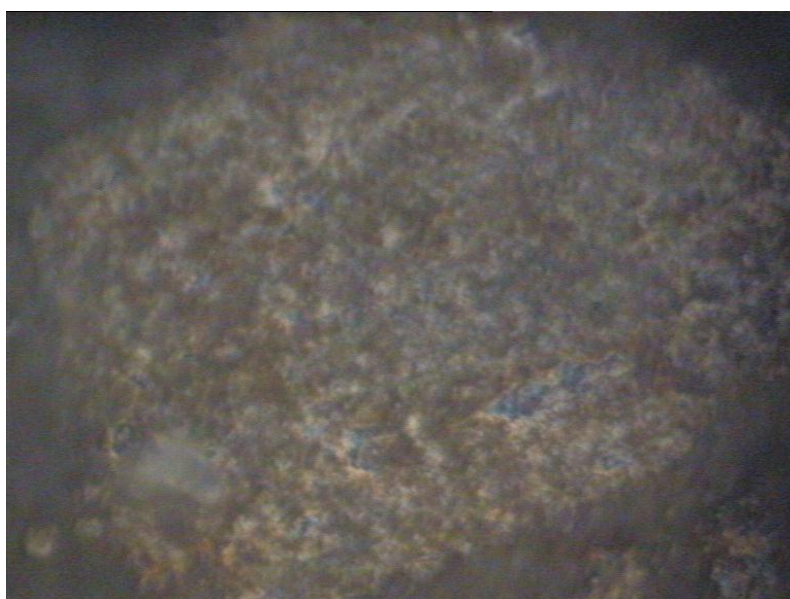
D. Μεγέθυνση του δείγματος 500 φορές.



Φωτογραφία 75:Οπτική φωτογραφία του δείγματος σε μεγέθυνση x500 φορές

Στην παραπάνω φωτογραφία, περιοχές του δείγματος 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»).

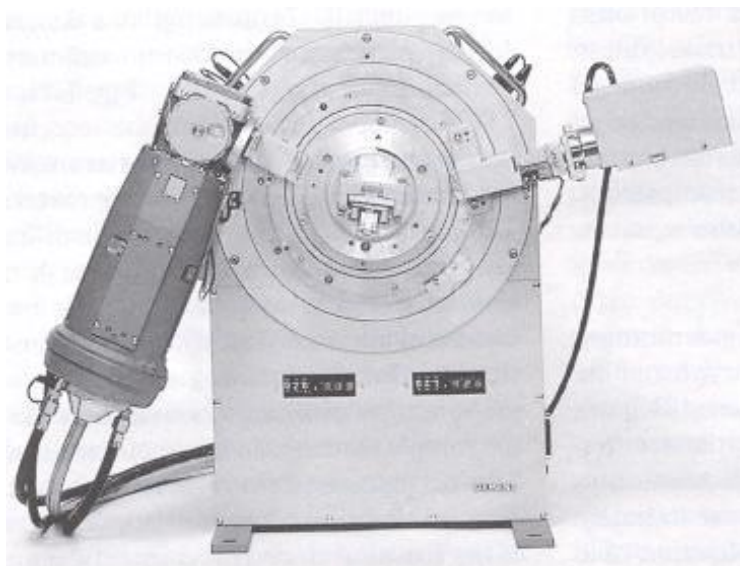
E. Μεγέθυνση του δείγματος 1000 φορές.



Φωτογραφία 76:Οπτική φωτογραφία του δείγματος x1000 φορές

Εδώ φαίνεται ένας κόκκος μαγνησίου στο υλικό.

B. Περίθλαση ακτίνων X (X Ray Diffraction-XRD).^{1,2,3,4}



Φωτογραφία 77:Συσκευή διάθλασης ακτίνων X

Η περίθλαση ακτίνων X είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος χαρακτηρισμού υλικών. Παρουσιάζει εξαιρετικά πλεονεκτήματα όπως ευαισθησία, ευελιξία, αξιοπιστία.

Ανακαλύφθηκε το 1913 από τους Sir W.H. Bragg και τον γιό του Sir W.L. Bragg κατά την μελέτη της ανάκλασης ακτίνων X σε κρύσταλλα (βραβεύθηκαν αμφότεροι με Nobel).

Με τη βοήθειά της γίνεται ποσοτική και ποιοτική ανάλυση φάσεων, προσδιορισμός κρυσταλλικότητας, ηλεκτρικό πεδίο πλέγματος έως και ανίχνευση παραμένουσων τάσεων.

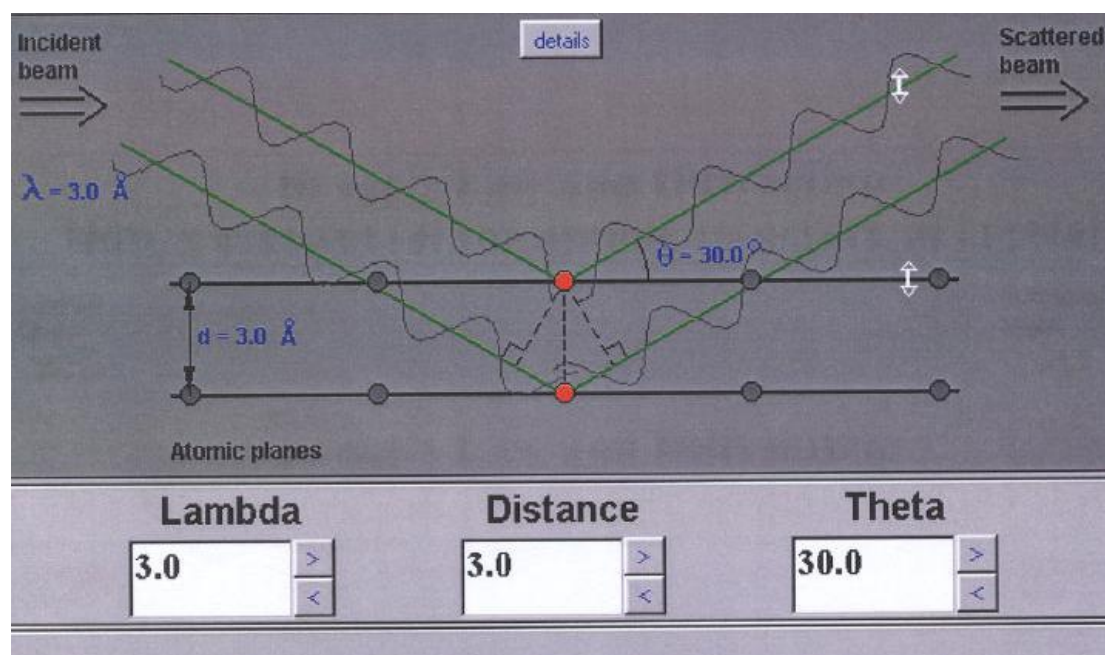
Η μέτρηση αυτή είναι δυνατή επειδή το μήκος κύματος των ακτίνων X είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενδοατομική απόσταση στους μεταλλικούς κρυστάλλους d (περίπου 1 Angstrom). Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων X καθιστά δυνατή τη διείσδυση τους στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά ένα ποσοστό και την ανάκλασή τους πάνω στα πλεγματικά επίπεδα.

Κατά την πρόσπτωση ακτίνων X συγκεκριμένου μήκους κύματος λ , σε ένα κρυσταλλικό στερεό παραλλήλων επιπέδων (hkl) υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

- ❖ Οι διάφορες ανακλώμενες δέσμες να μην είναι ομοφασικές οπότε δεν παρατηρείται ενίσχυση της έντασης της ακτινοβολίας.
- ❖ Οι διάφορες ανακλώμενες γωνίες για κάποια γωνία πρόσπτωσης θ είναι ομοφασικές και συμβάλλουν με αποτέλεσμα την ενίσχυση της εξερχόμενης ακτινοβολίας.

Η σχέση μεταξύ της γωνίας θ του μήκους κύματος λ των ακτίνων X αλλά και της διαπλεγματικής απόστασης d δίνεται από τη γνωστή εξίσωση Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (72)$$



Σχήμα 78: Τρόπος λειτουργίας ενός XRD

όπου n η τάξη της περίθλασης (και επειδή τις περισσότερες φορές ενδιαφέρων παρουσιάζουν τα μέγιστα πρώτης τάξης $n=1$).

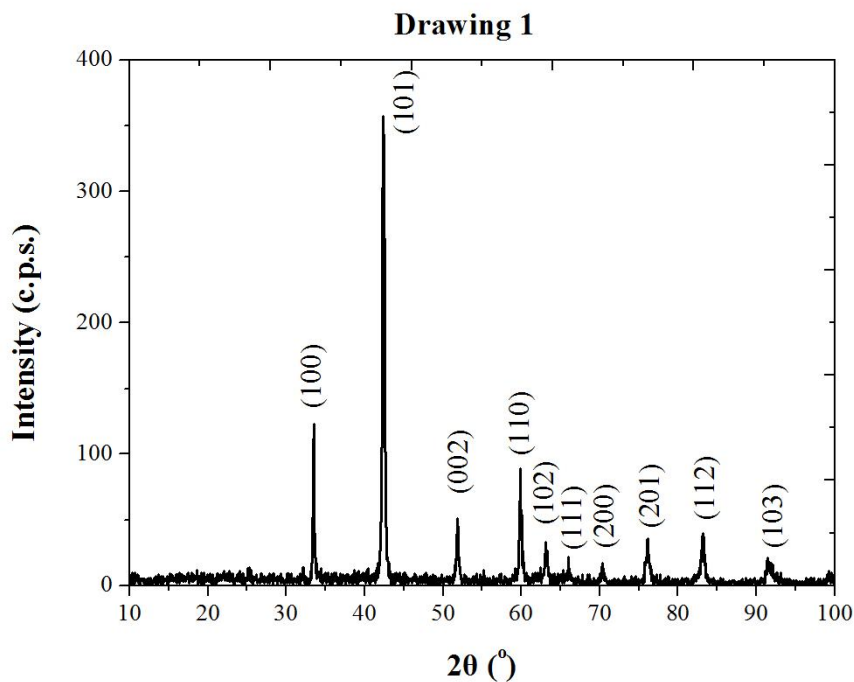
Η πειραματική διάταξη XRD αποτελείται από

- ❖ Πηγή ακτίνων X συγκεκριμένου μήκους κύματος
- ❖ Ανιχνευτή ακτίνων X
- ❖ Γωνιόμετρο.

Καταγράφεται η ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τη γωνία 2θ και από την εξίσωση Bragg υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές διαπλεγματικές αποστάσεις d για διάφορα επίπεδα (hkl) . Με τη βοήθεια κατάλληλης βάσης δεδομένων, προσδιορίζεται το είδος των φάσεων του υπό εξέταση υλικού.

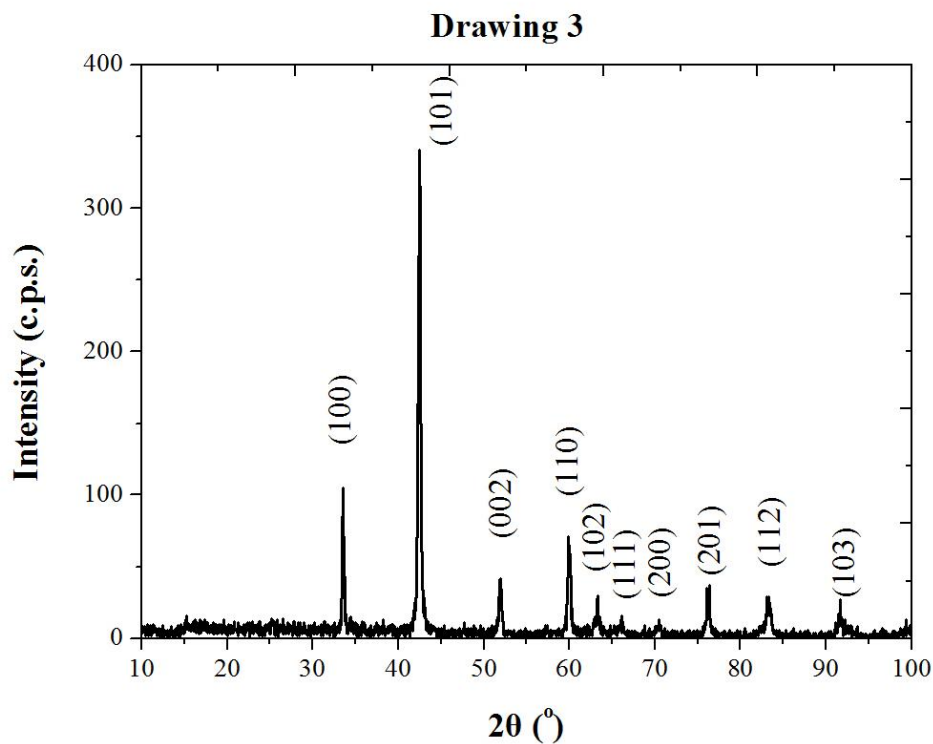
Από το δείγμα που θα χαρακτηριστεί με XRD απαιτείται το μέγεθος των κόκκων του να κυμαίνεται από 0.1mm έως 40mm ενώ πρέπει να έχει λειανθεί η επιφάνειά του για καλύτερη ανάλυση και μετά να έχει θερμανθεί ώστε να φύγουν οι παραμένουσες τάσεις λόγω της προηγούμενης λείανσης.

Τα αποτελέσματα από το χαρακτηρισμό με XRD του δοκιμίου της πρώτης διέλασης είναι τα ακόλουθα:



Διάγραμμα 79: Αποτελέσματα XRD δοκιμίου μιας διέλασης

Ενώ τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού του δοκιμίου της τρίτης διέλασης μέσω XRD εμφανίζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 80: Αποτελέσματα XRD δοκιμίου τριών διελάσεων

Παρατηρούνται συνολικά 10 επίπεδα,
τα (100),(101),(002),(110),(102),(111),(200),(201),(112) και (103).

Για κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα θα υπολογιστεί η κρυσταλλική σταθερά d_{hkl} από την μαθηματική σχέση:

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2}} \quad (73)$$

Στο εξαγωνικό κρυσταλλικό σύστημα (που είναι το σύστημα κρυστάλλωσης του MgB₂) a=b και c~1.633a.

Πλέον η σχέση για την κρυσταλλική σταθερά γίνεται

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{a}\right)^2 + \left(\frac{l}{1.633a}\right)^2}} \quad (74)$$

με a=2r, όπου r η ατομική ακτίνα του κύριου στοιχείου.

Εφόσον το κύριο άτομο είναι το άτομο του βορίου(B) και η ατομική ακτίνα του βορίου είναι 0.9Å, a=2r=1.8Å και c=2.9394Å

Πλέον η κρυσταλλική σταθερά για κάθε επίπεδο με βάση τους δείκτες Miller του είναι

$$(74) \rightarrow d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{a}\right)^2 + \left(\frac{l}{1.633a}\right)^2}} = \begin{matrix} 1.8 \\ 1.535 \\ 1.4967 \\ 1.2728 \\ 1.1384 \\ 1.1680 \\ 0.9 \\ 0.8606 \\ 0.9261 \\ 0.8606 \end{matrix} \text{ Angstrom}$$

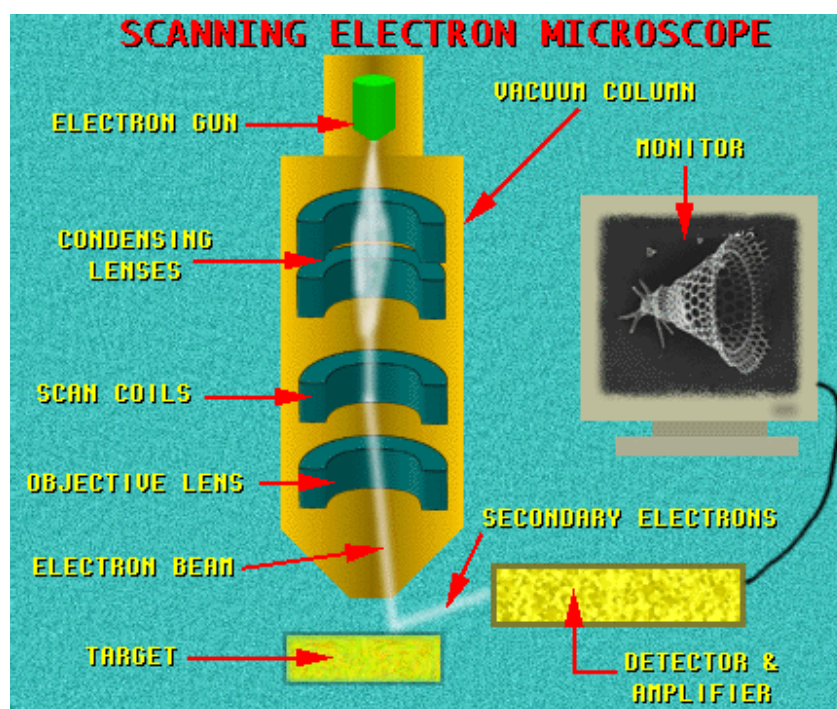
Παρατηρείται πως και στις δύο διελάσεις κυριαρχεί η κρυστάλλωση του υλικού στο επίπεδο (101).

Σε σχέση με την πρώτη διέλαση, στο υλικό που έχει υποστεί τρεις διελάσεις φαίνεται τα επίπεδα κρυστάλλωσης (101),(112),(200) και (100) να μειώνονται. Την αύξηση αυτή φαίνεται να την κερδίζουν τα επίπεδα (201) και (103).

Αυτή η αύξηση των δεικτών Miller(201),(103) αντί των (101),(112),(200) και (100) δείχνει πως στην διεύθυνση του *a* (201) και *c*(103) μειώνεται η πλεγματική απόσταση d_{hkl} (λογικό αφού συμπιέστηκε το υλικό) ενώ ταυτόχρονα ελαττώνεται και η πυκνότητα των κόμβων σε εκείνη τη διεύθυνση.

C. Ηλεκτρονική μικροσκοπία Σάρωσης(Scanning Electron Microscopy-SEM).¹

Το σύστημα αποτελείται από μια στήλη παραγωγής και εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων, σε κενό(<10⁻³ Pa). Η πηγή ηλεκτρονίων που λειτουργεί σε μια περιοχή τάσεων από 0-30kV και δημιουργεί δέσμη ηλεκτρονίων που επιταχύνεται μέσω μαγνητικών πεδίων και εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου.



Σχήμα 81:Μέρη ενός SEM

Το υπό εξέταση δοκίμιο σαρώνεται από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων και τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια συλλέγονται και ενισχύονται για να δημιουργήσουν οπτικό σήμα.

Τα ηλεκτρόνια που συλλέγονται μπορεί να είναι:

- ❖ Ηλεκτρόνια Auger. Όταν ηλεκτρόνια της εσωτερικής στοιβάδας του ατόμου διεγερθούν και εγκαταλείψουν το άτομο τότε ηλεκτρόνια εξωτερικής στοιβάδας «κατεβαίνουν» στοιβάδα για να καλύψουν το εσωτερικό κενό εκπέμποντας ταυτόχρονα φωτόνια ώστε να έχουν την επιτρεπόμενη ενέργεια της εσωτερικής στοιβάδας. Αν τα φωτόνια αυτά χτυπήσουν ηλεκτρόνια εξωτερικής στοιβάδας και αυτά διεγερθούν και εγκαταλείψουν το άτομο, τότε λέγονται ηλεκτρόνια Auger. Το φάσμα που προκύπτει από τη συλλογή τους είναι κατάλληλο για χημικές αναλύσεις της επιφάνειας του υλικού.
- ❖ Δευτερογενή ηλεκτρόνια. Είναι τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων (βάθους έως 10nm). Έχουν ενέργεια $E \sim 50\text{eV}$ και προέρχονται από την αμέσως επόμενη βαθμίδα της επιφάνειας. Η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και της ανωμαλίες της επιφάνειας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τη δέση των δευτερογενών ηλεκτρονίων αφορούν κυρίως την τοπογραφία της επιφάνειας.
- ❖ Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Είναι τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τις ελαστικές συγκρούσεις μεταξύ των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων των επιφανειακών στρωμάτων (βάθους έως και 100nm). Η ενέργειά τους είναι μεταξύ 5 και 50 keV και η ένταση του παραγόμενου σήματος εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό (Z) των στοιχείων της επιφάνειας και από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, ενώ η αντίθεση που δημιουργείται από αυτήν που επιτυγχάνεται με τη χρήση δευτερογενών ηλεκτρονίων. Οι πληροφορίες, άρα, που συλλέγονται από τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι σχετικές με τη χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της αναλυόμενης επιφάνειας.
- ❖ Ακτίνες X. Οι ακτίνες X παράγονται από το επιφανειακό στρώμα του δοκιμίου μέχρι βάθους 1 μm και εξαρτώνται από το είδος των ατόμων της επιφάνειας. Η ανάλυση των εκπεμπόμενων ακτινών X οδηγεί σε χημική ανάλυση της επιφάνειας (γνωστή ως μικροανάλυση ακτινών X) η οποία γίνεται συνήθως παράλληλα με την παρατήρηση σε SEM.

Το βάθος πεδίου D και η διακριτική ικανότητα δ είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα οπτικά μικροσκόπια. Έτσι σε μεγέθυνση X200 το

αντίστοιχο βάθος πεδίου του SEM είναι 100μm ενώ του οπτικού μικροσκοπίου 0.7μm.

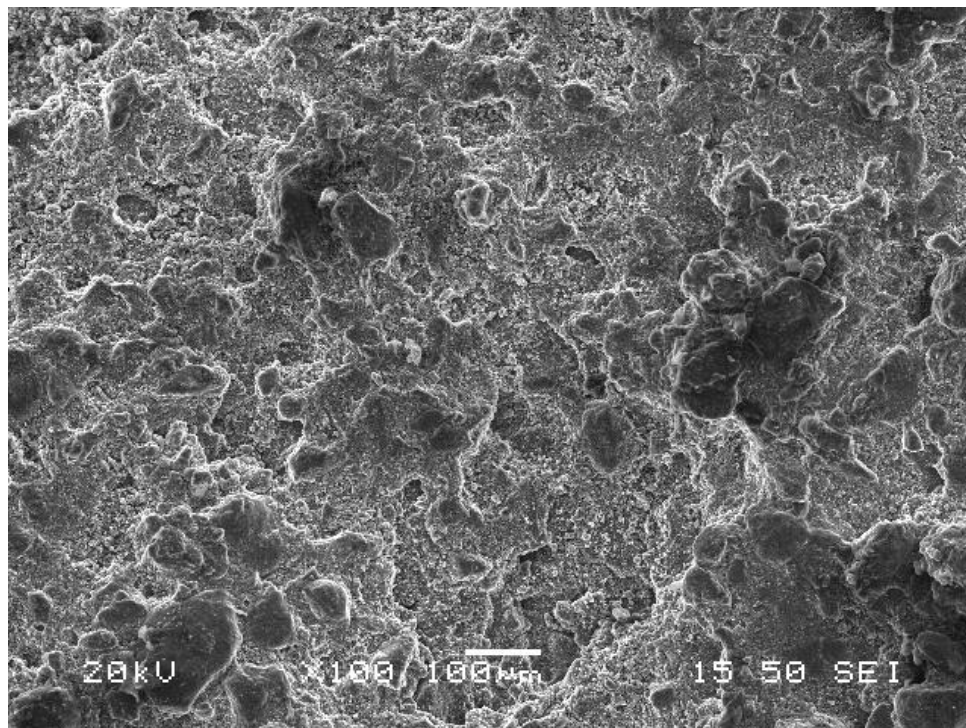
Λόγω του μεγάλου βάθους πεδίου, η προετοιμασία των δοκιμίων στο SEM είναι μικρή. Πρέπει να έχουν μικρό μέγεθος(οριζόντια διάσταση της τάξης των 10cm ενώ όχι πάχος μεγαλύτερο των 40mm) Η λείανση ακολουθείται από έντονη χημική προσβολή για την αύξηση της επιφάνειας και άρα αύξηση των δευτερογενών ηλεκτρονίων. Μη αγώγιμα υλικά(πχ πλαστικά) καλύπτονται από λεπτά επιστρώματα αγώγιμων όπως Cu,Au, γραφίτη για την επίτευξη αγωγιμότητας στην επιφάνεια.



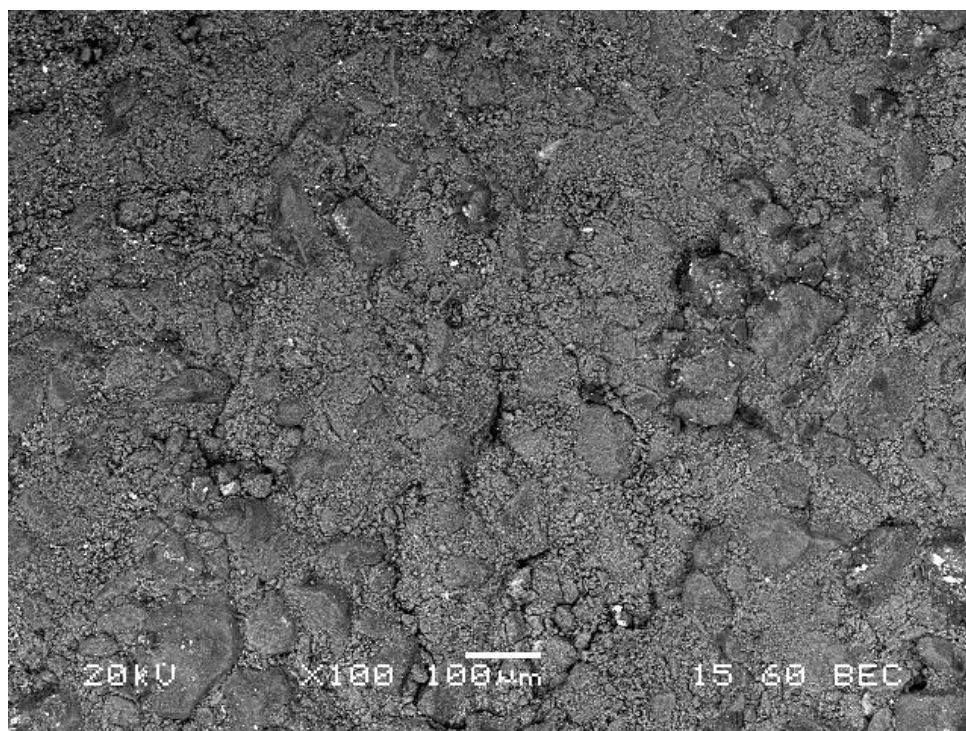
Φωτογραφία 82:Το SEM της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Παρατίθενται διαδοχικά οι μεγεθύνσεις του υλικού για μία και τρεις φάσεις διέλασης:

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 100 φορές:

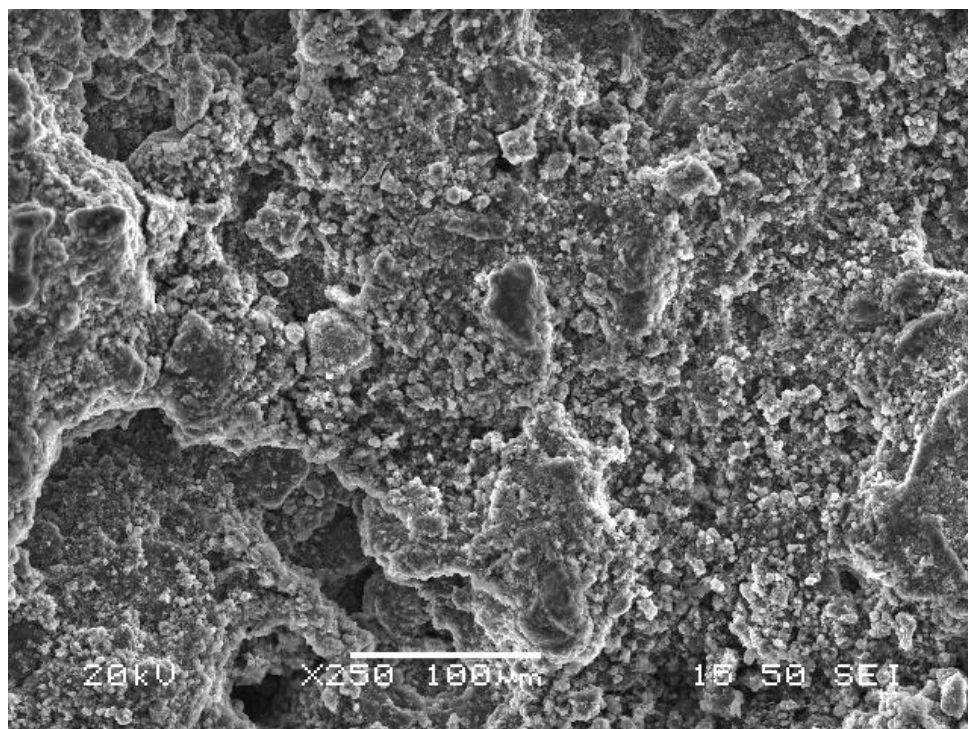


Φωτογραφία 83:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

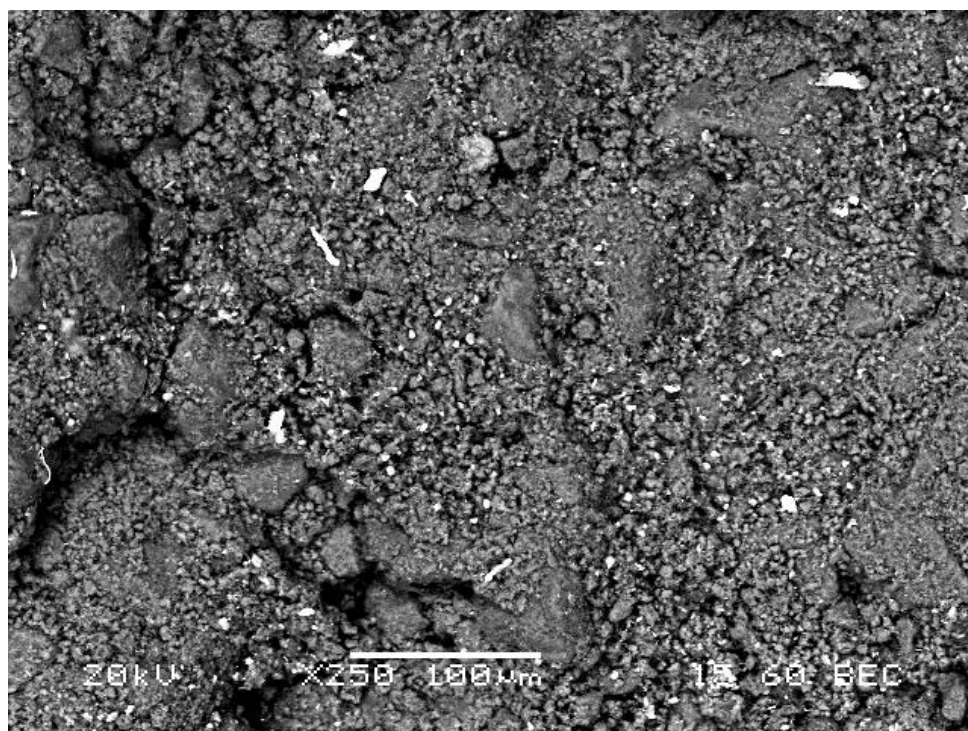


Φωτογραφία 84:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 250 φορές:

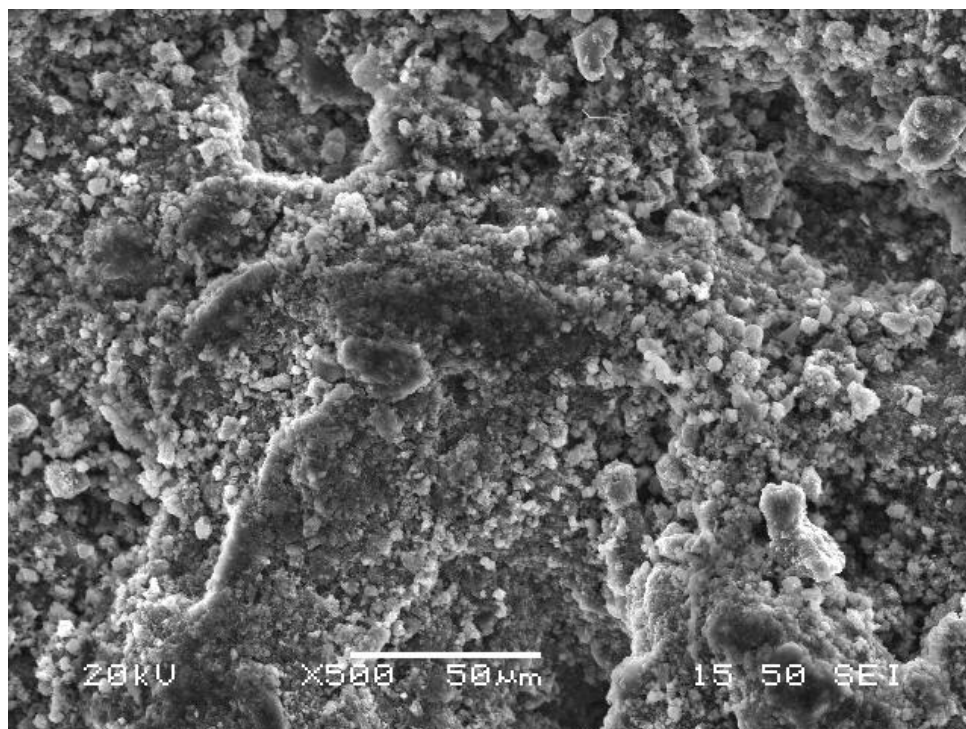


Φωτογραφία 85:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου



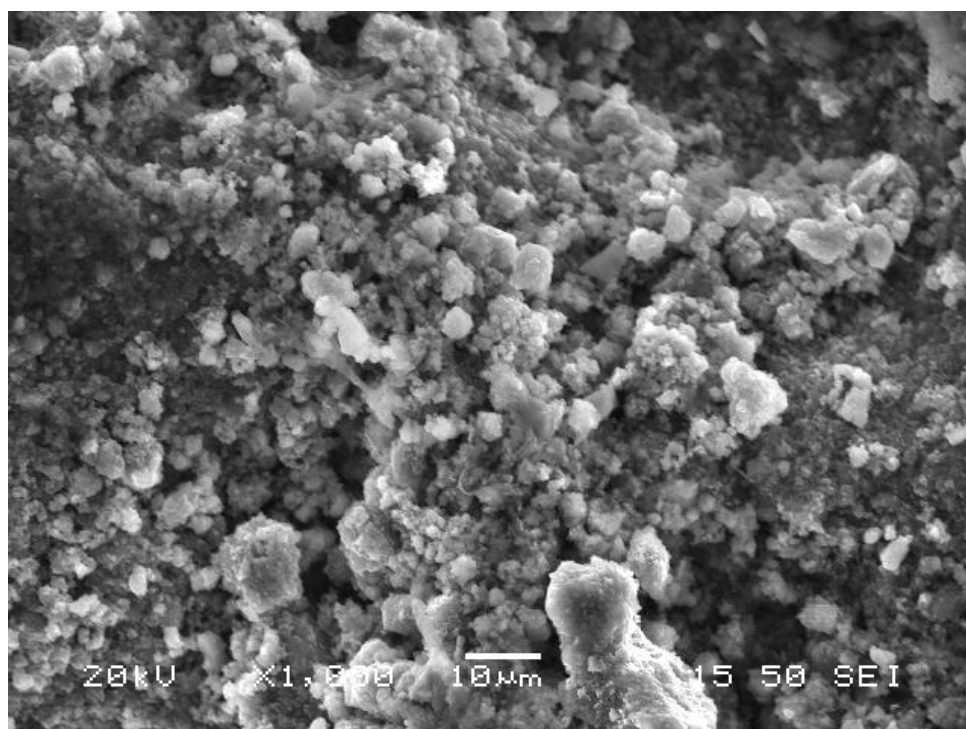
Φωτογραφία 86:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 500 φορές:



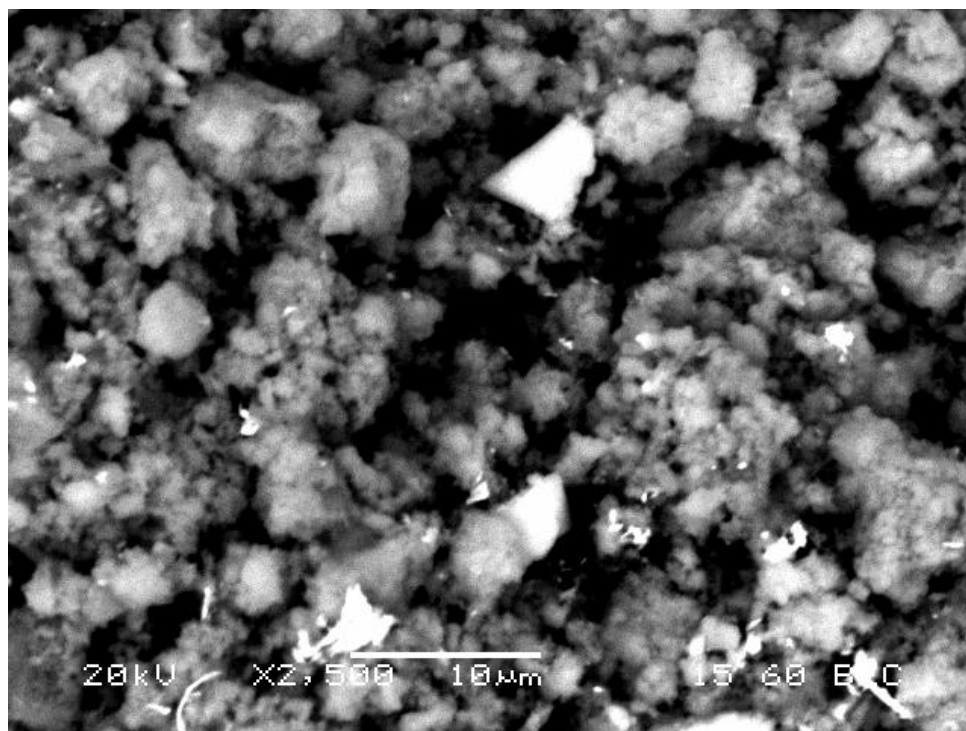
Φωτογραφία 87:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 1000 φορές:



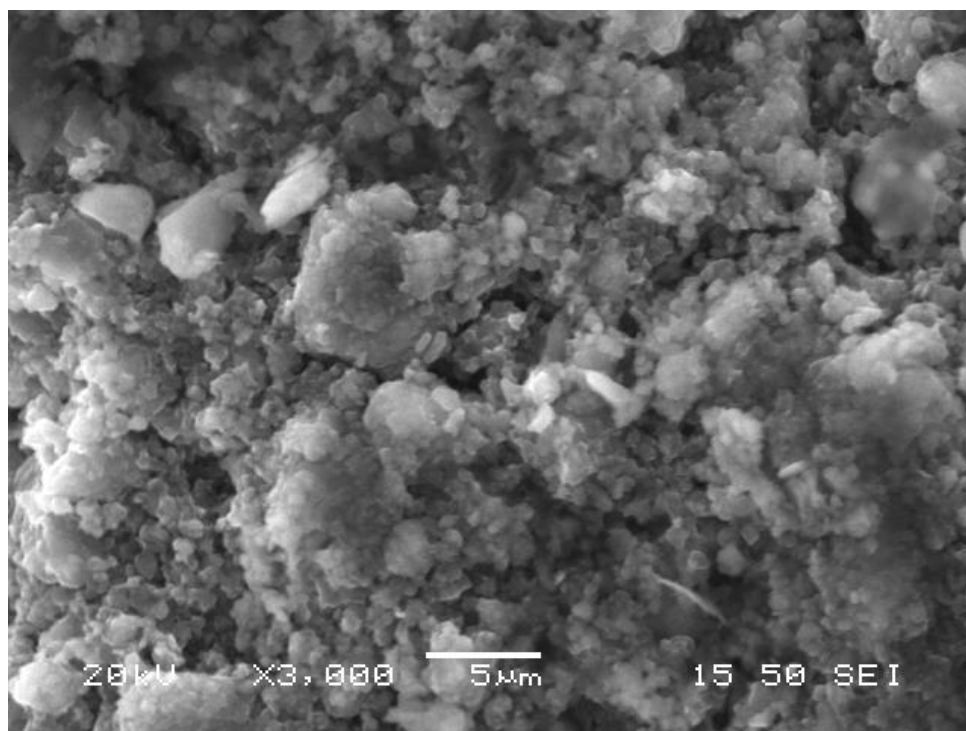
Φωτογραφία 88:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 2500 φορές:



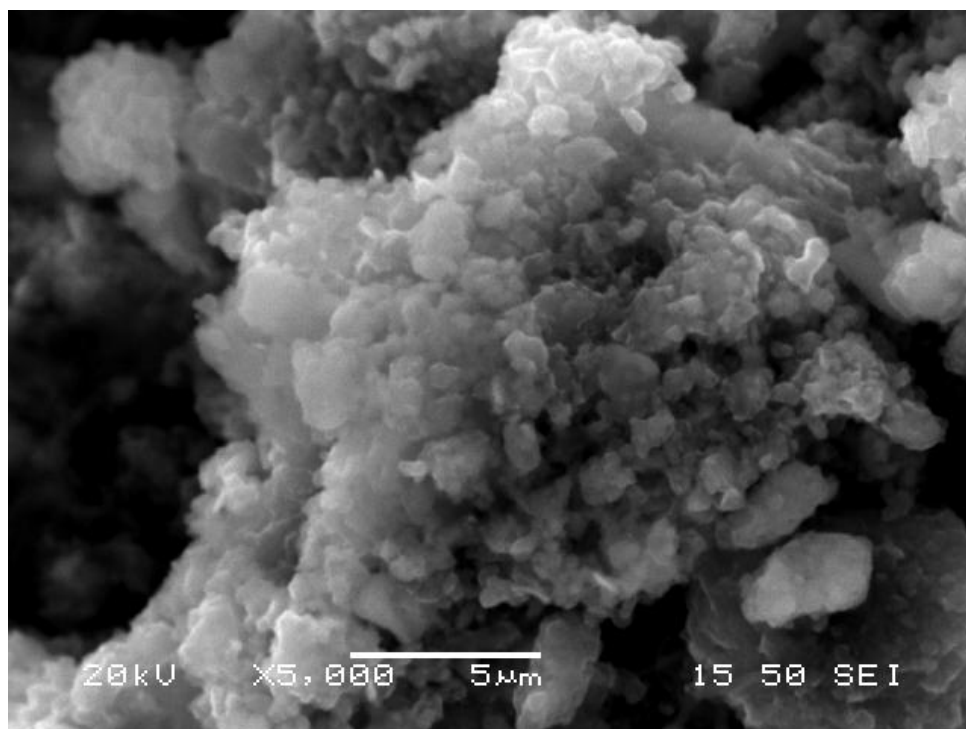
Φωτογραφία 89:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 3000 φορές:

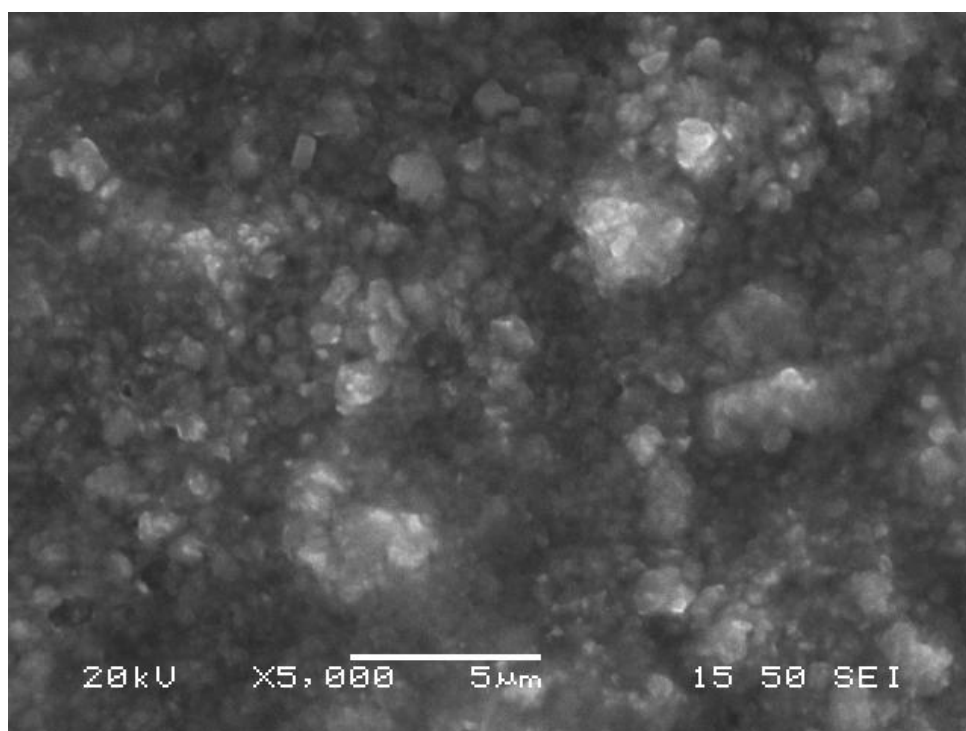


Φωτογραφία 90:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

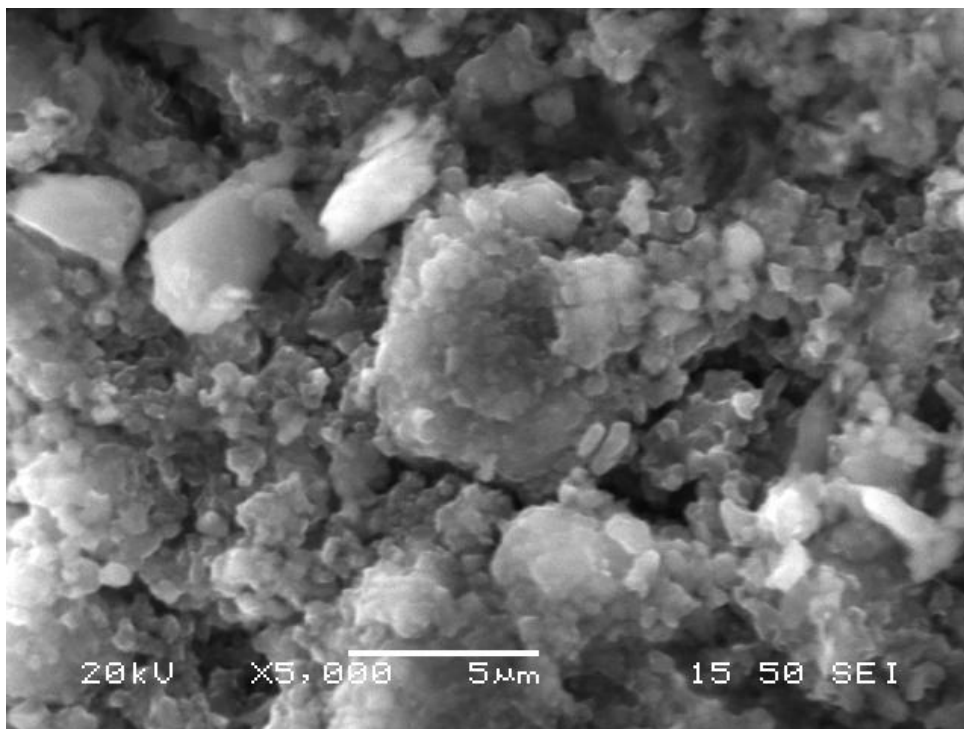
Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 5000 φορές:



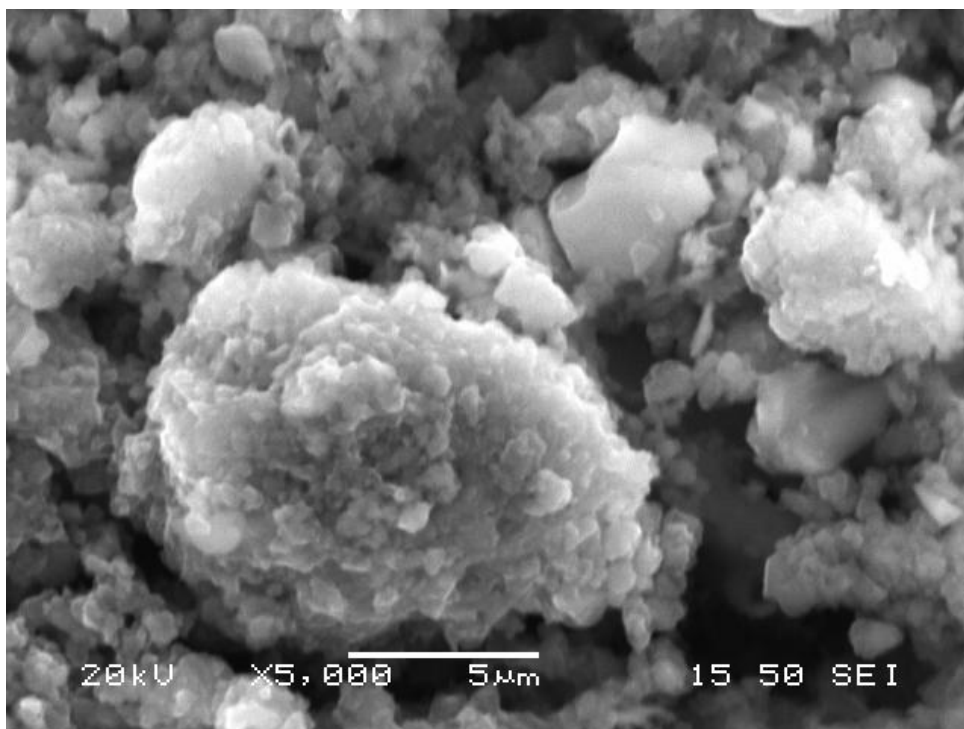
Φωτογραφία 91:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου



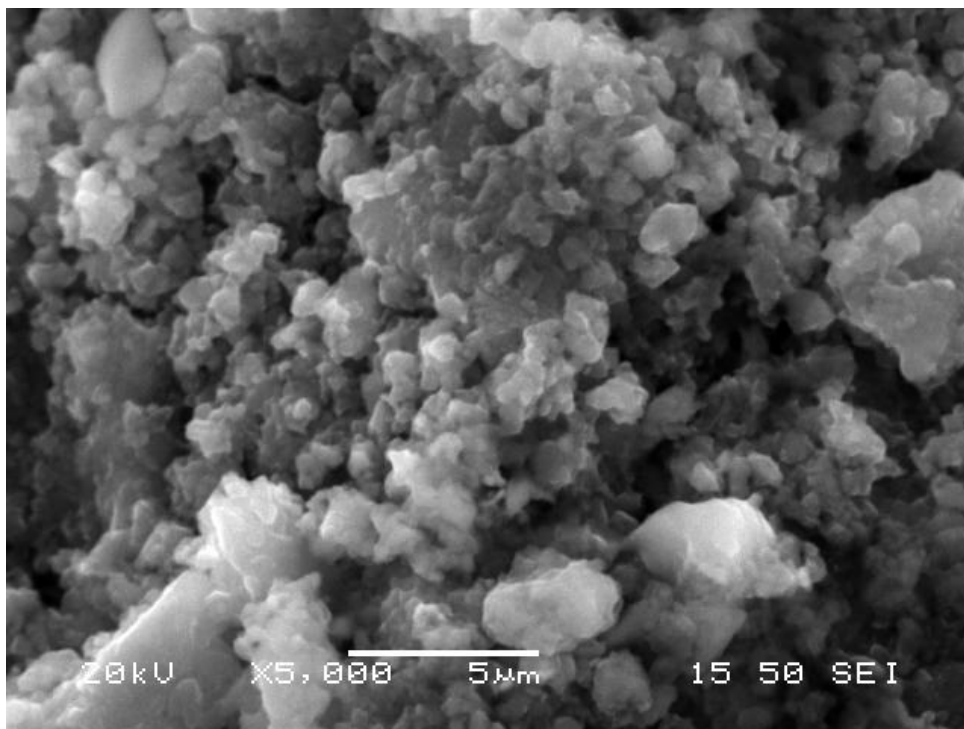
Φωτογραφία 92:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου



Φωτογραφία 93:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

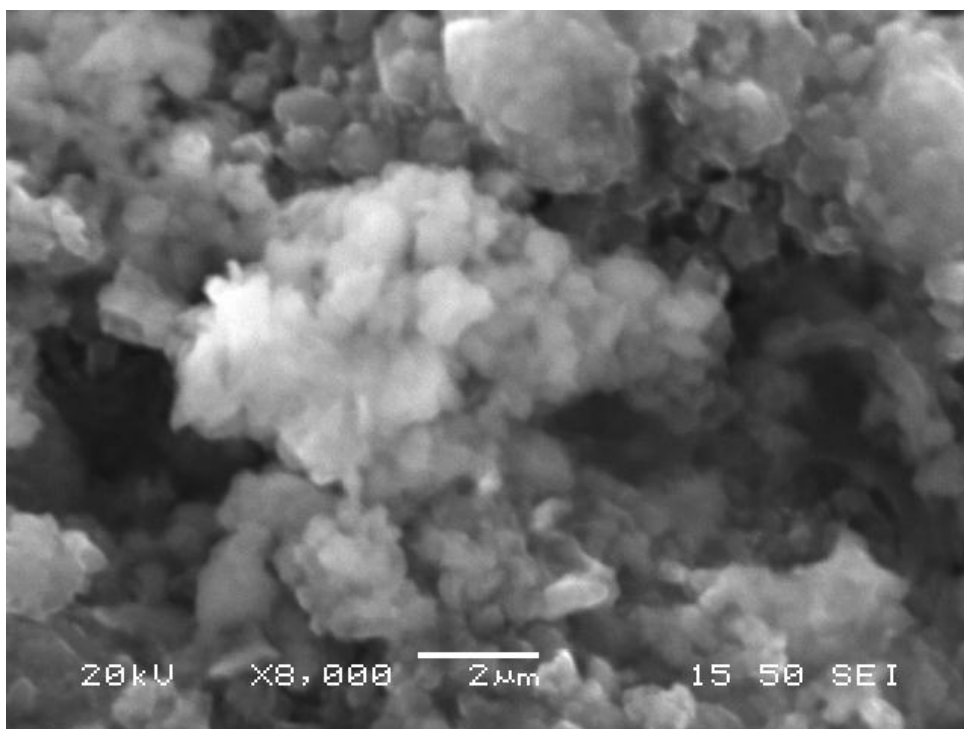


Φωτογραφία 94:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου



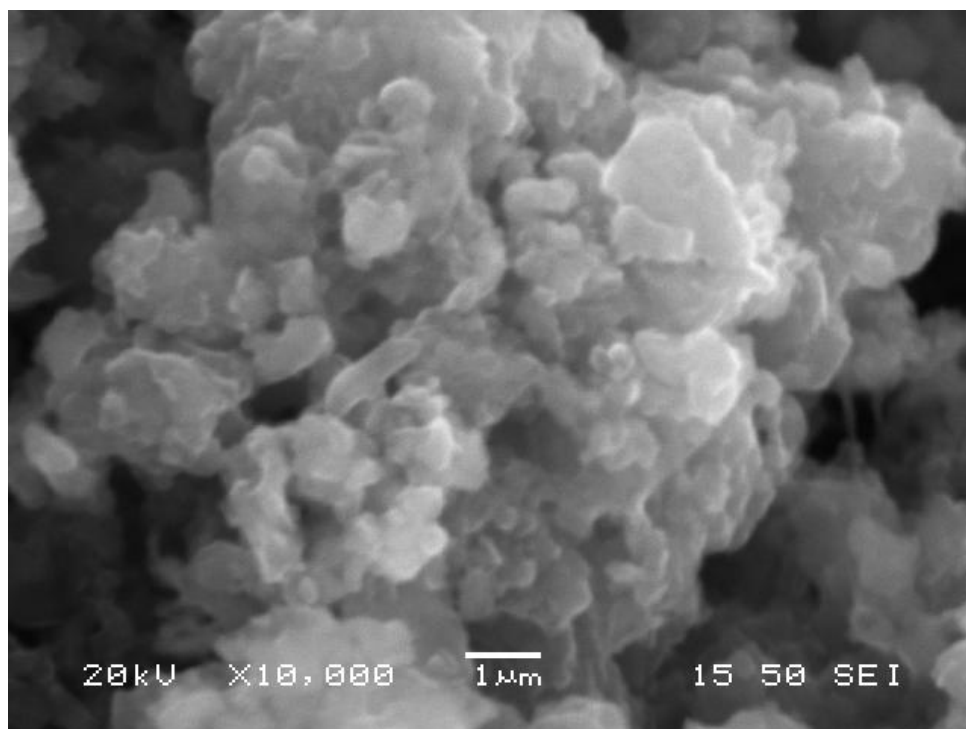
Φωτογραφία 95:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 8000 φορές:

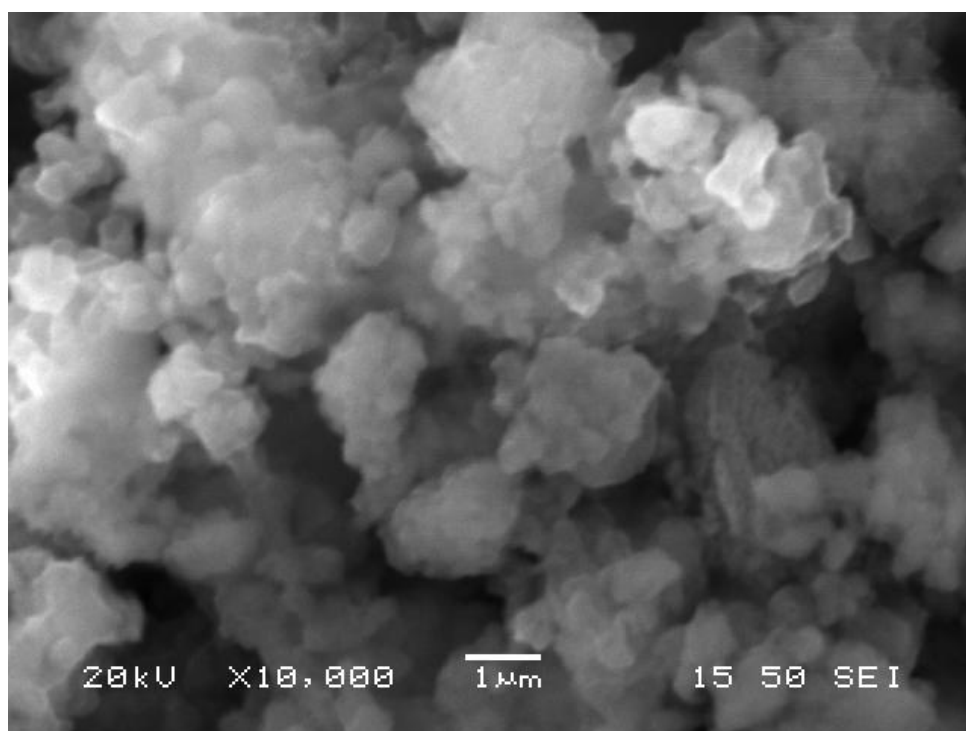


Φωτογραφία 96:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 10000 φορές:



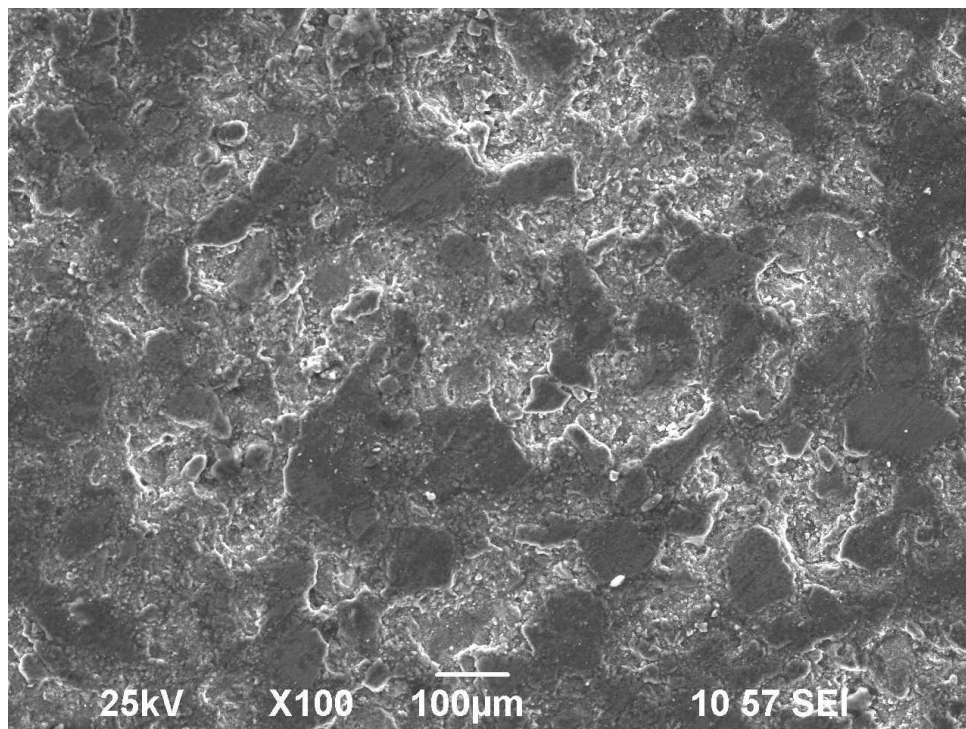
Φωτογραφία 97:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου



Φωτογραφία 98:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 1^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

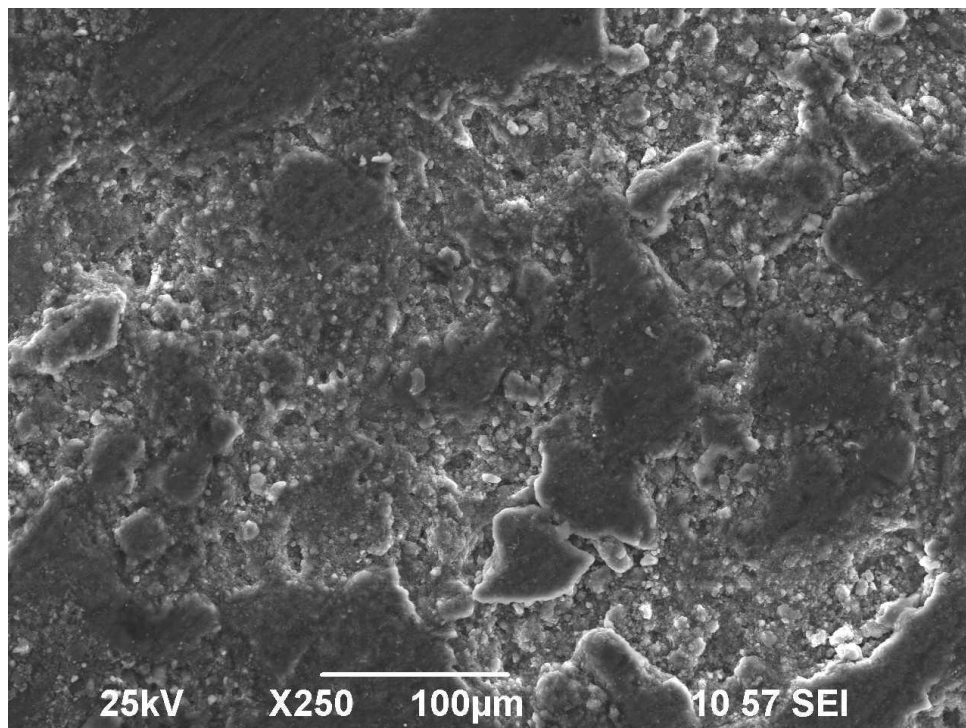
3^η διέλαση:

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 100 φορές:



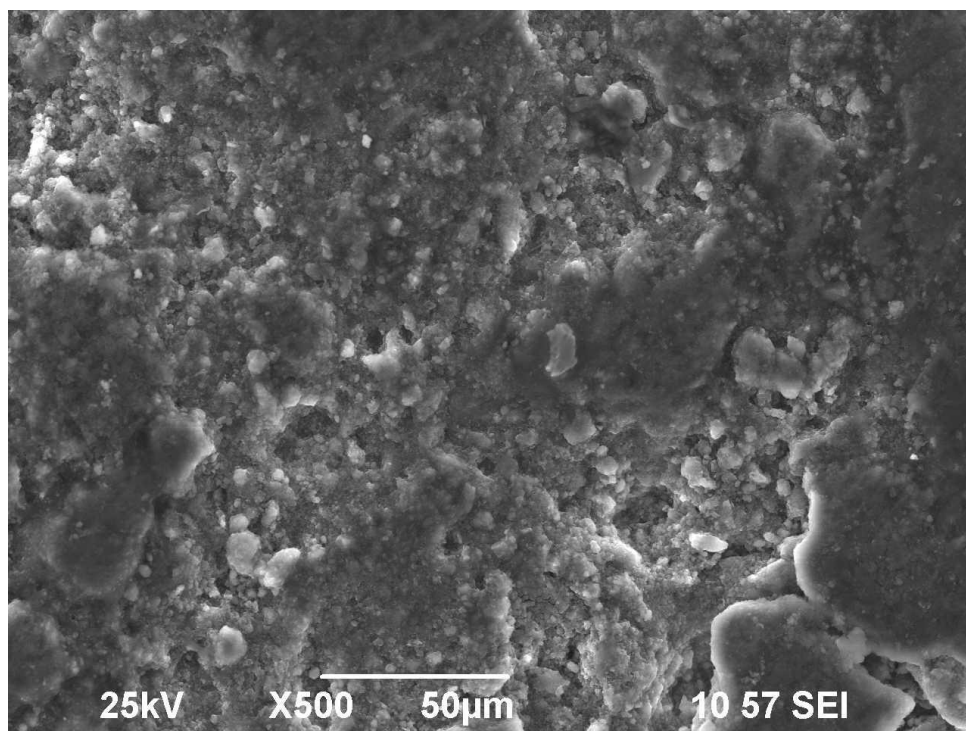
Φωτογραφία 99:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 250 φορές:

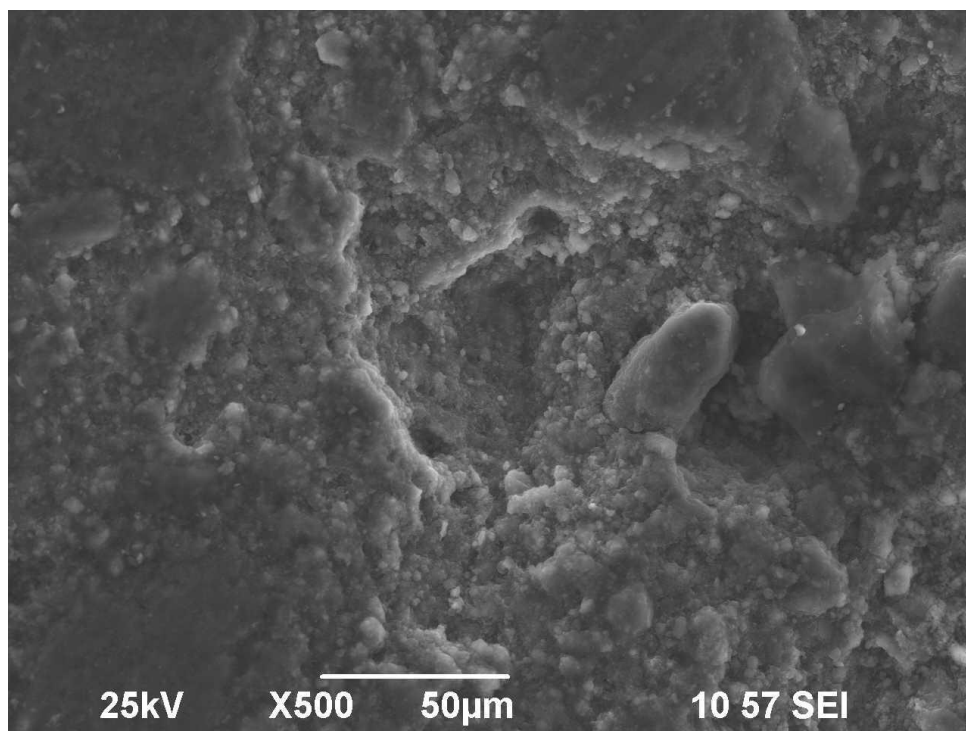


Φωτογραφία 100:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 500 φορές:

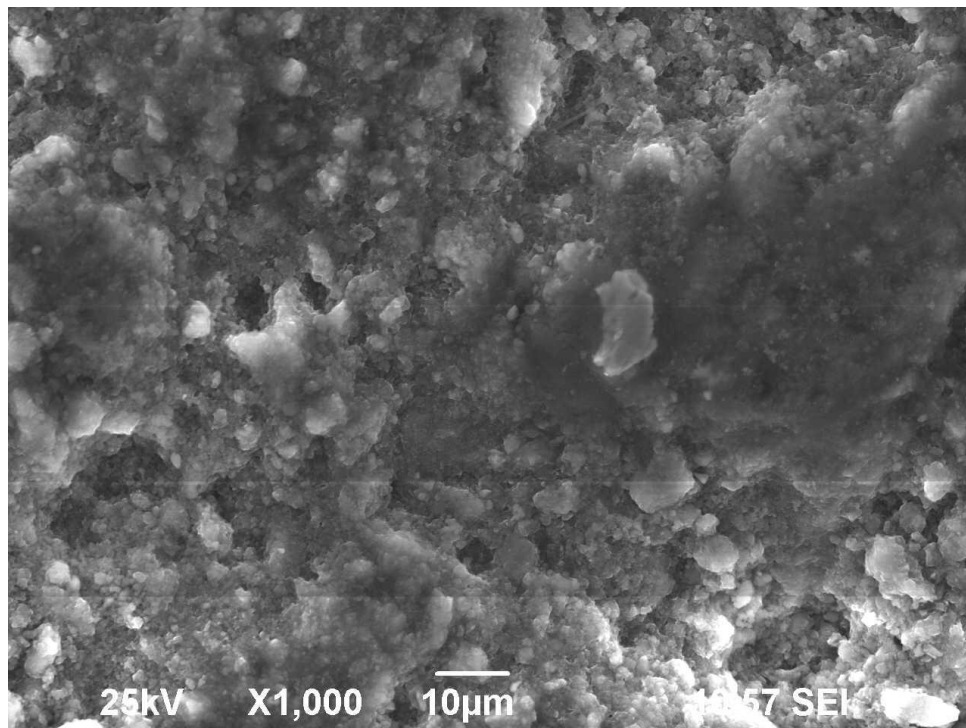


Φωτογραφία 101:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

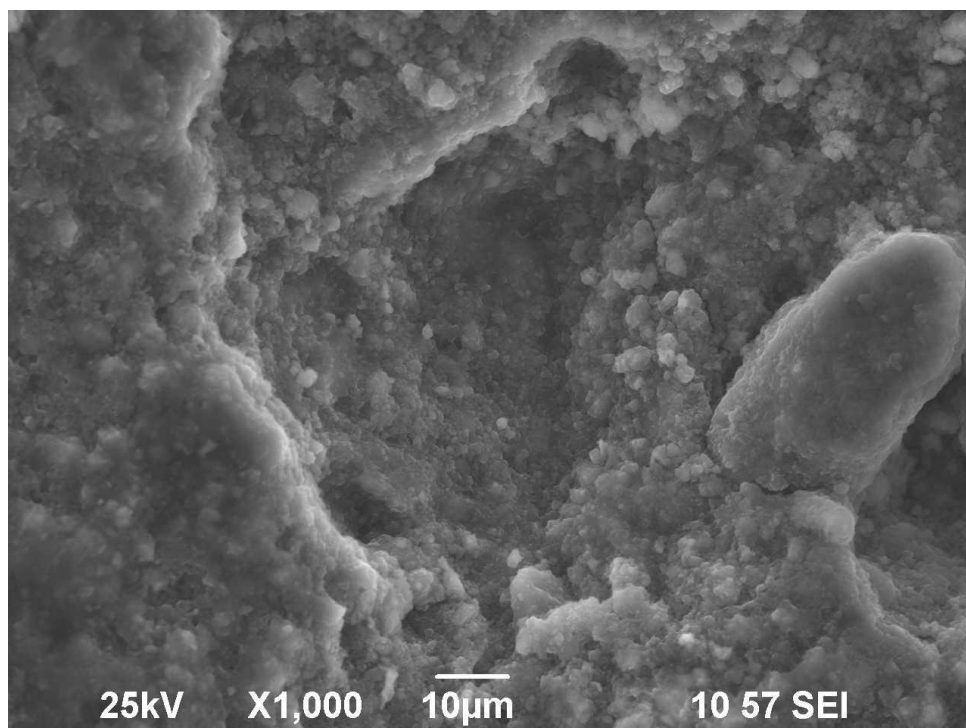


Φωτογραφία 102:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 1000 φορές:

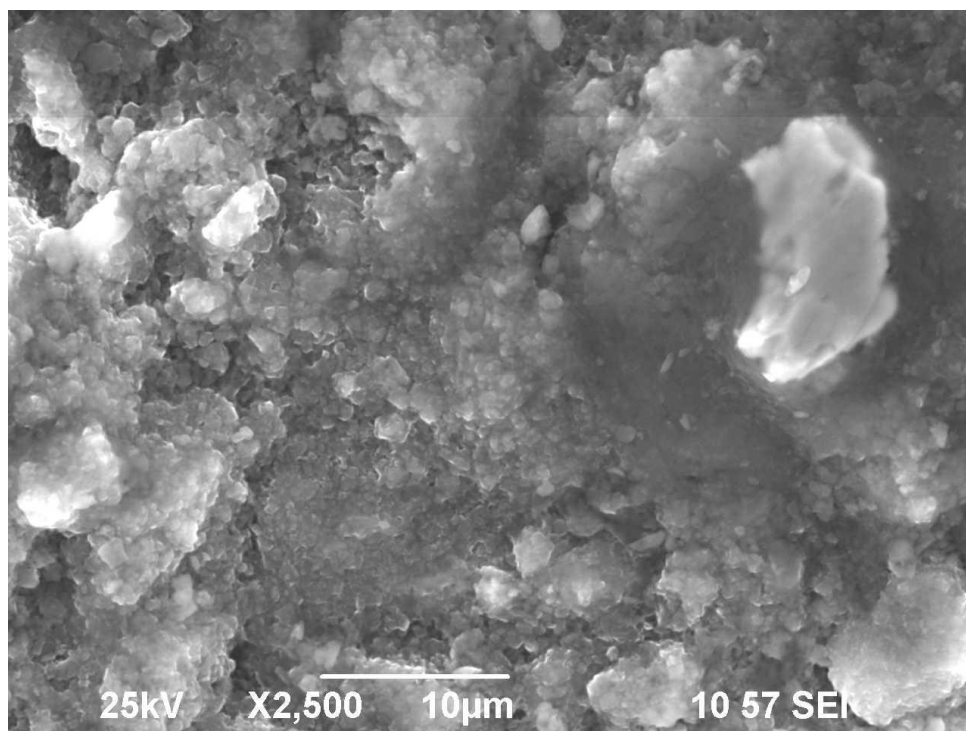


Φωτογραφία 103:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου



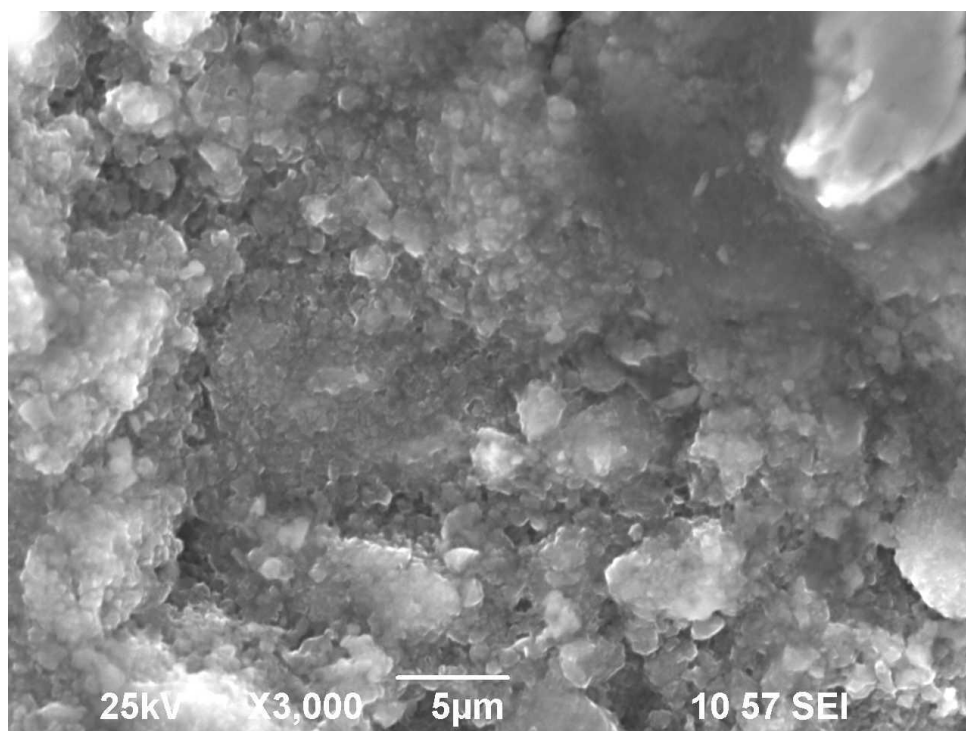
Φωτογραφία 104:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 2500 φορές:



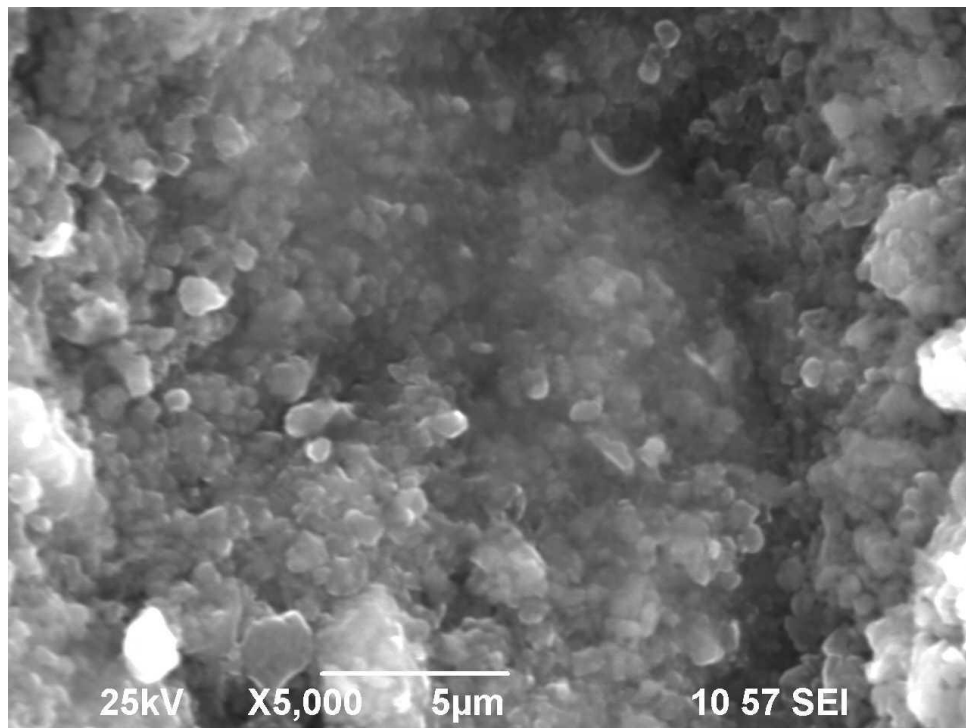
Φωτογραφία 105:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 3000 φορές:



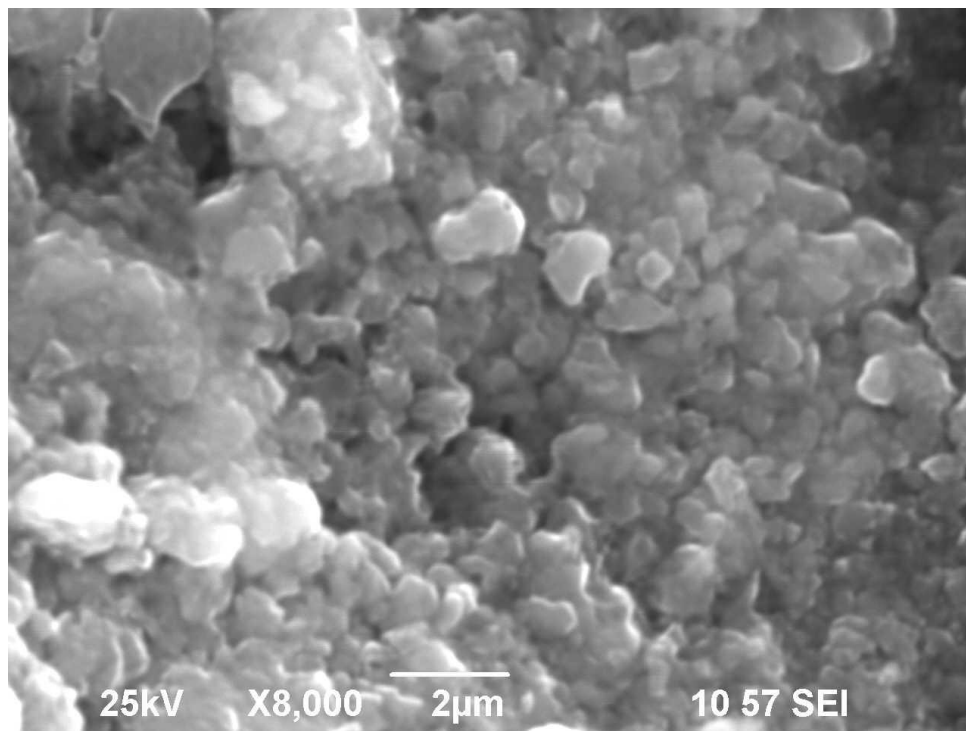
Φωτογραφία 106:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 5000 φορές:



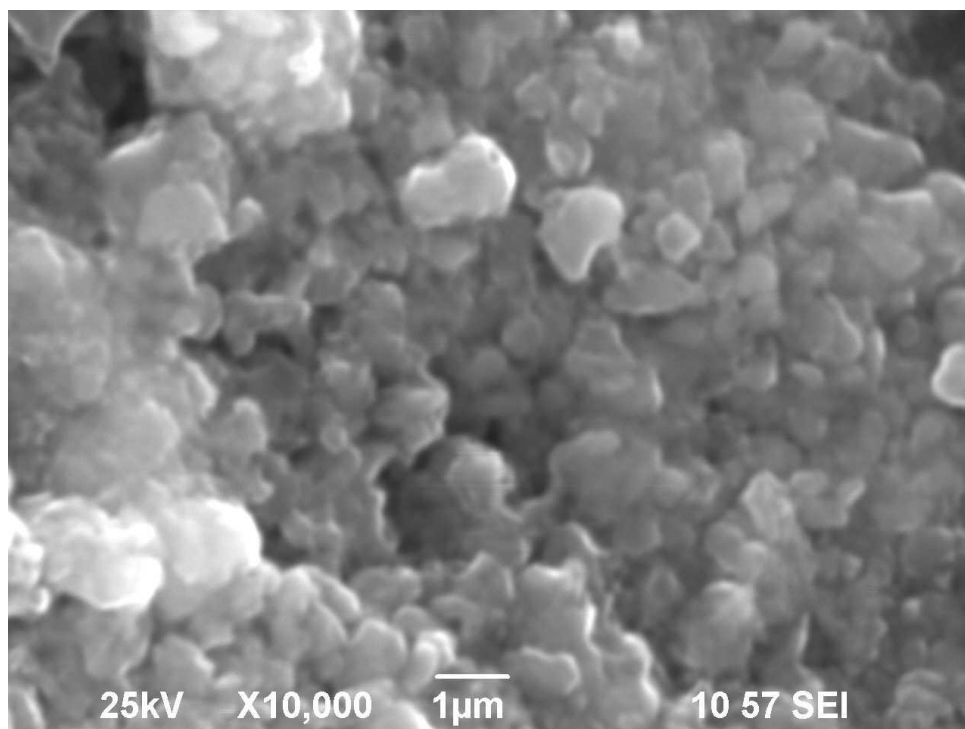
Φωτογραφία 107:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 8000 φορές:



Φωτογραφία 108:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3^{ου} δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Μεγέθυνση της επιφάνειας του δείγματος μέσω SEM 10000 φορές:



Φωτογραφία 109:Μεγεθυμένη επιφάνεια του 3ου δείγματος μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου

Κάνοντας σύγκριση τις φωτογραφίες από κάθε διέλαση παρατηρείται πως η επιφανειακή δομή του MgB_2 δεν αλλάζει σημαντικά μετά από κάθε διέλαση. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στα δύο δείγματα είναι πως το δείγμα που υπέστη 3 διελάσεις φαίνεται σημαντικά πιο λεπτόκοκκο: πράγμα αναμενόμενο, αφού μια από τις επιδράσεις της κατεργασίας σε επίπεδο μικροπλαστικότητα είναι η μείωση του μεγέθους των κόκκων(και άρα η μεγαλύτερη σκληρότητα του ,όπως υπαγορεύει η σχέση Hall-Petch).

Συγκρίνοντας λοιπόν φωτογραφίες ίδιας μεγέθυνσης για κάθε δείγμα παρατηρείται πως το μέγεθος των κόκκων για το δείγμα από την 1^η διέλαση έχει εύρος από $5\mu m$ έως $10\mu m$ ενώ το δείγμα από την 3^η διέλαση έχει εύρος από $2\mu m$ έως $10\mu m$ με μέσο όρο πάντως κάτω από τα $5\mu m$.Οι μεγαλύτεροι κόκκοι του υλικού φαίνεται να ανήκουν στο μαγνήσιο, γεγονός λογικό αφού κατά τη σύνθεση του MgB_2 το μαγνήσιο λιώνει πρώτο(σημείο τήξεως $Mg T_{mMg} \sim 650^\circ C$,σημείο τήξεως $B T_{mB_2} \sim 2076^\circ C$) με αποτέλεσμα να διαχέεται εντός του βορίου και έτσι το κύριο φορτίο της διέλασης να διοχετεύεται στο βόριο.

Να σημειωθεί πως για να γίνει φωτογράφιση της δομής του MgB_2 μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας κάθε δείγμα λειάνθηκε εξωτερικά ώστε να αφαιρεθεί η επιφάνεια κοπής του τμήματος του σωλήνα καθώς και οι εξωτερικές ακαθαρσίες(πχ λιπαντικά κατεργασίας).

D. Υπεραγώγιμες Ιδιότητες⁵.

I). Κρίσιμη θερμοκρασία.

Είχε αναφερθεί στο κεφάλαιο 2 πως η T_c του MgB₂ 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.

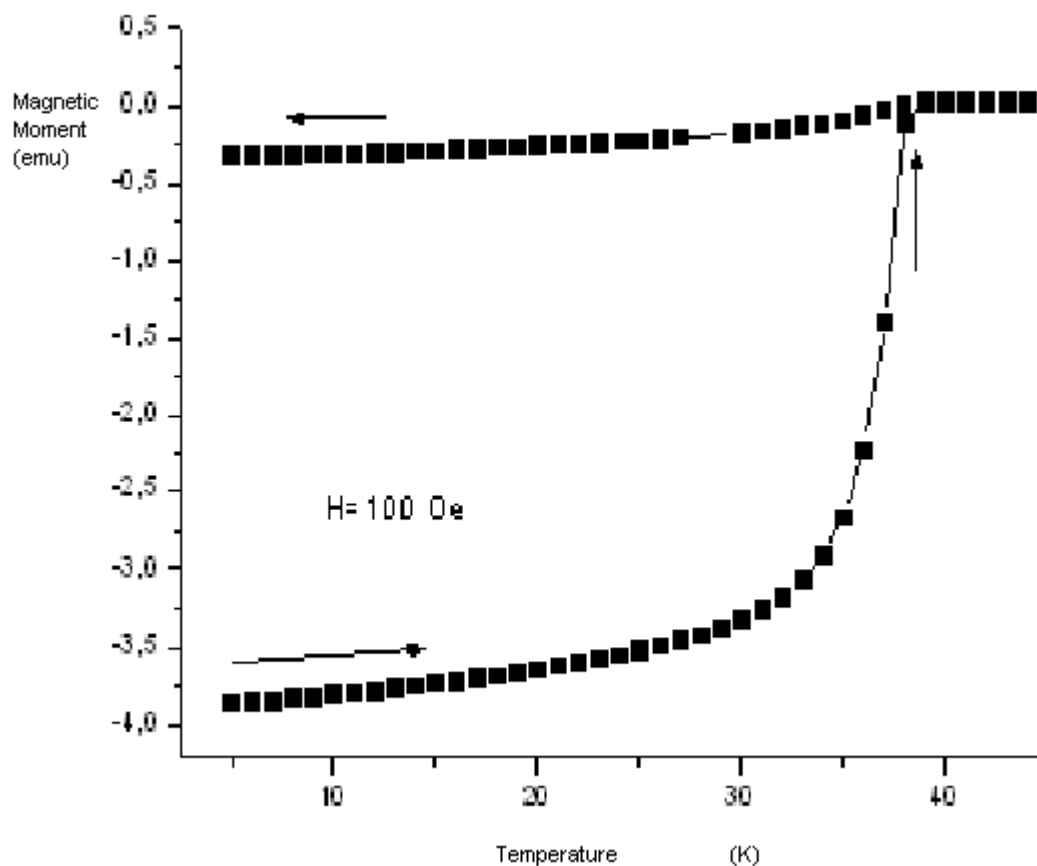
Για την ακρίβεια, από το πρώτο πείραμα που έγινε σε ένα ιστροπικά ομογενές δείγμα βρέθηκε πως η μείωση αυτή περιγράφεται από τη σχέση

$$\frac{dT_c}{dP} = -1.11 \pm 0.02 \frac{K}{GPa} \quad (75)^9, \text{ η οποία δείχνει πως στο MgB}_2 \text{ η κρίσιμη}$$

θερμοκρασία πέφτει όσο μεγαλύτερη πίεση του ασκείται.

Ακολουθούν τα διαγράμματα της μαγνητικής ροπής του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας που δείχνουν την κρίσιμη θερμοκρασία για κάθε φάση διέλασης:

1^η Διέλαση

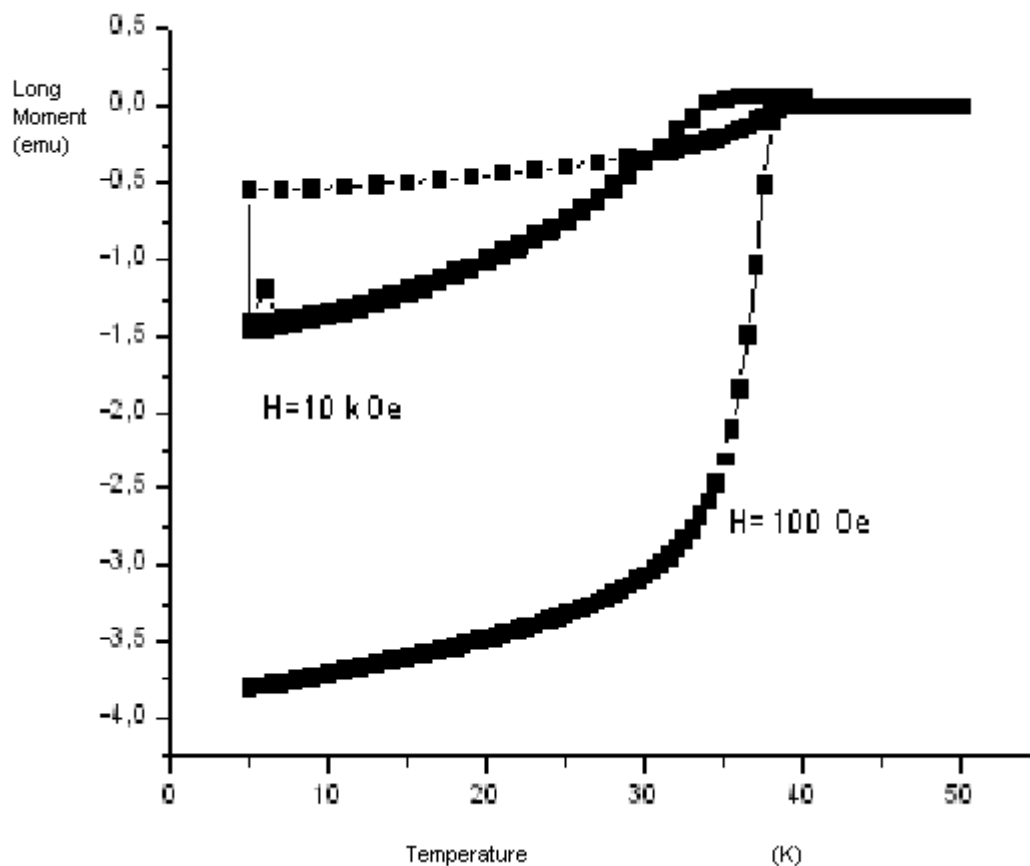


Διάγραμμα 110: Απεικόνιση της μαγνητικής ροπής του 1^{ου} δοκιμίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

Φαίνεται πως η κρίσιμη θερμοκρασία στο δείγμα της 1^{ης} διέλασης είναι περίπου T_{c1} ~ 38.5 K, πολύ κοντά στην αρχική κρίσιμη θερμοκρασία του

καθαρού MgB₂, που είναι T_c=39K. Η απόκλιση από την T_c πιθανόν να οφείλεται τόσο στην καθαρότητα της αρχικής σκόνης(99.9%) όσο και στο φορτίο διέλασης, το οποίο προκαλεί σύμφωνα με τη σχέση (76) πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας.

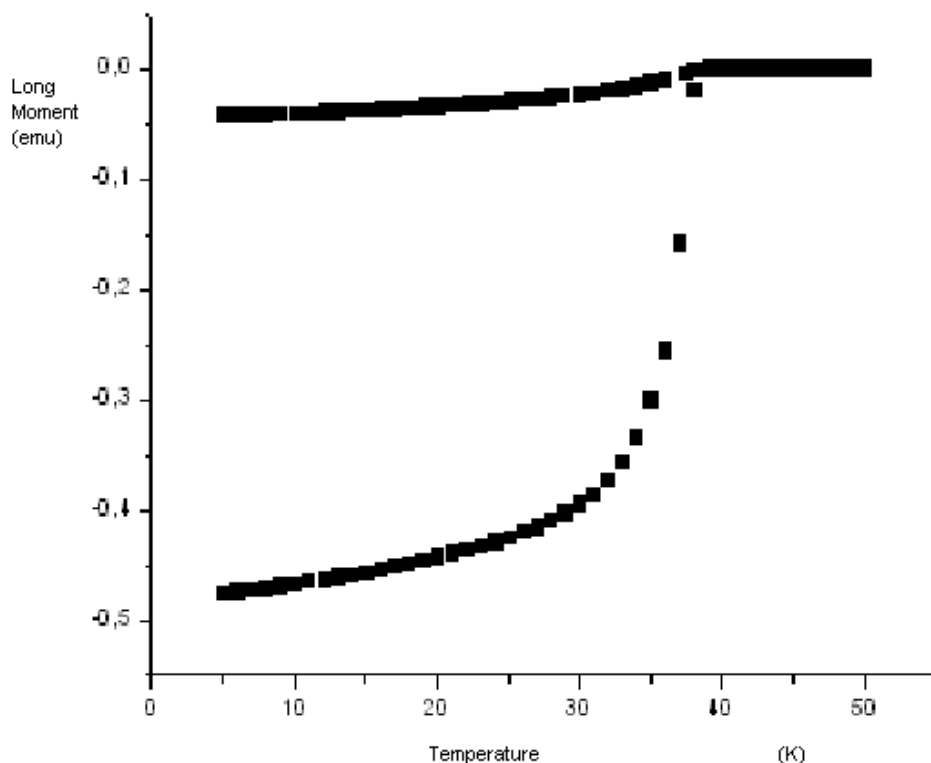
2^η διέλαση:



Διάγραμμα 111: Απεικόνιση της μαγνητικής ροπής του 2^{ου} δοκιμίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

Φαίνεται πως η κρίσιμη θερμοκρασία στο δείγμα της 2^{ης} διέλασης είναι περίπου T_{c2}~37.8K, επίσης κοντά στην αρχική κρίσιμη θερμοκρασία του καθαρού MgB₂, που είναι T_c=39K. Η πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας του δείγματος δικαιολογείται καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο διέλασης, τόσο περισσότερο πέφτει η κρίσιμη θερμοκρασία.

3^η Διέλαση:



Διάγραμμα 112:Απεικόνιση της μαγνητικής ροπής του 3^{ου} δοκιμίου συναρτήσει της θερμοκρασίας

Φαίνεται πως η κρίσιμη θερμοκρασία στο δείγμα της 3^{ης} διέλασης είναι περίπου $T_{c3} \sim 37$ K, επίσης κοντά στην αρχική κρίσιμη θερμοκρασία του καθαρού MgB₂, που είναι $T_c = 39$ K και πιο κάτω από τις κρίσιμες θερμοκρασίες των υπόλοιπων δειγμάτων. Η πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας του δείγματος δικαιολογείται καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο διέλασης, τόσο περισσότερη πέφτει η κρίσιμη θερμοκρασία.

II). Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος.

Όπως είχε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν διάφορες εκδοχές για τη σχέση που δίνει την κρίσιμη πυκνότητα του ρεύματος συναρτήσει πάντα των διαστάσεων του δείγματος. Αναλόγως τη βιβλιογραφία έχουν προταθεί οι εκφράσεις:

$$J_c = \frac{20\Delta M}{a - \frac{a^2}{3b}} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (23\alpha)$$

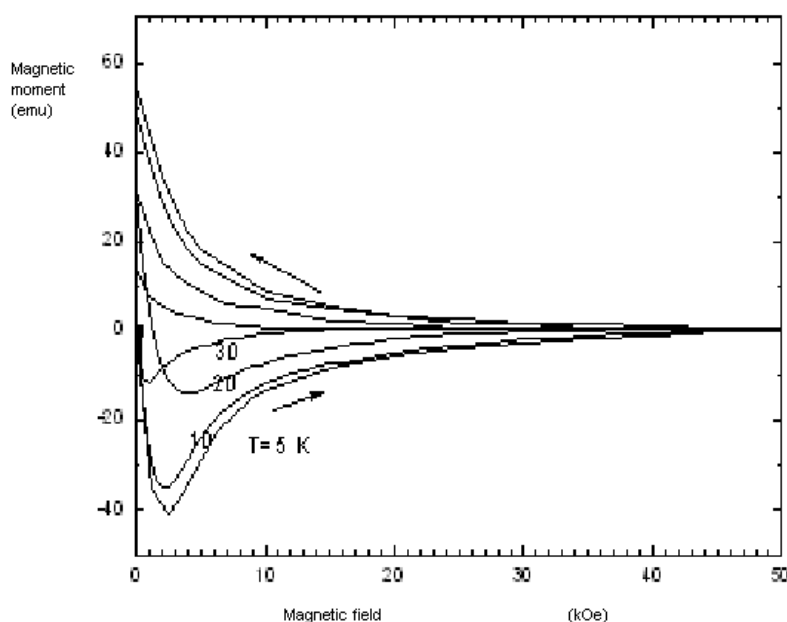
$$J_c = \frac{3\Delta M}{2r} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (23\beta)$$

$$J_c = \frac{3\Delta M}{2\Omega r} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (23\gamma)$$

με ΔM τη διαφορά της μαγνητικής υστέρησης (M) και μονάδες [emu/cm^2], r η ακτίνα του δείγματος, Ω ο όγκος του και a, b (cm) οι διαστάσεις της επιφάνειας του δείγματος. Και οι τρεις εξισώσεις στηρίζονται στις παραδοχές του προτύπου του Bean.

Με βάση αυτές τις εξισώσεις θα υπολογιστεί για κάθε φάση διέλασης το υπερκρίσιμο ρεύμα.

1^η Διέλαση:



Διάγραμμα 113: Απεικόνιση της μαγνήτισης του 1^{ου} δοκιμίου συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου

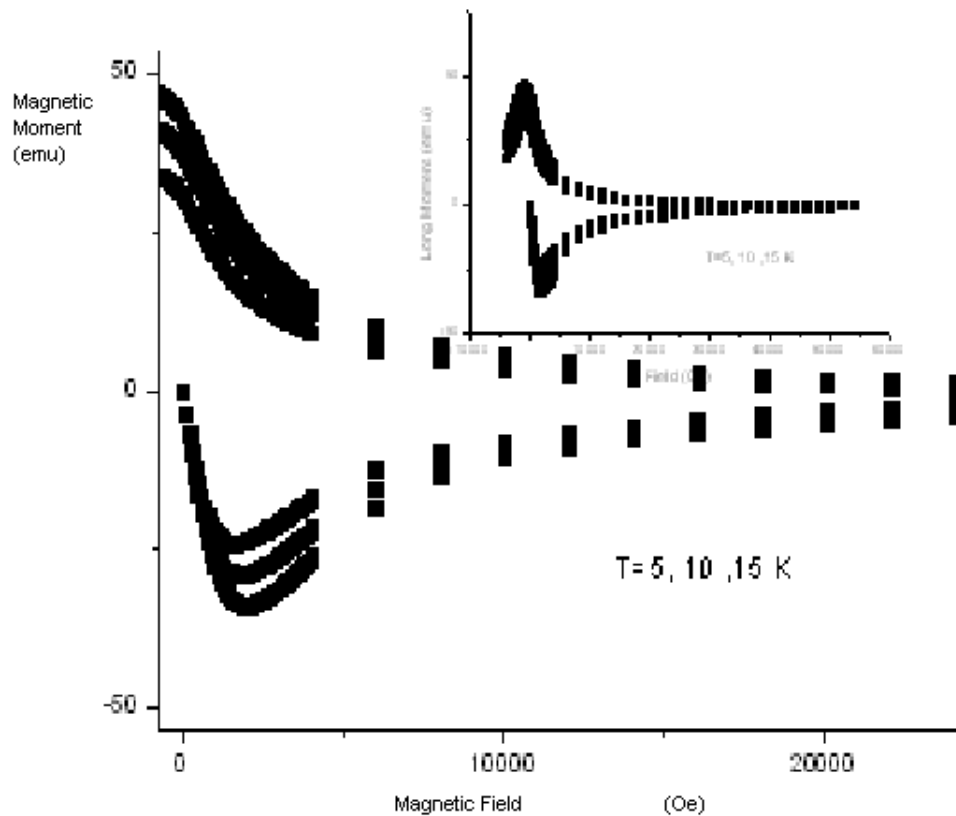
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η διαφορά μαγνήτισης για το δοκίμιο που υπέστη 3 διελάσεις είναι περίπου $\Delta M \sim 45 \text{ emu}$. Πλέον θεωρώντας πως το δοκίμιο μας έχει ακτίνα $r=a=b=11 \text{ mm}$ και πάχος $l=10 \text{ mm}$ οι σχέσεις (23^a), (23^b) και (23^γ) δίνουν τρεις διαφορετικές τιμές για το υπερκρίσιμο ρεύμα:

$$(23^{\alpha}) \rightarrow J_c = \frac{20\Delta M}{a - \frac{a^2}{3b}} = \frac{900}{1.1 - \frac{1.1^2}{3.3}} \sim 1227.3 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

$$(23^{\beta}) \rightarrow J_c = \frac{3\Delta M}{2r} = \frac{3 * 45}{2 * \frac{1.1}{2}} \sim 122.7273 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

$$(23^{\gamma}) \rightarrow J_c = \frac{3\Delta M}{2\Omega r} = \frac{3 * 45}{1.1 * \pi * l * \left(\frac{1.1}{2} \right)^2} \sim 129.1415 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

2^η Διέλαση:



Διάγραμμα 114: Απεικόνιση της μαγνήτισης του 2^{ου} δοκιμίου συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου

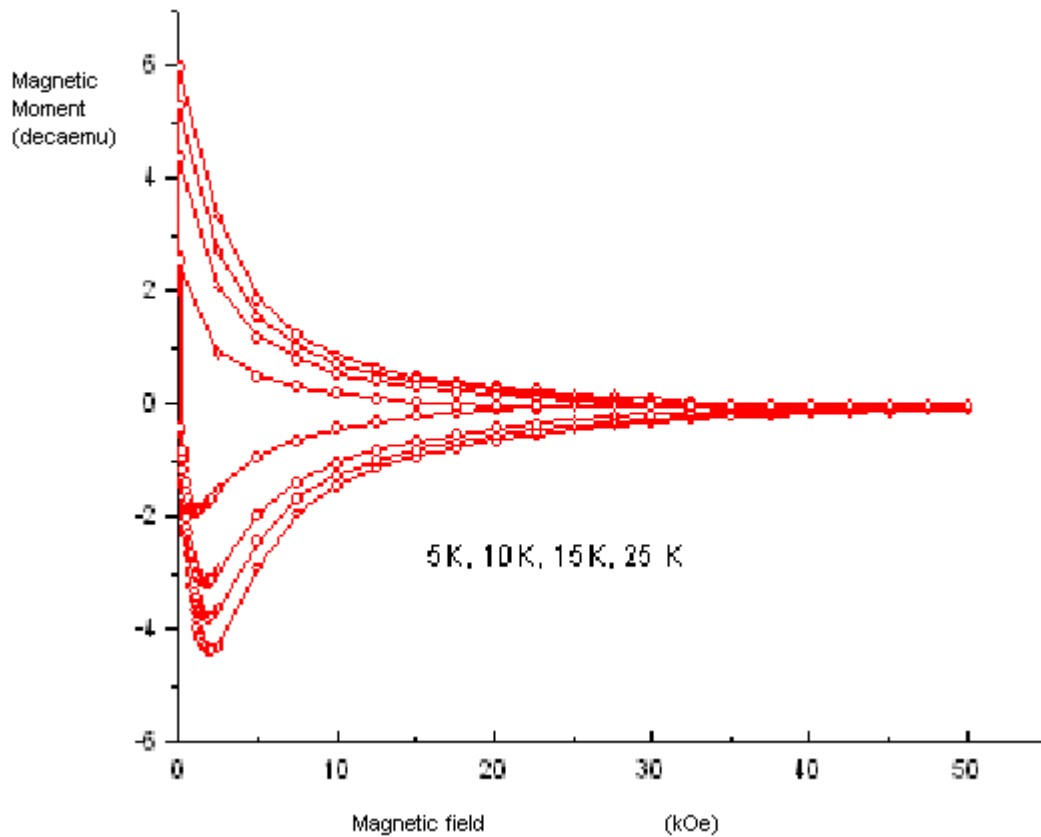
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η διαφορά μαγνήτισης για το δοκίμιο που υπέστη 2 διελάσεις είναι περίπου $\Delta M \sim 63 \text{ emu}$
 Πλέον θεωρώντας πως το δοκίμιο μας έχει ακτίνα $r=a=b=10.3 \text{ mm}$ και πάχος $l=10 \text{ mm}$ οι σχέσεις (23^α), (23^β) και (23^γ) δίνουν τρεις διαφορετικές τιμές για το υπερκρίσιμο ρεύμα:

$$(23^{\alpha}) \rightarrow J_c = \frac{20\Delta M}{a - \frac{a^2}{3b}} = \frac{1260}{1.03 - \frac{1.0609}{3.09}} \sim 1835 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

$$(23^{\beta}) \rightarrow J_c = \frac{3\Delta M}{2r} = \frac{3 * 63}{2 * \frac{1.03}{2}} \sim 183.495 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

$$(23^{\gamma}) \rightarrow J_c = \frac{3\Delta M}{2\Omega r} = \frac{3 * 63}{1.03 * \pi * l * \left(\frac{1.03}{2} \right)^2} \sim 220.22 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

3^η Διέλαση



Διάγραμμα 115: Απεικόνιση της μαγνήτισης του 3^{ου} δοκιμίου συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η διαφορά μαγνήτισης για το δοκίμιο που υπέστη 3 διελάσεις είναι περίπου $\Delta M \sim 52 \mu\text{emu}$. Πλέον θεωρώντας πως το δοκίμιο μας έχει ακτίνα $r=a=b=8\text{mm}$ και πάχος $l=10\text{mm}$ οι σχέσεις (23^α), (23^β) και (23^γ) δίνουν τρεις διαφορετικές τιμές για το υπερκρίσιμο ρεύμα:

$$(23^{\alpha}) \rightarrow J_c = \frac{20\Delta M}{a - \frac{a^2}{3b}} = \frac{1040}{0.8 - \frac{0.8^2}{2.4}} \sim 1950.1 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

$$(23^{\beta}) \rightarrow J_c = \frac{3\Delta M}{2r} = \frac{3*52}{2*\frac{0.8}{2}} \sim 195 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

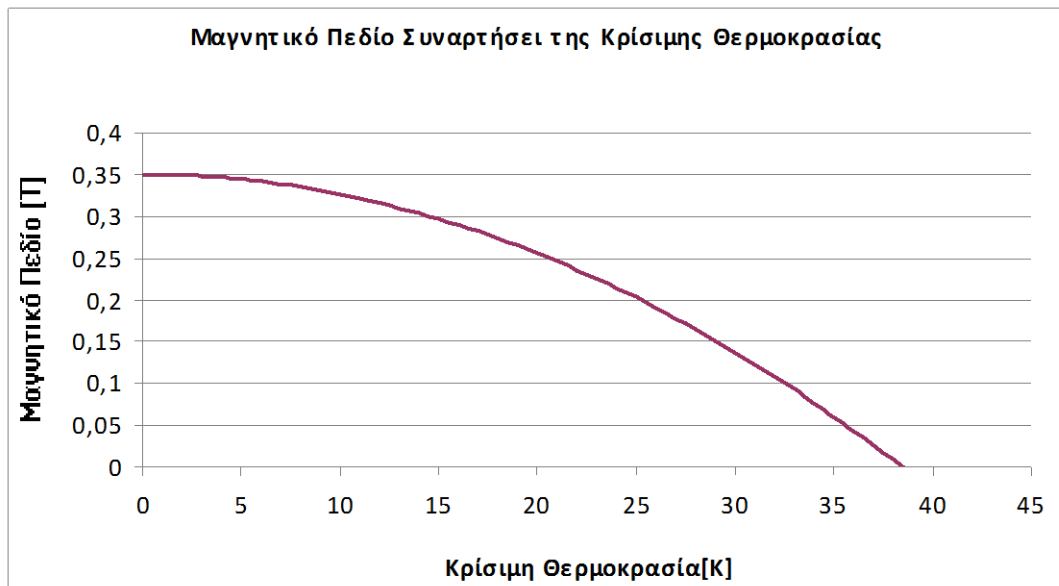
$$(23^{\gamma}) \rightarrow J_c = \frac{3\Delta M}{2\Omega r} = \frac{3*52}{0.8*\pi*l*\left(\frac{0.8}{2}\right)^2} \sim 387.94 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

III). Κρίσιμο Μαγνητικό Πεδίο.

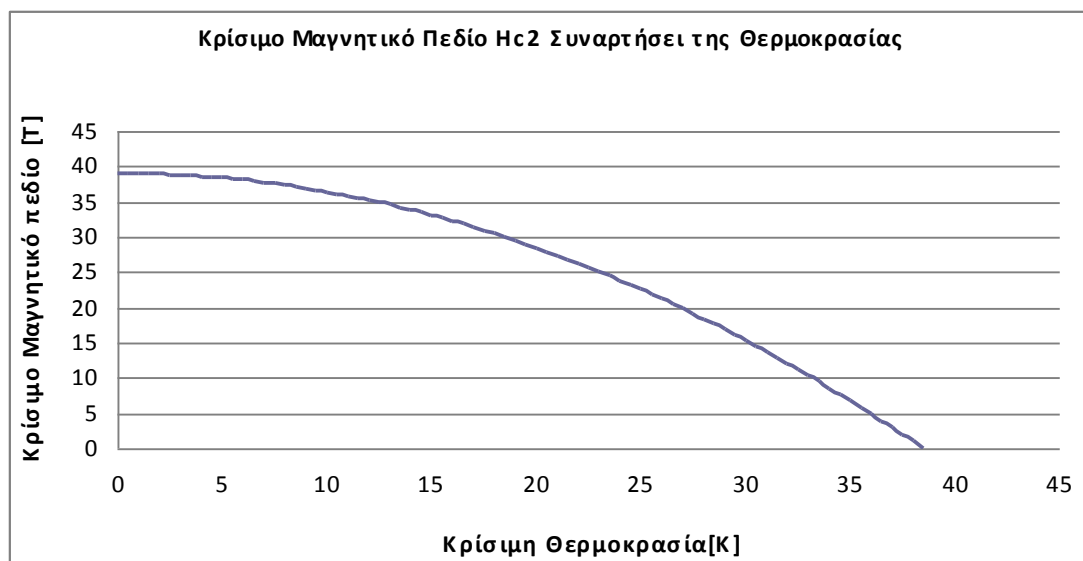
Πλέον γνωρίζοντας πως τις κρίσιμες θερμοκρασίες για κάθε δοκίμιο είναι δυνατόν να υπολογιστεί η καμπύλη κρίσιμου μαγνητικού πεδίου από τη σχέση $H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$ (21),

όπου $H_0 = H_c$ το μαγνητικό πεδίο του MgB₂ στους 0Κ.

Για την 1^η Διέλαση:

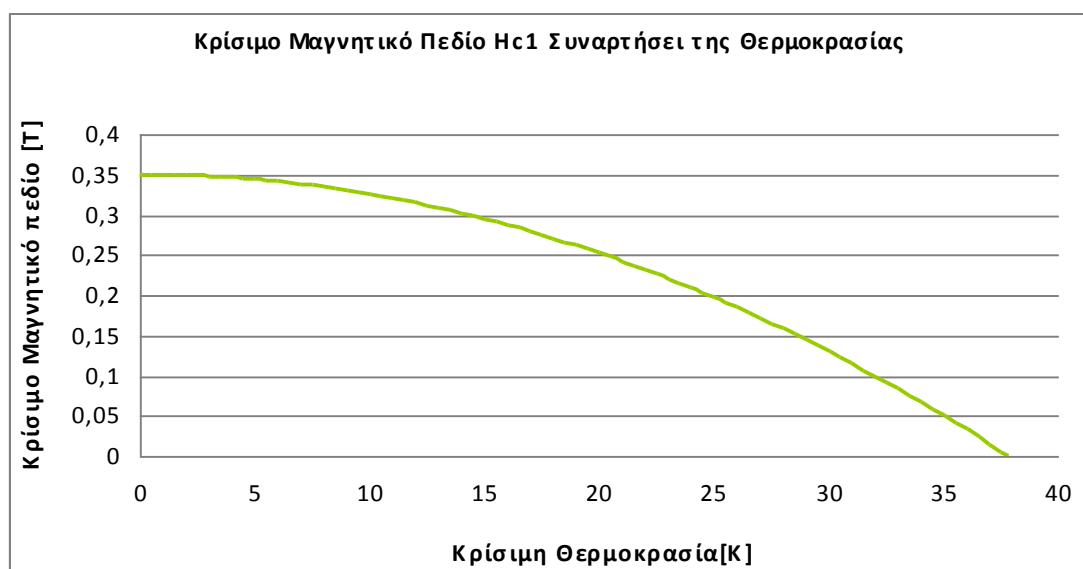


Διάγραμμα 116: Μεταβολή του Άνω Κρίσιμου Μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της Κρίσιμης Θερμοκρασίας

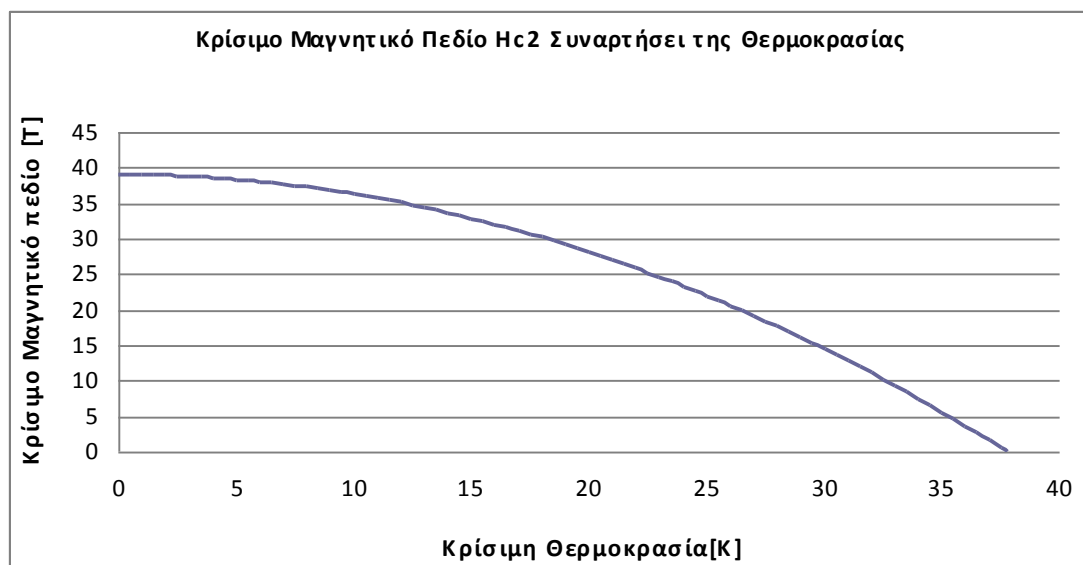


Διάγραμμα 117: Μεταβολή του Κάτω Κρίσιμου Μαγνητικού πεδίου συναρτήσεως της Κρίσιμης Θερμοκρασίας

Για τη 2^η Διέλαση:

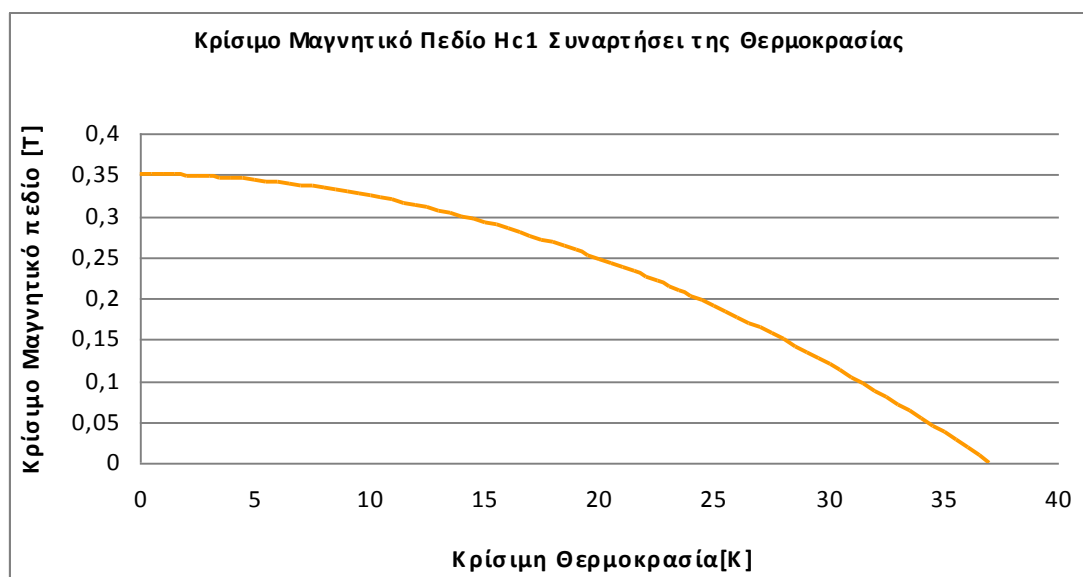


Διάγραμμα 118: Μεταβολή του Άνω Κρίσιμου Μαγνητικού πεδίου συναρτήσεως της Κρίσιμης Θερμοκρασίας



Διάγραμμα 119: Μεταβολή του Κάτω Κρίσιμου Μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της Κρίσιμης Θερμοκρασίας

Για την 3^η Διέλαση:



Διάγραμμα 120: Μεταβολή του Άνω Κρίσιμου Μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της Κρίσιμης Θερμοκρασίας

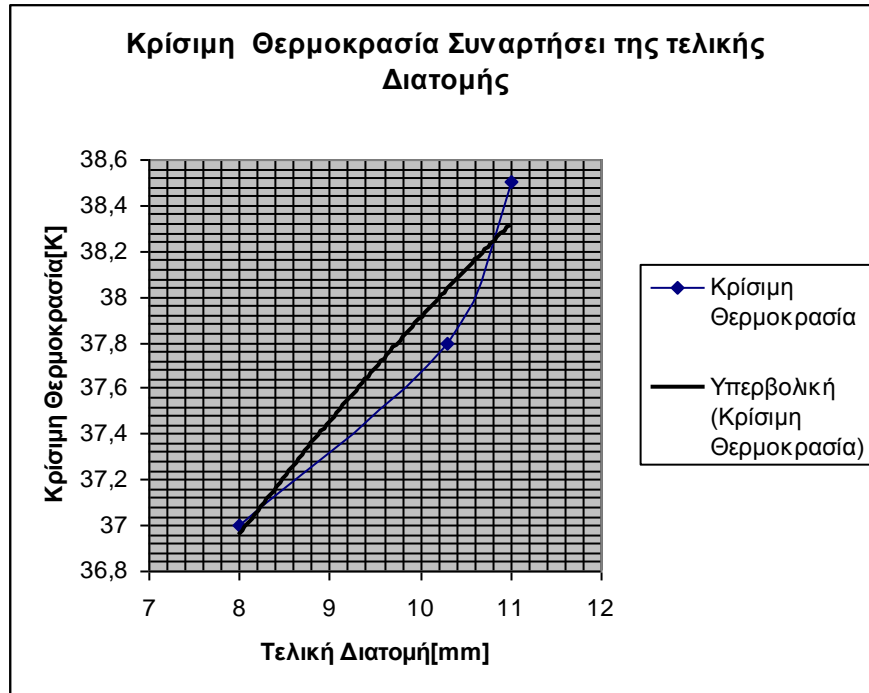


Διάγραμμα 121: Μεταβολή του Κάτω Κρίσιμου Μαγνητικού πεδίου συναρτήσεϊ της Κρίσιμης Θερμοκρασίας

Φαίνεται καθαρά η πτώση τόσο του άνω κρίσιμου μαγνητικού πεδίου H_{c1} όσο και του κάτω κρίσιμου μαγνητικού πεδίου H_{c2} συναρτήσεϊ της θερμοκρασίας.

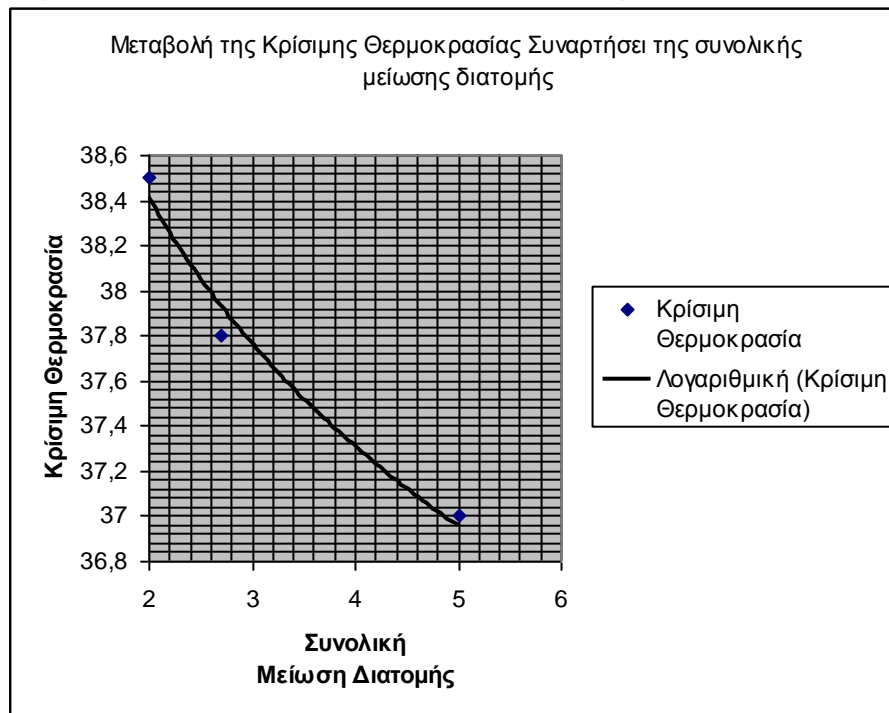
Πλέον μπορούν να γίνουν διαγράμματα που συγκρίνουν υπεραγωγίμες ιδιότητες του υλικού με χαρακτηριστικά μεγέθη της διέλασης, όπως ο λόγος διέλασης, ο συνολικός λόγος διέλασης, η μείωση διατομής ανά φάση διέλασης, η συνολική μείωση διατομής, το φορτίο διέλασης και το συνολικό φορτίο διέλασης:

❖ Κρίσιμη Θερμοκρασία.



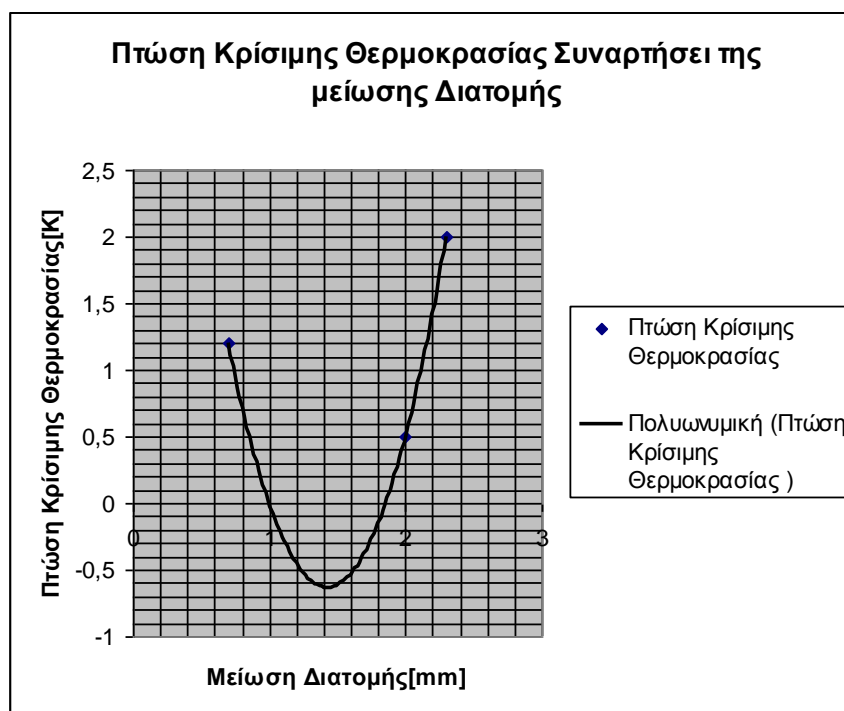
Διάγραμμα 122: Μεταβολή της Κρίσιμης Θερμοκρασίας συναρτήσει της Διατομής

Στο Διάγραμμα 122 απεικονίζεται η κρίσιμη θερμοκρασία συναρτήσει της διατομής του υλικού, όπου φαίνεται σαφέστατα πως όσο μειώνεται η διατομή του υλικού τόσο περισσότερο πέφτει η θερμοκρασία. Μάλιστα η πτώση αυτή φαίνεται να ακολουθεί πολυωνυμική έκφραση.



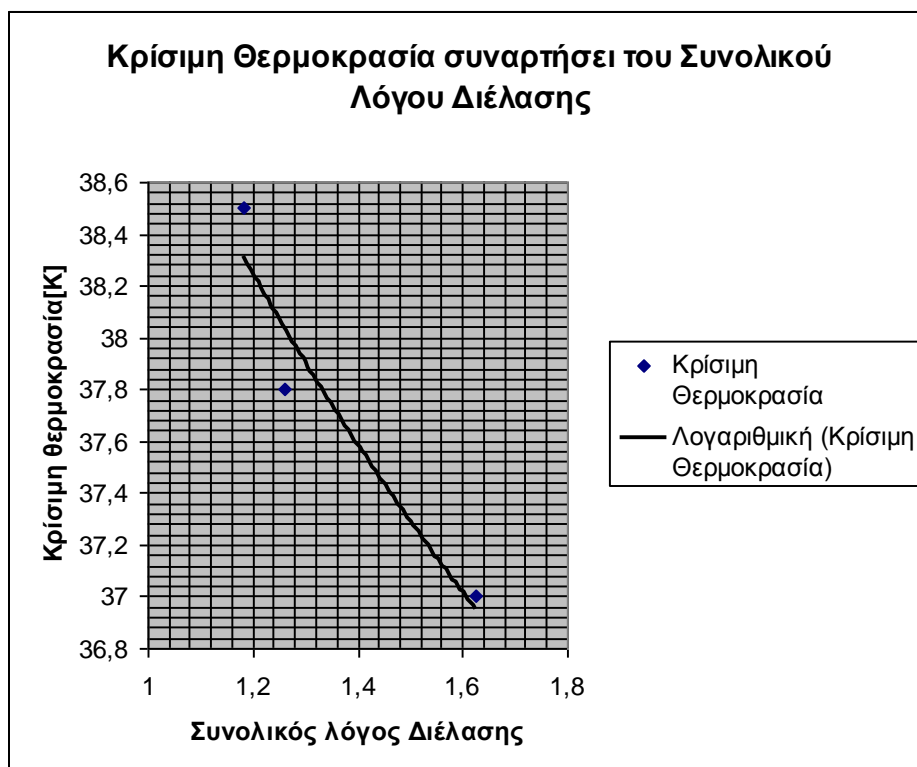
Διάγραμμα 123: Μεταβολή της κρίσιμης Θερμοκρασίας συναρτήσει της μείωσης Διατομής

Και στο Διάγραμμα 123 φαίνεται η πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας του υλικού συναρτήσει της μείωσης διατομής του και μάλιστα φαίνεται πως η κρίσιμη θερμοκρασία συνδέεται με τη συνολική μείωση διατομής του δοκιμίου σε λογαριθμική βάση.



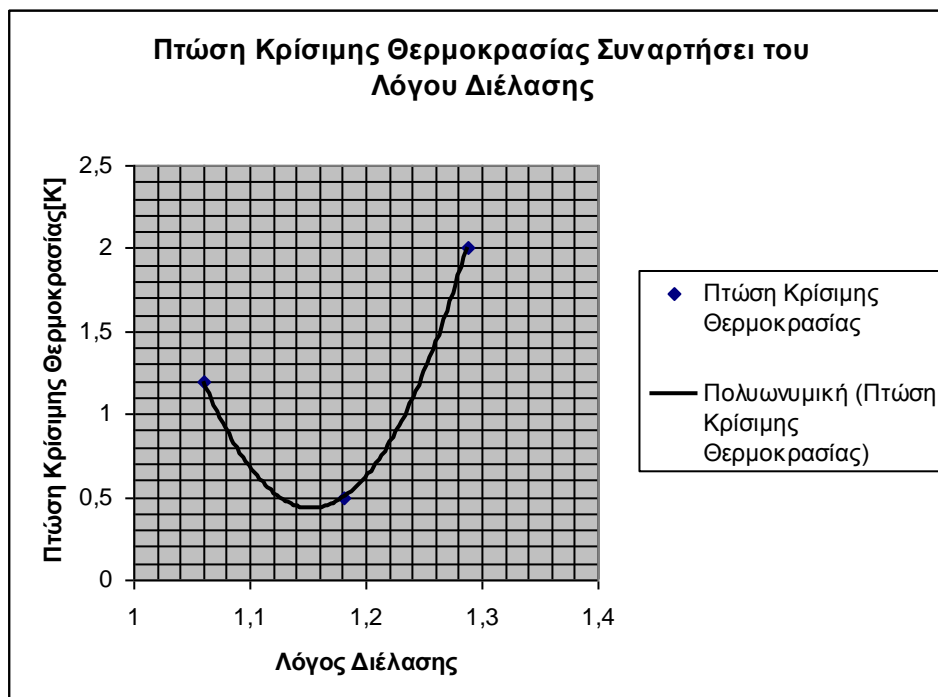
Διάγραμμα 124: Πτώση της κρίσιμης Θερμοκρασίας συναρτήσει της μείωσης Διατομής

Από το διάγραμμα 124 δεν παρατηρείται καμία άμεση σχέση της πτώσης της κρίσιμης θερμοκρασίας ανά φάση διέλασης συναρτήσει της μείωσης διατομής επίσης ανά φάση διέλασης.



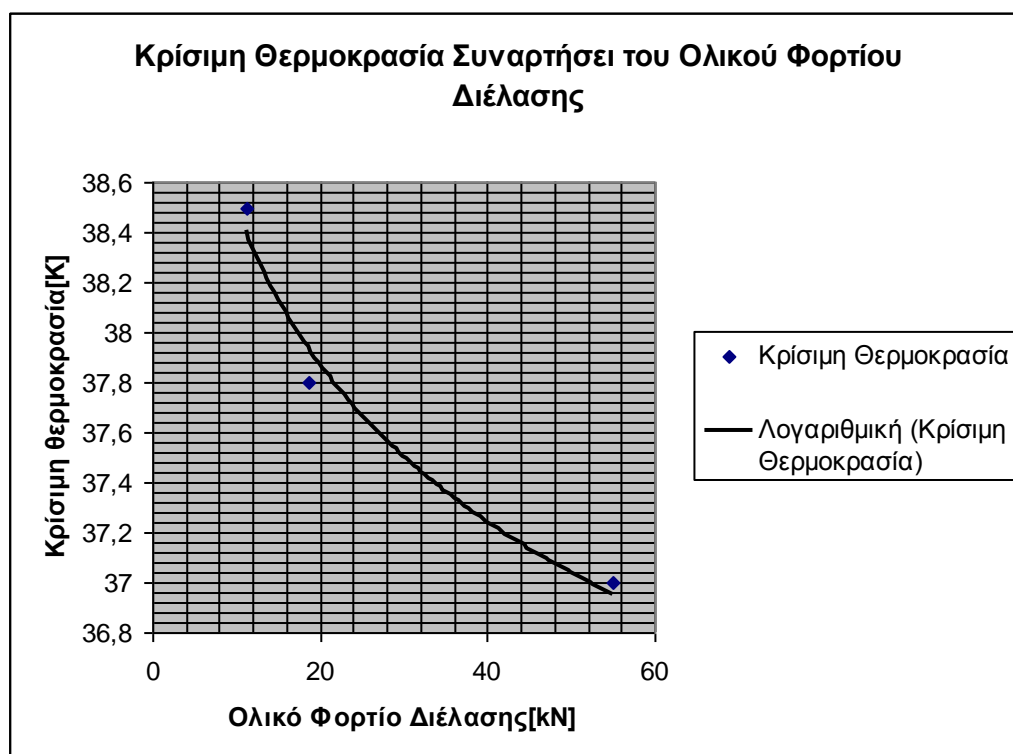
Διάγραμμα 125: Διαφοροποίηση της κρίσιμης Θερμοκρασίας συναρτήσει του συνολικού λόγου Διέλασης

Από το Διάγραμμα 125 εμφανίζεται σαφώς πως ο συνολικός λόγος διέλασης επηρεάζει την κρίσιμη θερμοκρασία και πως όσο περισσότερο αυξάνεται τόσο περισσότερο πέφτει η κρίσιμη θερμοκρασία, ακολουθώντας λογαριθμική έκφραση.



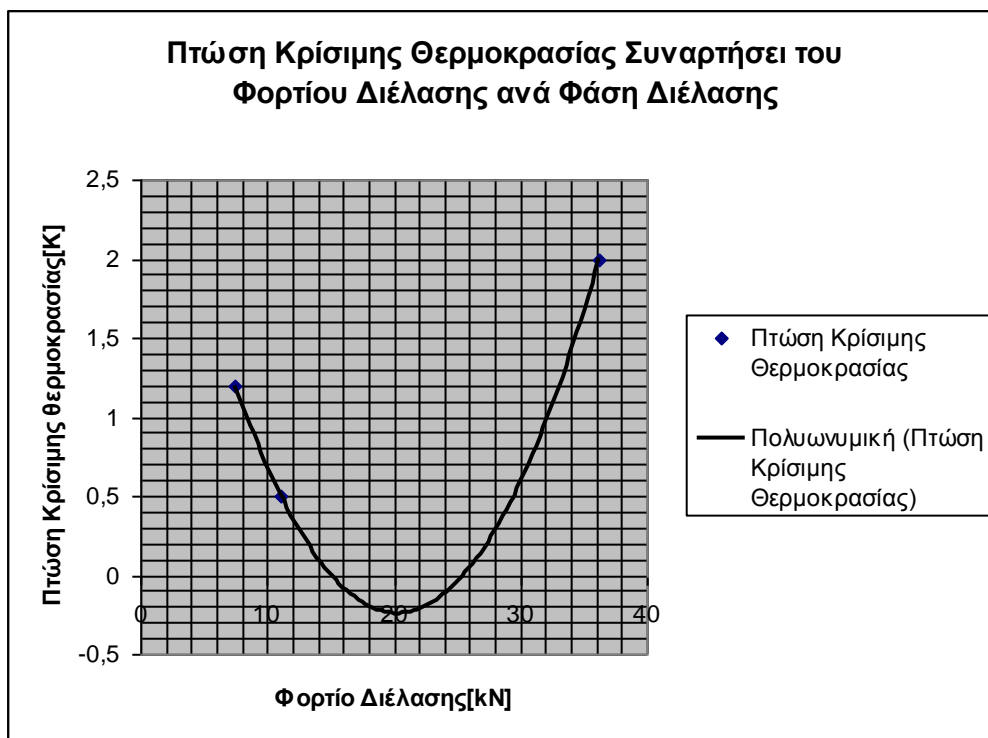
Διάγραμμα 125: Διαφοροποίηση της κρίσιμης Θερμοκρασίας συναρτήσει του συνολικού λόγου Διέλασης

Από το Διάγραμμα 125 δεν παρατηρείται μια άμεση σχέση της πτώσης της κρίσιμης θερμοκρασίας του υλικού σε σχέση με το λόγο διέλασης ανά φάση διέλασης.



Διάγραμμα 126: Κρίσιμη Θερμοκρασία συναρτήσει του συνολικού φορτίου διέλασης

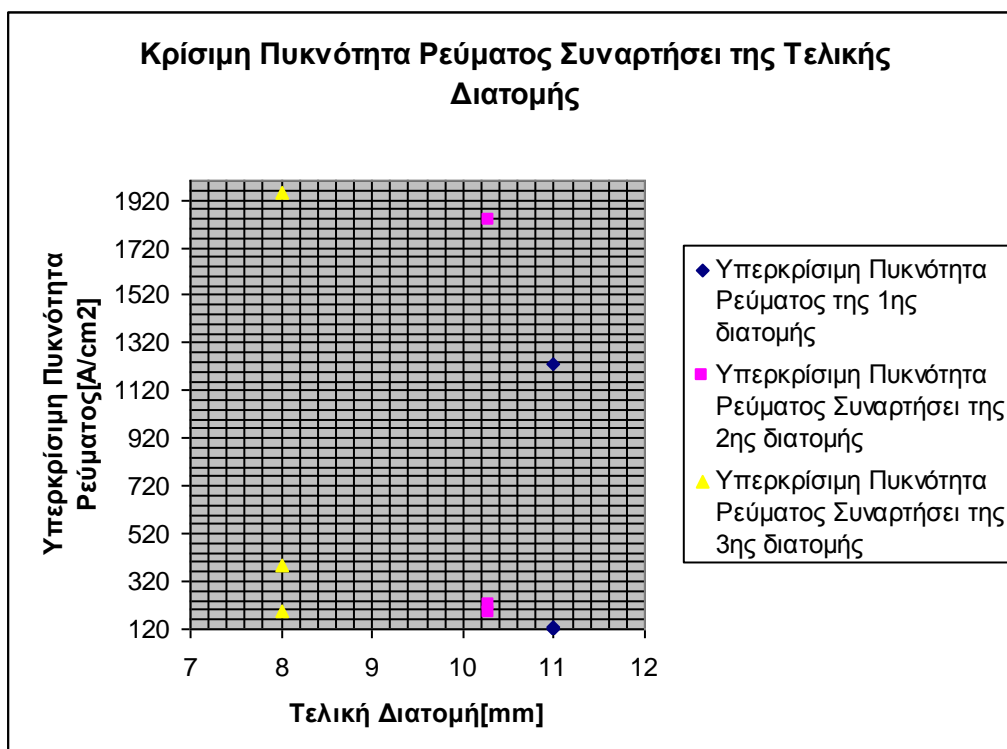
Από το Διάγραμμα 126 εμφανίζεται μια ξεκάθαρη σχέση του συνολικού φορτίου διέλασης που ασκήθηκε στο υλικό σε σχέση με την κρίσιμη θερμοκρασία του. Μάλιστα φαίνεται πως η πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας του υλικού εξαρτάται λογαριθμικά σε σχέση με το συνολικό φορτίο διέλασης.



Διάγραμμα 127: Πτώση Κρίσιμης Θερμοκρασίας συναρτήσει του φορτίου διέλασης ανά φάση διέλασης

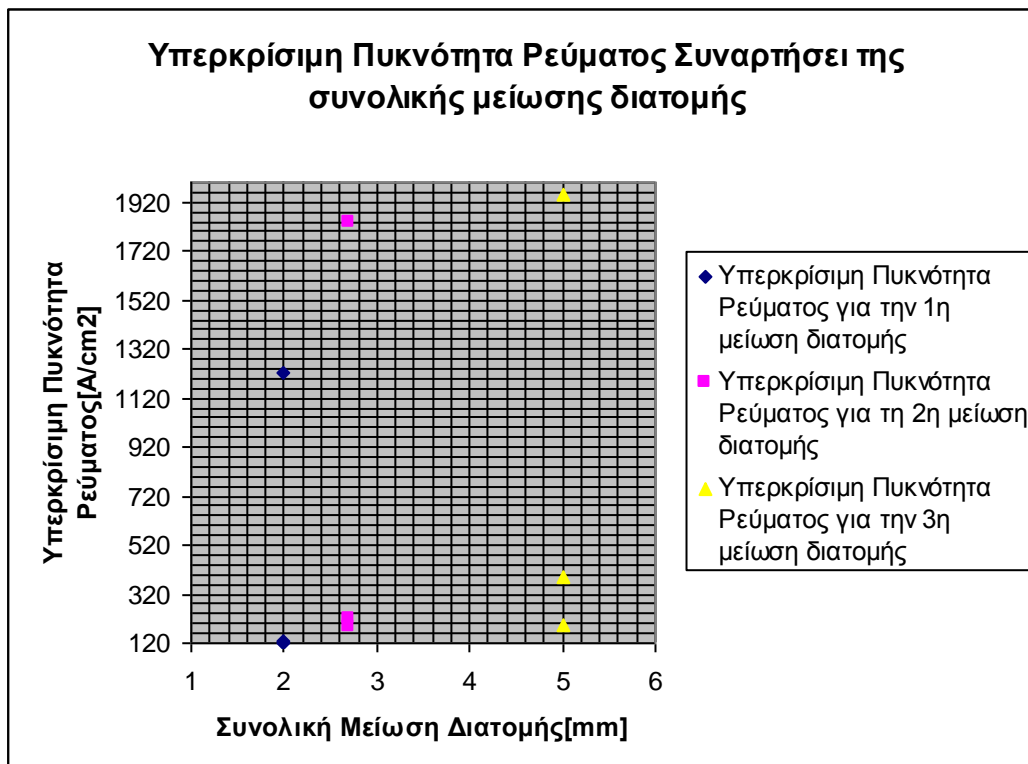
Από το Διάγραμμα 127 δεν σχετίζεται εμφανώς η μεταβολή της κρίσιμης θερμοκρασίας ανά φάση διέλασης με το αντιστοιχο φορτιο διέλασης που υπέστη το υλικό.

❖ Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος



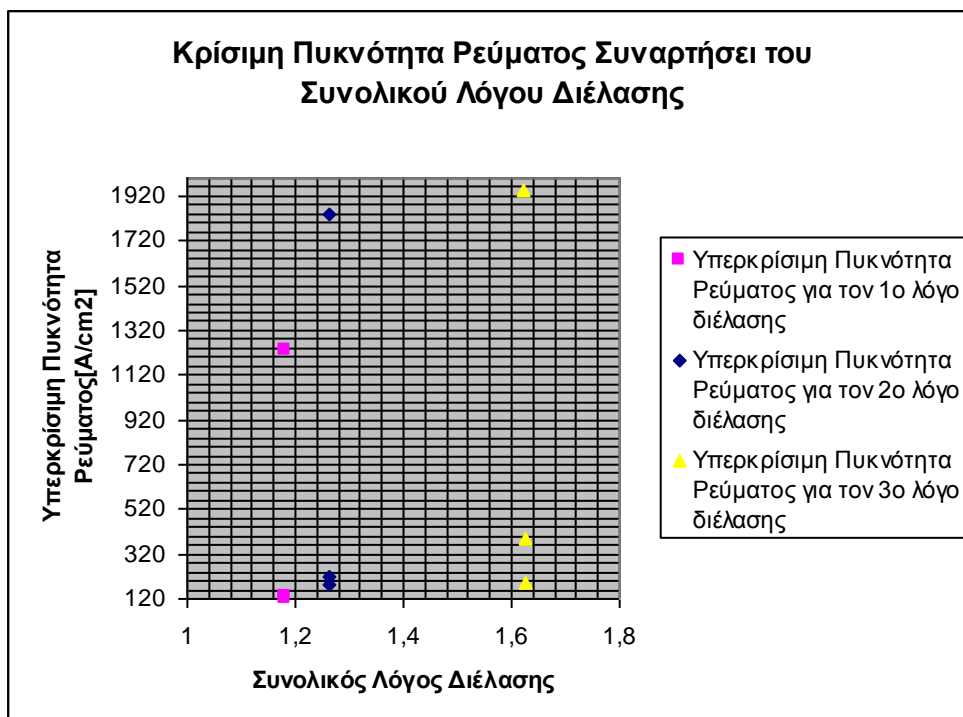
Διάγραμμα 128: Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος Συναρτήσει της Τελικής Διατομής

Από το διάγραμμα 128 είναι σαφές πως ανεξαρτήτως μοντέλου υπολογισμού, η πυκνότητα υπερκρίσιμου ρεύματος αυξάνεται όσο μειώνεται η τελική διατομή(ακολουθεί αντιστροφή πορεία με την κρίσιμη θερμοκρασία).Αυτό είναι λογικό αφού η πυκνότητα ρεύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του υλικού.



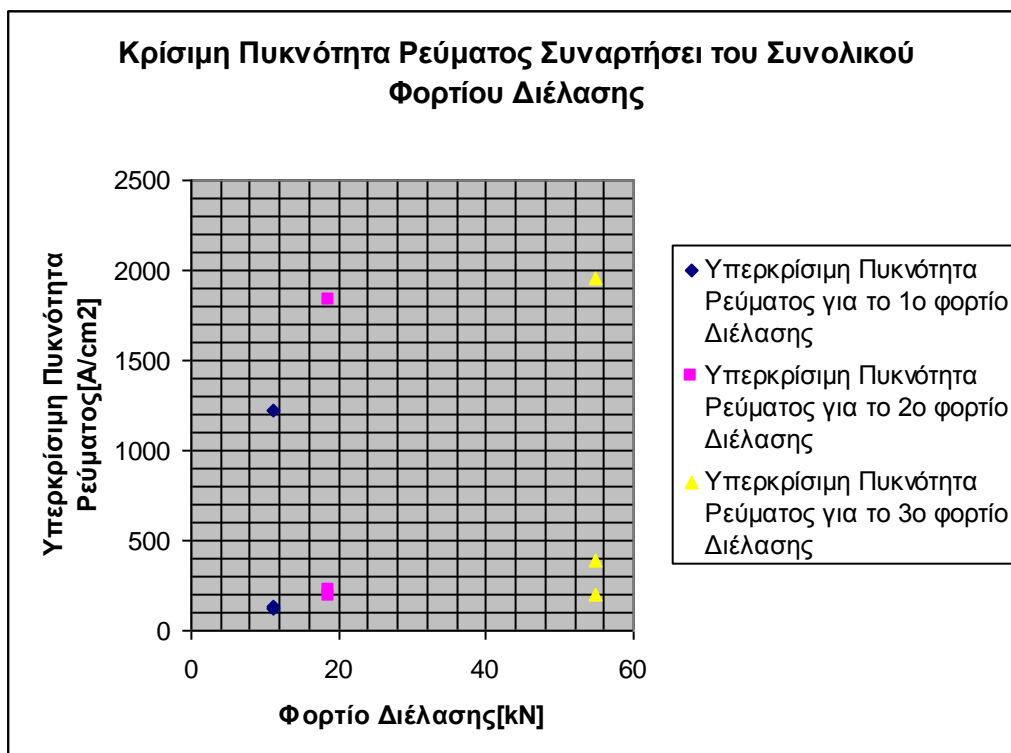
Διάγραμμα 129:Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος Συναρτήσεως της συνολικής μείωσης διατομής

Από το διάγραμμα 129 παρατηρείται το ίδιο συμπέρασμα με πριν: όσο μειώνεται η διατομή(και αντιστοίχως η συνολική μείωση διατομής),η υπερκρίσιμη πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται ανεξαρτήτως σχέσης υπολογισμού.



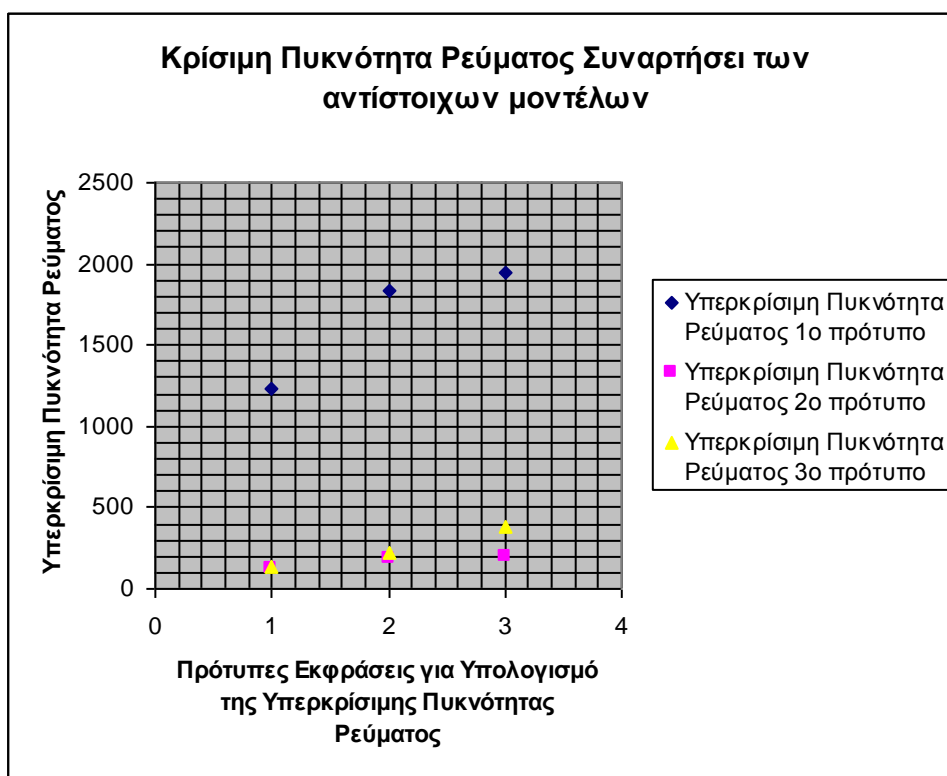
Διάγραμμα 130: Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος συναρτήσεσι του συνολικού λόγου διέλασης

Από το διάγραμμα 130 φαίνεται πως η υπερκρίσιμη πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται όσο αυξάνεται ο λόγος διέλασης, για τους ίδιους λόγους που αναλύθηκε στα παραπάνω διαγράμματα.



Διάγραμμα 131: Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος Συναρτήσεσι του συνολικού φορτίου διέλασης

Στο διάγραμμα 131 παρατηρείται επίσης πως το συνολικό φορτίο διέλασης αυξάνει την πυκνότητα ρεύματος, κάτι που μπορεί να εξηγηθεί από την αντίστοιχη μείωση διατομής.



Διάγραμμα 132: Κρίσιμη Πυκνότητα Ρεύματος Συναρτήσεως της ακολουθούμενης σχέσης

Στο διάγραμμα 132 αναλύεται η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος για κάθε μοντέλο όπως αυτό περιγράφεται από τις σχέσεις 23^a , 23^b και 23^y . Η σχέση 23^a εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές. Για την ακρίβεια τα αποτελέσματα από τη σχέση 23^a είναι μια τάξη μεγέθους πάνω από τις τιμές που προκύπτουν από τις σχέσεις 23^b και 23^y κάτι που ίσως εξηγείται από το γεγονός πως ενώ στις υπόλοιπες σχέσεις η διαφορά μαγνήτισης πολλαπλασιάζεται με 2 ή 3, στην σχέση 23^a πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή επίσης μια τάξη μεγέθους πάνω από τους υπόλοιπους (επί είκοσι).

Οι σχέσεις 23^b και 23^y εμφανίζουν μικρή απόκλιση από τα μεταξύ τους δεδομένα

Βιβλιογραφία.

- I). Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Ιωάννης Χρυσουλάκης, Δημήτρης Παντελής, εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- II). Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών :Μεταλλικά τεχνικά υλικά, εκδόσεις Άνωση, Α. Μάμαλης
- III). X-Ray Diffraction, Peter Moeck, Physical Metallurgy for Engineers, Portland State University.
- IV). Τεχνικά Υλικά ,Δ. Μανωλάκος, ΕΜΠ.
- V). Handbook of High Temperature Superconductivity: Theory and Experiment, J.Robert Schrieffer (Editor), James S.Brooks (Associate Editor), Springer

6. Εφαρμογές Υπεραγωγίμων Υλικών.

We think too small, like the frog at the bottom of the well. He thinks the sky is only as big as the top of the well. If he surfaced, he would have an entirely different view.”

Mao Zedong.

Ανέκαθεν διάφορα έργα λογοτεχνίας λειτουργούσαν ως πρόδρομοι μελλοντικών τεχνολογικών εφευρέσεων. Οι εφαρμογές της υπεραγωγιότητας ούτε εδώ αποτελούν εξαίρεση.

Στην μυθολογία οι αγγελιαφόροι των θεών Ερμής και Ίριδα πετάνε χάρη σε φτερωτά σαντάλια (Ραψωδία Ψ, στίχοι 340 και εξής) ενώ στα ταξίδια του Gulliver περιγράφεται ένα ιπτάμενο νησί, η Laputa, που η αιώρησή της στηρίζεται σε έναν τεράστιο μαγνήτη.

Ωστόσο οι εφαρμογές των υπεραγωγίμων υλικών βρίσκονται σε πολύ περισσότερα πεδία από τα μέσα μεταφοράς.

I. Υπολογιστές.^{1,3}

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

Ο χρόνος μετάβασης από την υπεραγωγίμη κατάσταση σε αυτήν της αντίστασης σε μια απλή επαφή, δηλαδή ο χρόνος εναλλαγής είναι Φ_0/V_g , όπου Φ_0 είναι το κβάντο της ροής $h/2e$ και V_g η τάση μεταξύ των άκρων της επαφής. Ωστόσο, μια ρεαλιστική πύλη Josephson περιορισμένου μεγέθους έχει μια πεπερασμένη χωρητικότητα επαφής C_j . Η ταχύτητα εναλλαγής περιορίζεται σχεδόν πάντα από το χρόνο RC_j που χρειάζεται για να φορτιστεί η χωρητικότητα επαφής δια μέσου του εξωτερικού αντιστάτη R. Μια επαφή αρκετών τετραγωνικών μικρόμετρων που έχει αξιοπρόσεκτη χωρητικότητα (τυπικά της τάξης του $1/10$ έως $1/100$ pF) και τυπικό φορτίο αντίστασης από 10Ω, ο χρόνος εναλλαγής μπορεί να είναι κάτω από 10 picosec. Στις υπάρχουσες συσκευές, η ισχύ που καταναλώνεται από τη λειτουργία εναλλαγής είναι αρκετά microwatt.

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

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

Μια από τις πιο σημαντικές επιτεύξεις της έρευνας ήταν η ανάπτυξη μιας τεχνολογίας που έκανε εφικτή να αναπτυχθούν επαφές Josephson πάνω σε chip. Η τεχνική περιλαμβάνει κατασκευές επαφών από κράματα μολύβδου, ινδίου και χρυσού. Λογικά κυκλώματα και μνήμης βασισμένα στη τεχνολογία κράματος μολύβδου είχαν μοναδικά χαρακτηριστικά επίδοσης και προσέκλυσε το ενδιαφέρον και την προσοχή παγκοσμίως. Σαν αποτέλεσμα πολλά ινστιτούτα παγκοσμίως και ιδιαίτερα στην Ιαπωνία, ξεκίνησαν να δουλεύουν πάνω σε εφαρμογές ψηφιακές που χρησιμοποιούν Josephson επαφές γύρω στο 1980. Η εργασία της Ιαπωνίας σε συσκευές Josephson είναι μέρος της μεγαλύτερης προσπάθειας για να βρεθούν υποψήφιες τεχνικές για την επόμενη γενιά των τεχνολογιών computer για να αντικαταστήσουν ίσως τη βασισμένη στο πυρίτιο τεχνολογία.

Στο πνεύμα αυτών των επιτυχιών η IBM ανακοίνωσε το 1983 ότι σταμάτησε η έρευνα για το Josephson-computer. Η ανακοίνωση της IBM είχε μεγάλο αντίκτυπο στην έρευνα ψηφιακών ηλεκτρονικών Josephson, αν και εργαστήρια στην Ιαπωνία συνέχισαν τις προσπάθειες τους στην ανάπτυξη ψηφιακών Josephson συσκευών έχοντας την πεποίθηση ότι παρέχουν μια μοναδική υπεροχή έναντι του πυριτίου για την κατασκευή υψηλής ταχύτητας ψηφιακών συστημάτων.

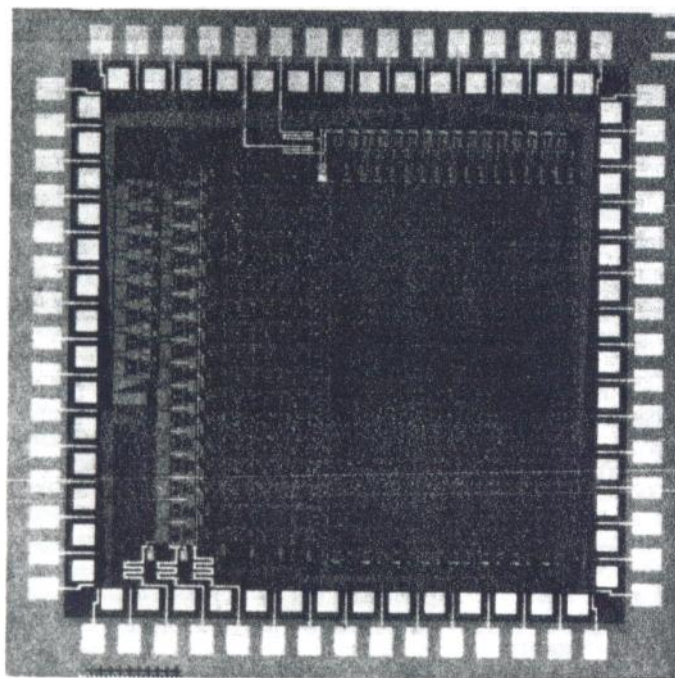
Οι πιο σημαντικοί στόχοι για να αναπτυχθούν συσκευές Josephson είναι η μεγάλη ταχύτητα εναλλαγής και η ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Στην πράξη, λογικές πύλες Josephson που λειτουργούν σε λιγότερο από 10 picosec έχουν παρουσιαστεί σε διάφορες συσκευές. Η γρηγορότερη καθυστέρηση εναλλαγής που έχει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

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

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

Για να βεβαιωθεί ωστόσο η γρήγορη και σταθερή λειτουργία των επαφών Josephson σε κυκλώματα μεγάλης ολοκλήρωσης, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν επαφές χρησιμοποιώντας υπεραγωγούς με υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία. Τέτοιες επαφές διατηρούν τη σταθερή λειτουργία τους ακόμη

και με την παρουσία μικρών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Ακόμη περισσότερο τα υπεραγωγικά υλικά υψηλής θερμοκρασίας έχουν μεγάλες τάσεις μεταξύ των άκρων της επαφής από τα χαμηλής θερμοκρασίας δίνοντας μεγαλύτερη ταχύτητα εναλλαγής. Οι πύλες που κατασκευάζονται από υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς χρησιμοποιούνται για γρηγορότερα λογικά κυκλώματα και μνήμης.



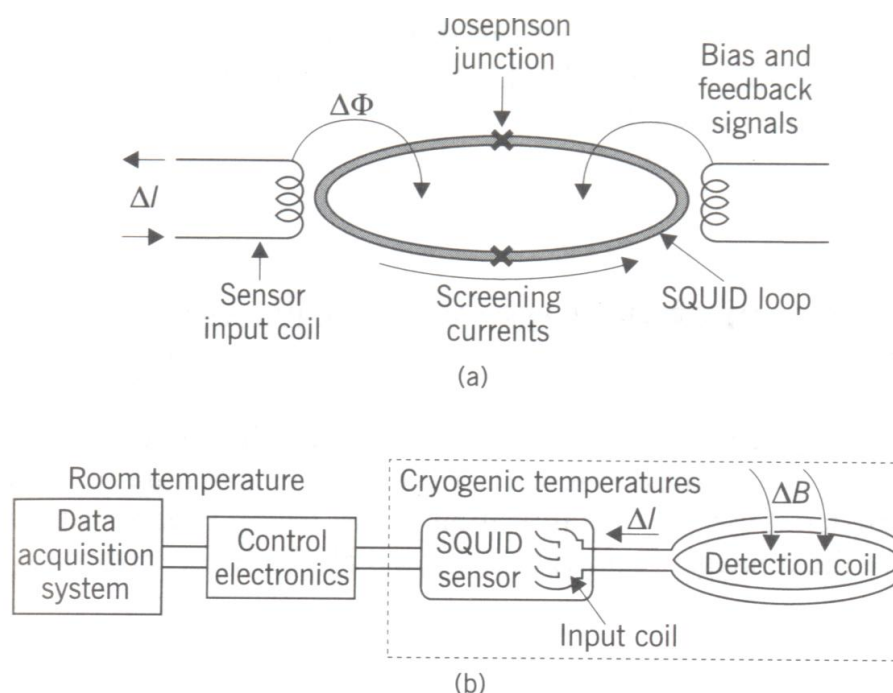
Φωτογραφία 133:1 kilobit υπεραγωγίμη μνήμη RAM της εταιρείας ETL

II. Ιατρική.^{1,3}

Οι διατάξεις Josephson δεν βρίσκουν εφαρμογή μόνο στους υπολογιστές αλλά μπορούν να βρουν ενδιαφέρουσες εφαρμογές και στην Ιατρική.

Αρκετά χρόνια μετά την εμφάνιση του φαινομένου Josephson δόθηκε μια διάλεξη στο Imperial College, με τίτλο: "SQUIDS and SLUGS-The superconducting zoo" ήτοι «Καλαμάρια και Γυμνοσάλιαγκες-Ο υπεραγωγίμος ζωολογικός κήπος».

Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από ένα βρόχο υπεραγωγίμου σύρματος και μία (RF SQUID) ή δύο (DC SQUID) διατάξεις Josephson και αποτελούν εφαρμογή της κβάντωσης του μαγνητικού πεδίου γύρω από ένα υπεραγωγίμο δαχτυλίδι στο οποίο παρεμβάλλεται μια διάταξη Josephson. Αυτές οι διατάξεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως αμπερόμετρο, βολτόμετρο, ωμόμετρο, μαγνητόμετρο, ή πεδιόμετρο. Θεωρητικό σχέδιο και μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού SQUID μαγνητόμετρου φαίνεται στην εικόνα παρακάτω:



Φωτογραφία 134:Απεικόνιση Δομής και Λειτουργίας ενός SQUID

Εξαιτίας της υπεραγωγίμης φύσης του JJ, είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι η θερμοκρασία SQUID είναι αρκετά κάτω από τη κρίσιμη θερμοκρασία του υπεραγωγίμου υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του SQUID. Η υψηλή ευαισθησία και ο χαμηλός θόρυβος είναι οι κυρίαρχες απαιτήσεις για το SQUID, άσχετα από τη χρήση του.

Η ευαισθησία του SQUID καθορίζεται από το λόγο της πυκνότητας ροής του πηνίου μετατροπής προς τη μαγνητική σύζευξη. Αυτό σημαίνει ότι η ευαισθησία μπορεί να καθοριστεί ως:

$$\frac{B}{\Phi} = \frac{1nT}{\Phi_0} \quad (76)$$

όπου B είναι η πυκνότητα ροής, Φ είναι η μαγνητική σύζευξη του πηνίου, Φ_0 είναι το κβάντο της ροής $2.06 \times 10^{-15} \text{ v} \cdot \text{s}$ και $1nT$ είναι η ελάχιστη πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου που είναι ίση με $1/10^{15} T$.

Γενικά η διάταξη SQUID είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές των μαγνητικών πεδίων και μπορεί να μετράει τάσεις της τάξεως των 10^{-18} V , ρεύματα της τάξεως 10^{-18} A καθώς και μαγνητικά πεδία της τάξεως των $10^{-15} T$.

$$\text{Ο δε θόρυβος μπορεί να καθοριστεί ως εξής: } \sqrt{S_\Phi} = \frac{1fT}{\sqrt{Hz}} \quad (77),$$

όπου fT είναι το femtoTesla= $10^{-15} T$.

Το εύρος ζώνης είναι η κρίσιμη απαίτηση για την ευαισθησία στις βιομαγνητικές μετρήσεις. Το εύρος ζώνης των SQUID καθορίζεται ως το εύρος

ζώνης της συχνότητας πάνω στην οποία ένα συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου της μαγνητικής ροής έχει επιτευχθεί, και εκφράζεται σε όρους συχνότητας. Μια συχνότητα κοντά στο 1Hz είναι πιο επιθυμητή για βιομαγνητικές μετρήσεις. Για παράδειγμα ένα μέγιστο όριο επιπέδου θορύβου πυκνότητας ροής για ένα ευαίσθητο βιομαγνητικό σύστημα με τιμές πραγματικής διάγνωσης είναι περίπου $10fT/\sqrt{Hz}$ για συχνότητα 10Hz. Ένα εύρος ζώνης του συστήματος περίπου 2KHz είναι πιο επιθυμητό για μετρήσεις που καθορίζονται από μέγιστα πλάτη του σήματος.

Για να επιτευχθούν αξιόπιστες μετρήσεις με χαμηλής θερμοκρασίας SQUIDS , είναι απαραίτητο να υπάρχουν μαγνητικώς προστατευόμενα δωμάτια εξαιτίας των υψηλών απαιτήσεων S/N. Υψηλών προδιαγραφών δωμάτια προσφέρουν βελτίωση του λόγου S/N 50dB στα 0.2Hz, 56.5dB στα 1Hz, και 60dB στα 12Hz, που είναι πιο επιθυμητή για αξιόπιστες βιομαγνητικές μετρήσεις.

Η πυκνότητα φασματικής ισχύος $S_{\Phi}(f)$ και η απόδοση ενέργειας ή μονάδα ενέργειας ανά μονάδα εύρους ζώνης $\varepsilon(f)$ είναι άλλοι σημαντικοί παράμετροι , που είναι συναρτήσεις των παραμέτρων των πηνίων και της θερμοκρασίας.

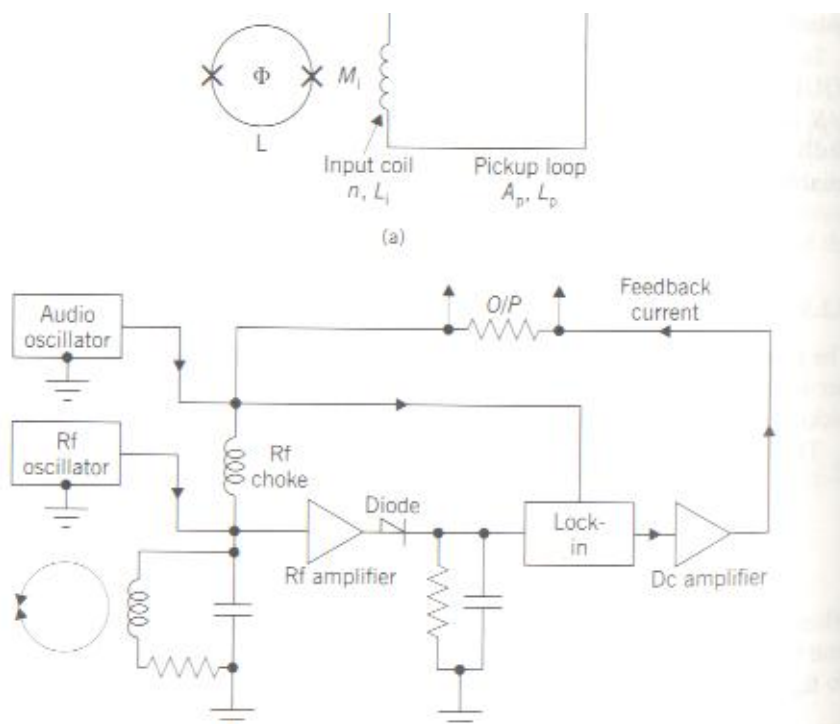
$$\text{Η απόδοση ενέργειας καθορίζεται ως εξής } \varepsilon(f) = \frac{S_{\Phi}(f)}{2L} \quad (78)$$

όπου L είναι η επαγωγή του πηνίου. Το SQUID όταν δρα ως ενισχυτής , το κέρδος του καθορίζεται σαν ο λόγος της κβαντικής ροής προς το λόγο της κβαντικής ροής στο πηνίο που ανιχνεύει το σήμα. Αυτό σημαίνει ότι το κέρδος μπορεί να γραφεί σαν:

$$G_a = \frac{\Phi_0}{\Phi_s} \quad (79)$$

όπου η υποσημείωση s είναι για το σήμα(signal).

Συνοψίζοντας , η ευαίσθησία SQUID είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας επίδοσης ενός υπεραγωγίου μαγνητόμετρου SQUID και είναι κατευθείαν ανάλογη με τη θερμοκρασία λειτουργίας. Μελέτες έδειξαν ότι ένα μαγνητόμετρο SQUID μπορεί να υποφέρει από θόρυβο έως και 20 φορές από ένα που βρίσκεται στη θερμοκρασία λειτουργίας των 4.2K. Άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ο λευκός θόρυβος $\sqrt{S_{\Phi}}$, που είναι επίσης εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία. Η τυπική τιμή του για ένα DC-SQUID που λειτουργεί στους 4.2K είναι περίπου $2 \times 10^{-6} J/Hz$, που είναι ισοδύναμο με 400h ($h = 10^{-34} J \cdot s$). Σε υψηλότερες κρυονικές θερμοκρασίες , η μαγνήτιση από το λευκό θόρυβο είναι υψηλή. Ωστόσο η χρησιμοποίηση πηνίου διαμόρφωσης με ανάδραση(ακολουθεί η εικόνα) όχι μόνο ελαχιστοποιεί το θόρυβο , αλλά επίσης βελτιώνει τη δυναμική περιοχή.



Διάγραμμα 135:πηνίο διαμόρφωσης από υπεραγωγό

Για περισσότερο από 20 χρόνια τα SQUIDS χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν βιομαγνητικά σήματα από την καρδιά, τον εγκέφαλο, το συκώτι, τα νεύρα, τα μάτια και άλλα όργανα του ανθρώπινου σώματος. Τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής τεχνολογίας με τους υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς θα διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση των συστημάτων SQUID για να παρέχουν ακριβείς και αξιόπιστες βιομαγνητικές μετρήσεις με ελάχιστο κόστος. Έμφαση δίνεται στις κλινικές εφαρμογές των SQUIDS που χρησιμοποιούν χαμηλής θερμοκρασίας υπεραγωγίσιμη τεχνολογία, διότι έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα μαγνητόμετρα SQUID έχουν επιδείξει μοναδικές διαγνωστικές ικανότητες στο ιατρικό πεδίο όπου δεν υπάρχουν αξιόπιστες εναλλακτικές λύσεις.

Ένα μαγνητόμετρο SQUID μετράει τις ζωτικές λειτουργίες των οργάνων του ανθρώπινου σώματος περισσότερο από το να παρέχει πληροφορίες δομής όπως η μαγνητική ανάλυση εικόνας και η τομογραφία με H/Y.

Χαρτογραφώντας την λειτουργία των νεύρων είναι πιθανό να εντοπίσει τις ηλεκτρικές περιοχές στον εγκέφαλο με αποστάσεις της τάξης των λίγων χιλιοστών, που μπορεί να παρέχει αξιόπιστη ανίχνευση από διάφορες νευρολογικές διαταραχές, συμπεριλαμβανομένων των επιληπτικών κρίσεων. Οι διάφορες εφαρμογές των SQUID περιγράφονται με ιδιαίτερη έμφαση στην εξάρτηση της ευαισθησίας από τη θερμοκρασία, την αξιοπιστία και το εύρος ζώνης.

III. Μετρητική τεχνολογία.¹

Τα SQUID επίσης χρησιμοποιούνται από τους γεωλόγους για να ανιχνεύσουν κοιτάσματα πετρελαίου και ορυκτών τα οποία προκαλούν μικρές τοπικές μεταβολές στο μαγνητικό πεδίο της γης. Χρησιμοποιούνται επίσης στην έρευνα και στην μελέτη των τεκτονικών πλακών της γης και για την χρονολόγηση των διαφόρων υποστρωμάτων του υπεδάφους. Μάλιστα όσο τα SQUID κατασκευάζονται από υπεραγωγούς με κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από το σημείο ζέσεως του αζώτου, θα βρίσκουν όλο και μεγαλύτερες εφαρμογές χάρη στο μικρό τους μέγεθος και την εύκολη συντήρηση.

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

IV. Υπεραγώγιμες ηλεκτρικές μηχανές.^{1,2}

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

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

Αυτά τα πλεονεκτήματα οφείλονται σε τρεις ιδιότητες:

1. Οι υπεραγωγοί μεταφέρουν τεράστια ρεύματα χωρίς καμιά απώλεια και ελαχιστοποιούν το σίδερο σε μερικά μέρη από τη μηχανή(αντιθέτως χρησιμοποιούνται χάλκινες περιελίξεις) οπότε και μειώνεται το βάρος και το μέγεθος.
2. Οι υπεραγωγοί μπορούν να παράγουν μεγάλης πυκνότητας μαγνητικές ροές που θα οδηγήσουν σε αξιοσημείωτη μείωση στο φυσικό μέγεθος του ηλεκτρικού εξοπλισμού.
3. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας στην οποία δουλεύουν οι υπεραγωγοί, αποφεύγονται οι απώλειες λόγω του φαινομένου

Joule. Άρα αυξάνεται η ικανότητα ισχύος εξόδου της μηχανής όσο και η αποδοτικότητά της.

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

$$R_{out} = \frac{KVA}{D^2 LN} \quad (80)$$

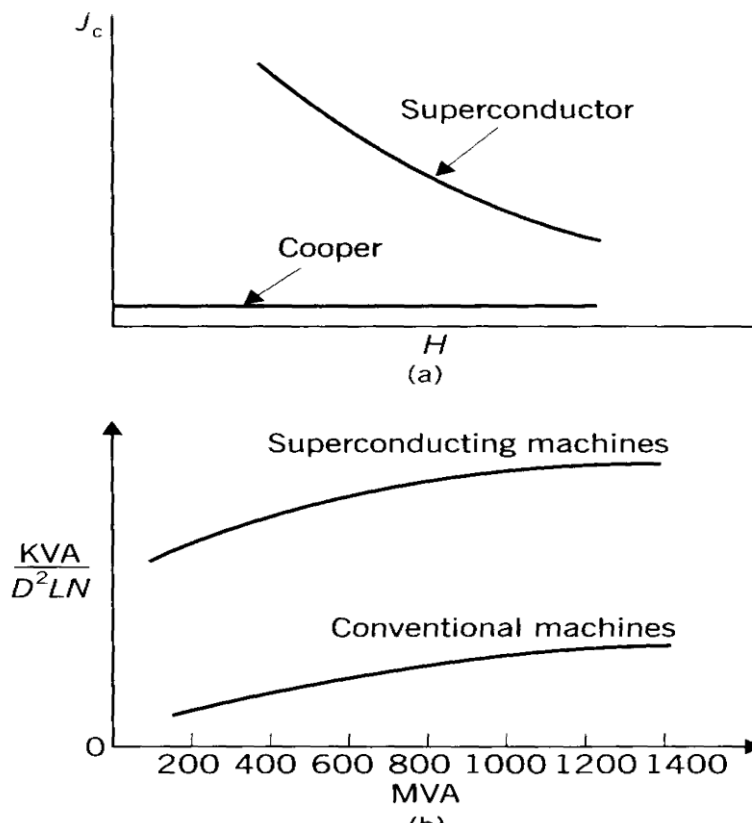
όπου KVA = Δείκτης της ισχύος για υπεραγώγιμη μηχανή

D = Η διάμετρος του στάτορα.

L = Το μήκος του πυρήνα

N = Ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

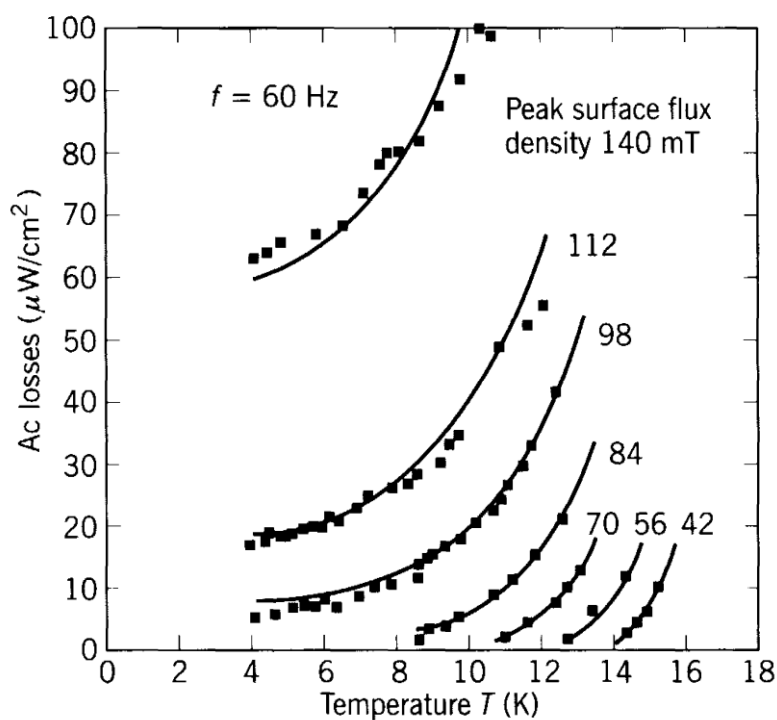
Ο συντελεστής που φαίνεται στο διάγραμμα 136 είναι ένας αληθινός δείκτης της δυνατότητας για ισχύ στην έξοδο. Φαίνεται τόσο η μείωση του μεγέθους σε σχέση με τις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές όσο η αυξημένη πυκνότητα ρεύματος ως προς τη μαγνητική ροή σε σχέση με περιέλιξη από χαλκό.



Διάγραμμα 136: Συντελεστής ισχύος για υπεραγώγιμη και συνηθισμένη ηλεκτρική μηχανή.

Ο στάτορας μιας υπεραγώγιμης σύγχρονης γεννήτριας περιλαμβάνει μια περιέλιξη του στάτορα και μια προστατευτική κατασκευή που παρέχει μαγνητική προστασία, μηχανική στήριξη και θερμοκρασιακή φροντίδα. Οι

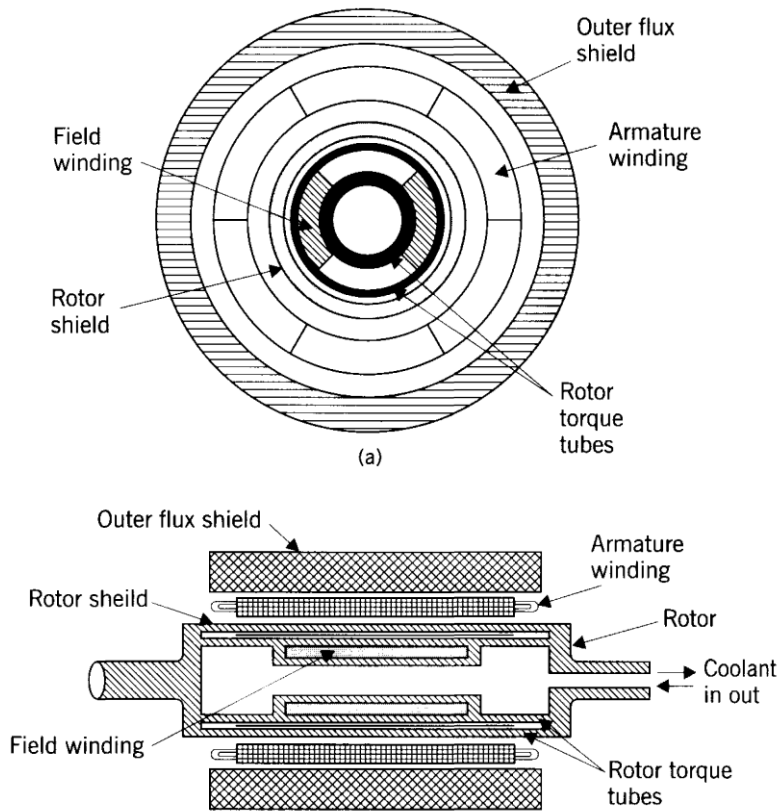
περιελίξεις του στάτορα υπόκεινται σε πεδία εναλλασσόμενα, τα οποία θα εισάγουν δυνωρρεύματα που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και το μέγιστο της επιφανειακής πυκνότητας ροής. Οι απώλειες AC ($\mu W/cm^2$) αυξάνουν με αντίστοιχη αύξηση των μεγεθών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τυπικές απώλειες σε έναν υπεραγωγό σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας και της επιφανειακής πυκνότητας ροής φαίνονται ακολούθως:



Διάγραμμα 137: Συντελεστής απωλειών σε μια υπεραγωγίμη ηλεκτρική μηχανή

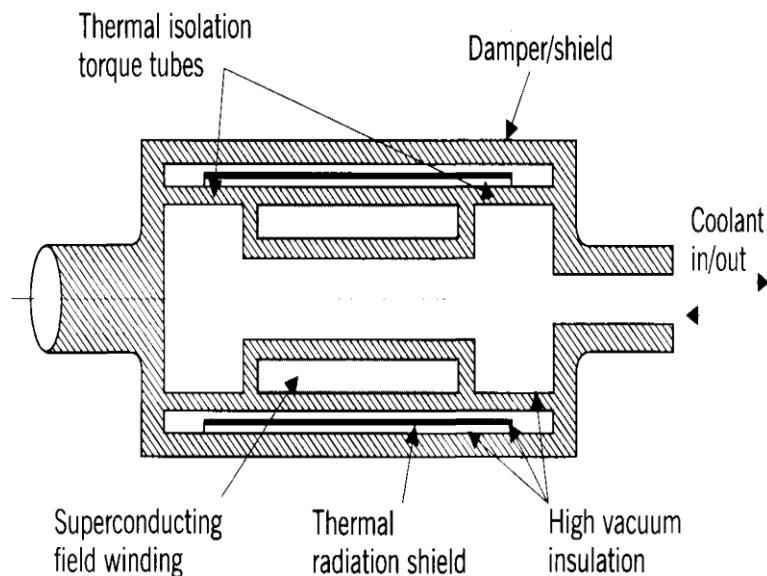
Ο δε υπεραγωγίμος κινητήρας έχει τρεις περιελίξεις: μια περιέλιξη του επαγωγίμου, μια περιέλιξη DC πεδίου, και μια περιέλιξη τοποθετημένη ανάμεσα σε αυτήν του επαγωγίμου και του πεδίου. Οι απαιτήσεις από την υπεραγωγίμη περιέλιξη πεδίου να σταθεροποιηθεί στους 4.2K ικανοποιείται από 4 σύγχρονα στοιχεία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

Εικόνες από τον άξονα και από την πλευρά της υπεραγωγίμης γεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 128 :



Σχήμα 138: δομή υπεραγωγίου κινητήρα

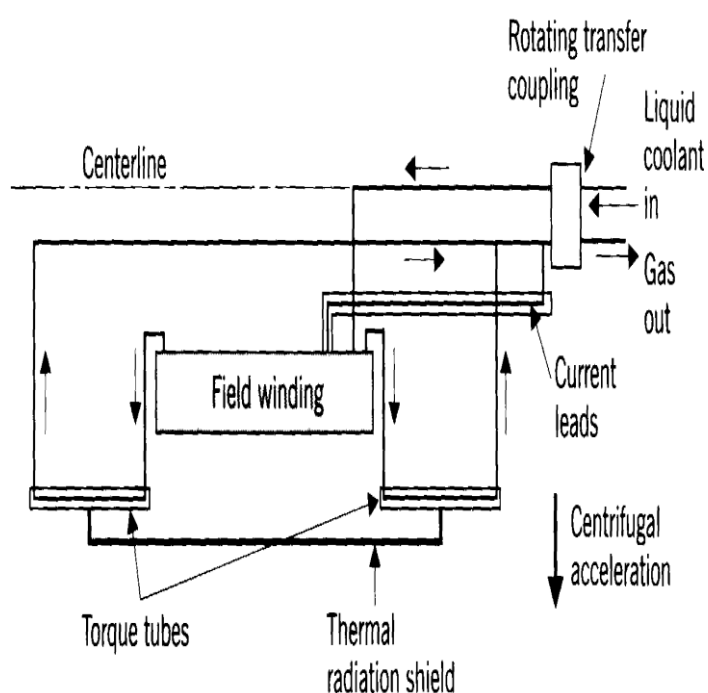
Συγκεκριμένες λεπτομέρειες στην περιέλιξη του πεδίου και σε αυτήν που βρίσκεται ανάμεσα στην περιέλιξη του επαγωγίμου και του πεδίου καθώς και πληροφορίες για την ασπίδα θερμικής ακτινοβολίας για υπεραγωγίμες γεννήτριες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 139: δομή ψήκτρας υπεραγωγίμου κινητήρα

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

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



Σχήμα 140: ψύξεις περιελίξεων υπεραγωγίμου κινητήρα

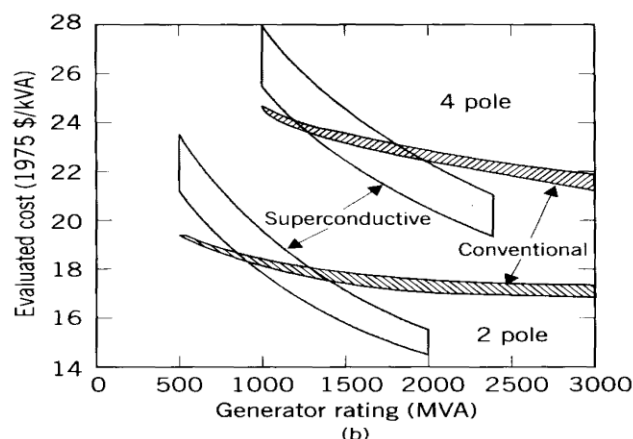
Αυτές οι υπεραγωγίμες μηχανές αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας αφού περιορίζουν τις απώλειες σημαντικά με την αυξημένη τους απόδοση, δίχως παράλληλα να αυξάνεται υπερβολικά το κόστος όπως άλλωστε φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα εφαρμογή των υπεραγωγίμων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

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

^a Data from Westinghouse.

^b Data from KWU.

(a)



Διάγραμμα 141: συγκριτικός πίνακας απόδοσης υπεραγωγίμων γεννητριών

V. Μαγνητικά ρουλεμάν και στρόφαλοι ισχύος(flywheels).¹

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

Τα μαγνητικά ρουλεμάν έτσι θα έχουν πολύ λιγότερες απώλειες ενέργειας από τα μηχανικά, ειδικά αυτά που έχουν κατασκευαστεί από κεραμικούς υπεραγωγούς. Επιπλέον προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλού θορύβου αλλά και της φιλικότητας ως προς το περιβάλλον αφού δε χρησιμοποιούνται λιπαντικά. Η πιο απλή μορφή ενός τέτοιου ρουλεμάν είναι η σύνδεση ενός ρότορα σε έναν υπεραγωγίμο μαγνήτη. Τα υπεραγωγίμα υλικά που προτιμώνται σε τέτοιες κατασκευές είναι αυτά με κρίσιμο σημείο κοντά στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου. Σήμερα είναι πιθανή η ανύψωση ενάντια σε πιέσεις μέχρι και 300kPa, κάτι που είναι αρκετό για μερικές εντυπωσιακές επιδείξεις όπως μια στην Ιαπωνία στην οποία ανυψωνόταν ένας παλαιστής σούμο.

- (b) Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των μαγνητικών ρουλεμάν είναι η κατασκευή στροφάλων για ενεργειακή αποθήκευση. Ένα μεγάλο πρόβλημα των στροφάλων για χρήση τους ως αποθηκευτές ενέργειας

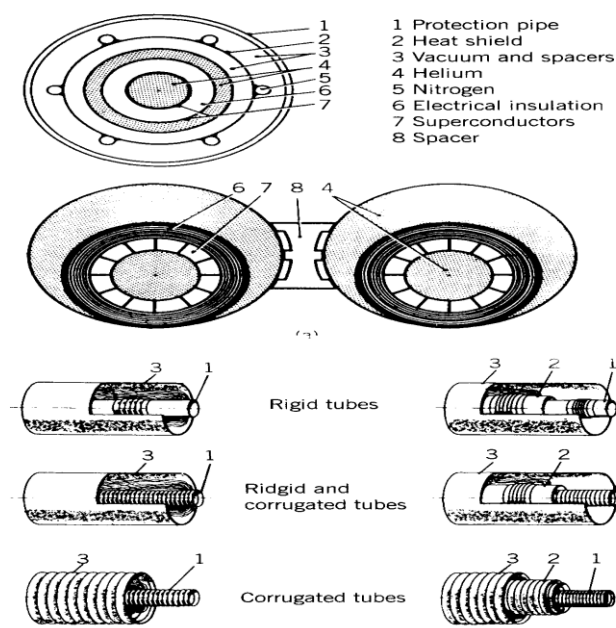
είναι οι απώλειες μέσω ρουλεμάν. Χρησιμοποιώντας όμως υπεραγωγίμα ρουλεμάν αυτές οι απώλειες μπορούν να μηδενιστούν. Αυτές οι εφαρμογές των υπεραγωγών αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και χρησιμοποίησής τους σε περιόδους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

VI. Υπεραγωγίμο ηλεκτρικό δίκτυο.^{1,2,4,9}

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

Όλα αυτά ωστόσο αναμένεται να αλλάξουν με ένα υπεραγωγίμο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

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



Σχήμα 142: Δομή υπεραγωγικών καλωδίων

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

Σε AC υπεραγωγικά καλώδια, μεγάλο μέγεθος καλωδίου και κρυογονικό περίβλημα είναι απαραίτητα. Αυτοί οι παράγοντες αυξάνουν το συνολικό κόστος στην κατασκευή και λειτουργία των AC υπεραγωγικών καλωδίων δείχνουν ότι τα DC καλώδια είναι οικονομικότερα. Επίσης στα DC καλώδια το κόστος των μετατροπέων που βρίσκονται στο τέλος των γραμμών μεταφοράς υπολογίζεται στο 60% σύμφωνα με μελέτες της Philadelphia Electric Company. Η μελέτη συμπεριλαμβάνει το γεγονός ότι χαμηλότερο κόστος γραμμής θα κάνουν τη DC γραμμή περισσότερο ελκυστική για καλώδια μικρότερα από 200Km σε μήκος.

Τα υπεραγωγικά καλώδια επιτρέπουν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις δίχως απώλειες. Παράλληλα, επειδή

μεταφέρει μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος χρειάζονται λιγότερες γραμμές μεταφοράς, γεγονός που οδηγεί και σε εξοικονόμηση χώρου.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα των υπεραγωγίων καλωδίων είναι πως η χαμηλή τους θερμοκρασία λόγω ψύξης δεν επιτρέπει την ανάφλεξη τους όπως στα συμβατικά, εκμηδενίζοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Τέλος δε θα χρειάζονται μετατροπείς του ρεύματος από εναλλασσόμενο σε συνεχές και αντίστροφα, αφού δε θα υπάρχουν απώλειες.

Το υπεραγωγίο δίκτυο αναμένεται να παίξει καθοριστικό ρόλο με την αύξηση των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα βασικό πρόβλημα της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ είναι πως η παραγωγή βρίσκεται μακριά από την κατανάλωση (κυρίως αστικά κέντρα). Υπολογίζεται μάλιστα πως στις ΗΠΑ οι απώλειες λόγω του φαινομένου Joule κατά τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος αγγίζουν το 6 με 7% της συνολικής παραγόμενης ισχύος⁹. Με τα υπεραγωγία καλώδια και τη μεταφορά ρεύματος δίχως απώλειες είναι δυνατή η μεταφορά μεγάλης ηλεκτρικής ισχύς σε αστικά κέντρα όταν η πηγή μπορεί να βρίσκεται χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά. Έτσι, φωτοβολταϊκά στην Σαχάρα θα μπορούσαν να μεταφέρουν ρεύμα στην Ευρώπη ή αιολικά πάρκα στην Σιβηρία να μεταφέρουν ρεύμα στο Πεκίνο.

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

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

VII. Υπεραγωγίοι Μαγνήτες στην Φυσική Υψηλών Ενέργειών.^{5,6}

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

Οι κυριότερες πειραματικές εγκαταστάσεις φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων είναι το CERN στη Γενεύη και το Fermilab στο Σικάγο. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις κρίνεται απαραίτητη η χρήση δεσμών στοιχειωδών σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες. Ο έλεγχος και η επιτάχυνση αυτών των

δεσμών γίνεται αποκλειστικά μέσω υπεραγωγίων μαγνητών (Nb_3Sn), οι οποίοι προσφέρουν πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία και υψηλή σταθερότητα. Στη νέα διάταξη σύγκρουσης δεσμών πρωτονίων- πρωτονίων στο CERN, με το όνομα Large Hadron Collider (LHC) που θα έχει ως στόχο την επαλήθευση της εύρεσης του σωματιδίου που είναι φορέας της βαρυτικής ενέργειας (μποζόνιο του Higgs) πρωτόνια αναμένεται να επιτευχθούν μέχρι να φθάσουν ενέργειες 14 TeV μέσω μαγνητικού πεδίου της τάξης των 12T. Αυτές οι ενέργειες στο «πείραμα του αιώνα» όπως έχει χαρακτηριστεί θα ήταν πλήρως αδύνατο να επιτευχθούν δίχως τη χρήση υπεραγωγίων μαγνητών.

VIII. Υπεραγωγοί Μαγνήτες στους Αντιδραστήρες Σύντηξης.¹

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

Η σύντηξη παράγει ισχύς καθώς δύο άτομα υδρογόνου ενώνονται σχηματίζοντας ένα άτομο ηλίου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας φθηνά, σταθερά και δίχως επικίνδυνα απόβλητα. Απαραίτητο στην όλη διαδικασία είναι η επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας(περίπου~15MK). Αυτό αναμένεται να γίνει μέσω πλάσματος το οποίο θα ελέγχεται μέσω τεράστιων υπεραγωγίων μαγνητών(από Nb_3Sn) της τάξεως των 13.5T.

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

IX. Ιπτάμενα Τραίνα(MAGLEV).¹

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

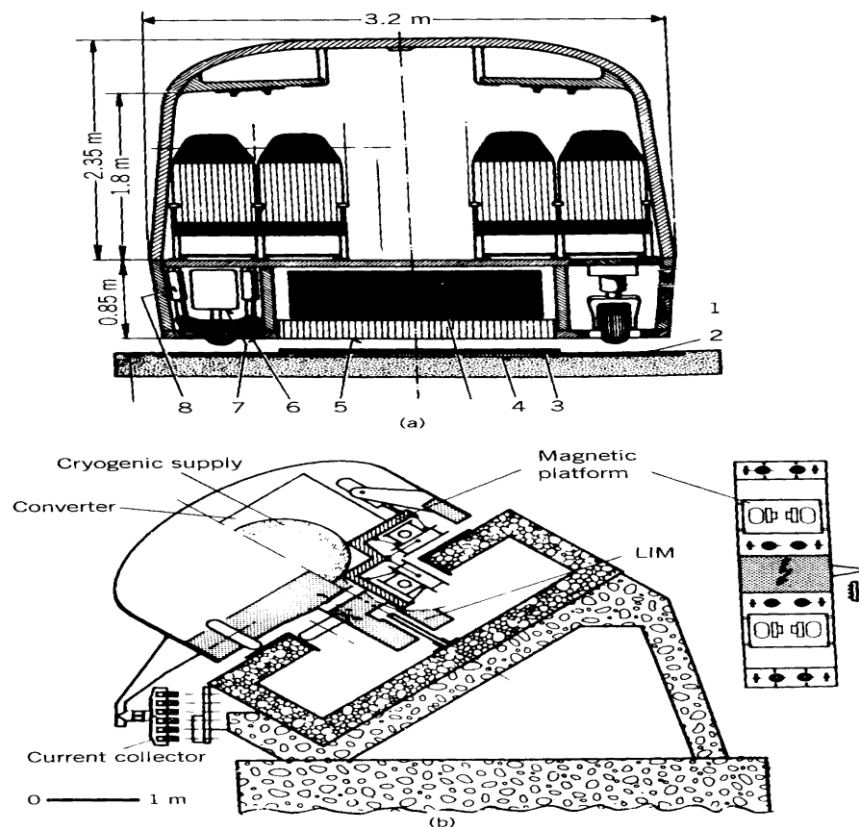


Φωτογραφία 143: τρέινο maglev στην Ιαπωνία

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

Το κέντρο έρευνας της εταιρίας Siemens το 1979 ανέπτυξε δοκιμές ανύψωσης χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό σύγχρονο κινητήρα(ΓΣΚ) με περιέλιξη οπλισμού 3 –φάσεων στο πάτο του οχήματος. Ο ΓΣΚ ανέπτυξε μια ώθηση περίπου 4500 lb , επιταχύνοντας το τρένο σε μέγιστη ταχύτητα 150km/h. Ανταγωνιστικά συστήματα ηλεκτρομαγνητικής ανύψωσης ανακαλυφθήκαν τη δεκαετία του 1980 με δυνατότητες ταχύτητας μεταξύ 300 και 400km/h. Το πρόγραμμα του συστήματος ανύψωσης του ιαπωνικού σιδηρόδρομου κατάφερε να φέρει αποτελέσματα γύρω στο 1975. Οι έρευνες έδειξαν μια δυνατότητα ταχύτητας 517km/h σε μια 7km γραμμική τροχιά χρησιμοποιώντας ένα 13m μακρύ όχημα που ζύγιζε 10 τόνους. Το ανυψωθέν όχημα τρένο ήταν εφοδιασμένο με 8 υπεραγωγίμους μαγνήτες (4 μαγνήτες για ανύψωση και 4 για προώθηση). Η ψύξη των υψηλής ισχύος υπεραγωγίμων μαγνητών επιτεύχθηκε με ανεφοδιασμό των κρυστατών υγρού ηλίου ανάμεσα στις διαδρομές δοκιμής. Αργότερα επιτεύχθηκε η ταχύτητα των 520km/h με τρία οχήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους σε μια ευθεία διαδρομή 25km. Ο ιαπωνικός σιδηρόδρομος εισήγαγε τα τρένα σφαίρες γύρω στο 1985 μεταξύ μεγάλων πόλεων με ταχύτητες που ξεπερνούν τα 300km/h, βασισμένα στη τεχνολογία του συστήματος ηλεκτροδυναμικής ανύψωσης. Το Μάρτιο του 1997 , παρουσίασε το ταχύτερο τρένο στο κόσμο με ταχύτητα που φτάνει τα 550Km/h.

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



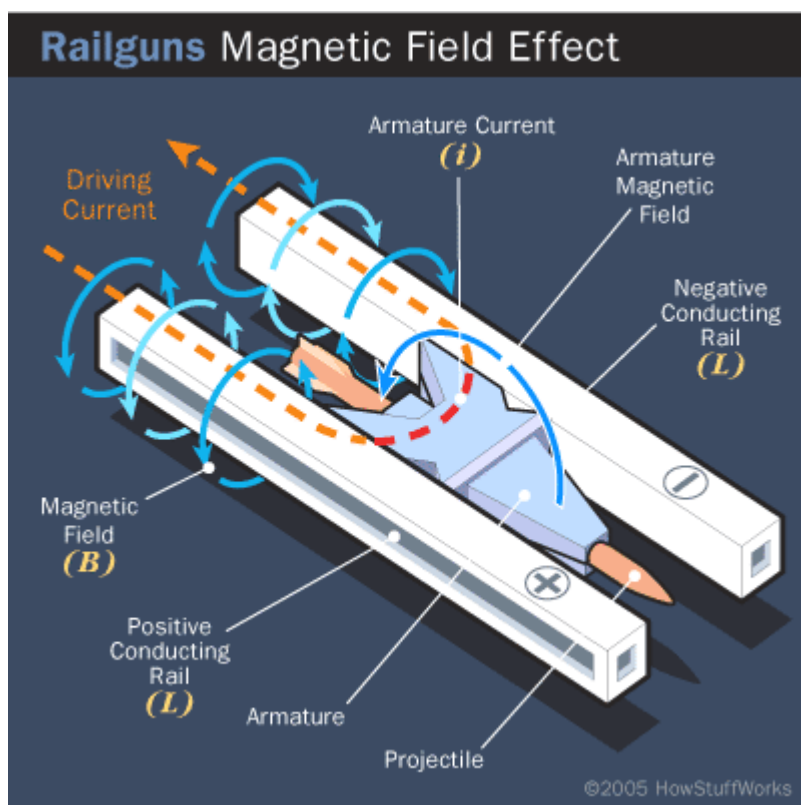
Σχήμα 144: Μέρη Maglev

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

X. Πολεμικές εφαρμογές.^{7,8,10}

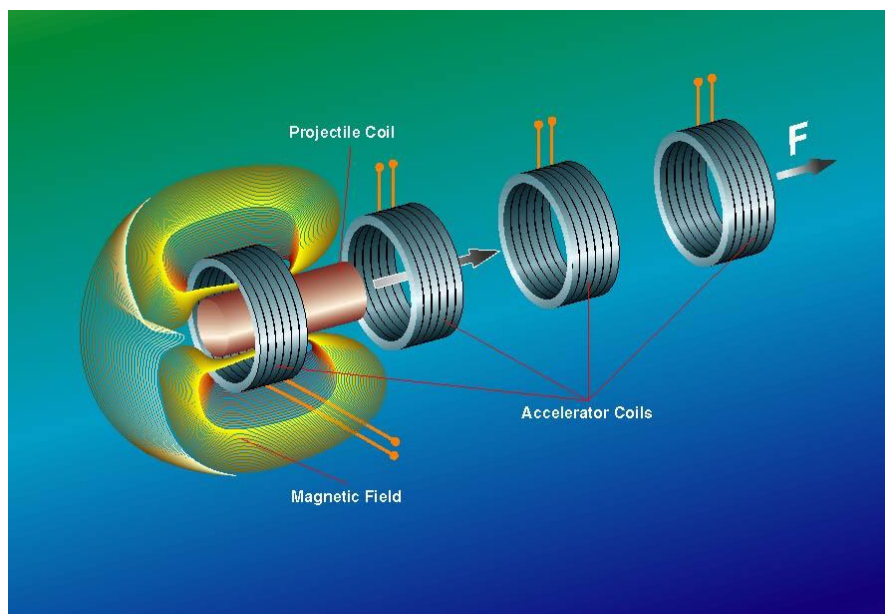
Δυστυχώς ο Goethe είχε απόλυτο δίκιο όταν έλεγε «Δύο πράγματα μου δίνουν την αίσθηση του απείρου. Το σύμπαν και η ανθρώπινη βλακεία. Και για το πρώτο δεν είμαι σίγουρος». Αντί λοιπόν η ανθρωπότητα να αναπτύσσει τις ειρηνικές εφαρμογές των υπεραγωγών, προτιμά να κατασκευάζει όπλα με αυτούς. Μερικά από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

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



Σχήμα 145:Απεικόνιση λειτουργίας rail gun

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



Σχήμα 146: Απεικόνιση λειτουργίας Gauss gun

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

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

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

Βιβλιογραφία.

- I). The Rise of the Superconductors, P.J.Ford, G.A.Saunders, CRC Press.
- II). Superconductor technology: Applications to microwave , electro-optics, electrical machines and propulsion systems, A.R.Jha, (1998), 1st Edition, United States of America, John Wiley & Sons, Inc.
- III). Πτυχιακή εργασία, Κρυστρονική και Υπεραγωγιμότητα , Λουκάς Φουσέκης-Ευαγγελίου, ΤΕΙ Αθήνας,2000.
- IV). Scientific American
- V). Η γοητεία των παράξενων quark, R.Michael Barnett, Henry Muhry, Helen. R.Quinn, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- VI). SUPERCONDUCTIVITY AND CRYOGENICS FOR THE LARGE HADRON COLLIDER, Ph. Lebrun, LHC Project Report 441.
- VII). Rail Gun. (2009). In *Wikipedia*. Retrieved August 21, 2009, from Wikipedia Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>
- VIII). Gauss Gun. (2009). In *Wikipedia*. Retrieved August 21, 2009, from Wikipedia Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun>.
- IX). http://science.nasa.gov/headlines/y2003/05feb_superconductor.htm
- X). <http://superconductors.org/emp-bomb.htm>

7. Συμπεράσματα.

Η παρασκευή του υπεραγωγού MgB_2 με χρήση της μεθόδου PIT αναμένεται να διαδοθεί και να χρησιμοποιηθεί ευρύτατα καθώς πρόκειται για μια μέθοδο απλή και οικονομική. Από την παρασκευή του MgB_2 μέσω PIT στο εργαστήριο διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- I). Τα θεωρητικά μοντέλα που περιγράφονται στο 4^ο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας προσεγγίζουν αρκετά τα πειραματικά αποτελέσματα για το φορτίο διέλασης αρκετά (ιδιαίτερα το πρότυπο του λόφου-τριβή) ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια πρώτη εκτίμηση αλλά όχι για να χρησιμοποιηθούν για αναλυτικούς υπολογισμούς.
- II). Το φορτίο διέλασης αυξάνεται όσο περισσότερο αυξάνεται ο λόγος διέλασης. Επίσης όσο μικραίνει η αρχική διατομή του υλικού, τόσο περισσότερο αυξάνεται το φορτίο διέλασης .
- III). Το υλικό εμφανίζεται διαφαινό στο μικροσκόπιο ενώ το κυρίαρχο στοιχείο είναι το βόριο, όπως άλλωστε ορίζει η στοιχειομετρική ανάλυση του διβοριδίου του μαγνησίου.
- IV). Το κύριο επίπεδο κρυστάλλωσης του υλικού είναι το (101) ανεξαρτήτως φάσης διέλασης. Η διέλαση του υλικού οδηγεί σε μείωση των επιπέδων κρυστάλλωσης 101),(112),(200) και (100) και σε αύξηση των επιπέδων κρυστάλλωσης (201) και (103).
- V). Η αύξηση των επιπέδων κρυστάλλωσης (201),(103) αντί των (101),(112),(200) και (100) δείχνει πως στην διεύθυνση του a (201) και c (103) μειώνεται η πλεγματική απόσταση d_{hkl} (λογικό αφού συμπιέστηκε το υλικό) ,το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της συμπίεσης που υπέστη το υλικό ενώ ταυτόχρονα ελαττώνεται και η πυκνότητα των κόμβων σε εκείνη τη διεύθυνση.
- VI). Κάθε φάση διέλασης δεν επιδρά στην επιφανειακή δομή του υλικού ενώ ύστερα από κάθε κατεργασία μειώνεται το μέγεθος των κόκκων, οδηγώντας σε σκλήρυνση του υλικού.
- VII). Ο υπεραγωγός MgB_2 παρασκευασμένος με τη μέθοδο PIT εμφανίζει πολύ καλές υπεραγωγίμες ιδιότητες: Η κρίσιμη θερμοκρασία του υλικού είναι αρκετά κοντά στην θερμοκρασία μετάβασης στην υπεραγωγίμη κατάσταση του καθαρού MgB_2 χωρίς να έχει υποστεί πυροσυσσωμάτωση.
- VIII). Η κρίσιμη θερμοκρασία του δείγματος φαίνεται να σχετίζεται με τον συνολικό λόγο διέλασης, το συνολικό φορτίο διέλασης, την τελική διατομή και την συνολική μείωση διατομής. Συγκεκριμένα εμφανίζει φθίνουσα συμπεριφορά ως προς τα παραπάνω μεγέθη, δίχως όμως να εμφανίζεται μεγάλη πτώση. Αντιθέτως, ο λόγος και το φορτίο διέλασης ανά φάση διέλασης δε φαίνεται να επηρεάζει άμεσα την αντίστοιχη πτώση της κρίσιμης θερμοκρασίας του υλικού.
- IX). Η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται όσο μειώνεται η διατομή του υλικού. Οι σχέσεις στην αντίστοιχη βιβλιογραφία δε συμφωνούν όλες μεταξύ τους ως προς την τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων ωστόσο οι

σχέσεις (23β) και (23γ) φαίνεται να εμφανίζουν σύγκλιση αποτελεσμάτων μεταξύ τους.

- Χ). Τόσο το άνω όσο και το κάτω κρίσιμο μαγνητικό πεδίο, παρουσιάζει αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά ως προς την κρίσιμη θερμοκρασία του υλικού.

8. Προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και περαιτέρω έρευνα.

Θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει σύγκριση του MgB_2 παρασκευασμένο με έλαση αντί διέλασης και τις διαφορές τους σε μικρομηχανικό επίπεδο καθώς και σε επίπεδο υπεραγωγίων ιδιοτήτων. Παράλληλα, θα ήταν πρόκληση η υπολογιστική προσομοίωση της διέλασης με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, η παρασκευή του MgB_2 με την μέθοδο melt-texturing και η σύγκριση των υπεραγωγίων ιδιοτήτων του με τις υπεραγωγίμες ιδιότητες του MgB_2 παρασκευασμένου μέσω PIT θα ήταν χρήσιμη. Τέλος, κρίνεται σημαντική η εφαρμογή της ίδιας μεθόδου σε σκόνη άλλων υπεραγωγών(πχ TBCCO) και η εξαγωγή συμπερασμάτων από την σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικά υλικά.

*Από το πανάγιο αναγυρίζω κύμα,
ωσάν το νιό δεντράκι ανανιωμένος,
που φυλλουριά ξεπέταξε καινούρια,
άξιος ,αγνός, ψηλά ν' ανέβω σ'άστρα.*

Δάντης, Θεία Κωμωδία, Καθαρήρι στίχοι 142-145, μετάφραση Καζαντζάκη.

Υπόμνημα Α:

Φωτογραφίες/Διαγράμματα/Σχέδια από (1) έως(24).....	Κεφάλαιο 1
Φωτογραφίες/Διαγράμματα/Σχέδια από (25) έως(70).....	Κεφάλαιο 4
Φωτογραφίες/Διαγράμματα/Σχέδια από (71) έως(132).....	Κεφάλαιο 5
Φωτογραφίες/Διαγράμματα/Σχέδια από (133) έως(46).....	Κεφάλαιο 6
Εξιιώσεις από (1) έως (24).....	Κεφάλαιο 1
Εξιιώσεις από (25) έως (70).....	Κεφάλαιο 4
Εξιιώσεις από (71) έως (75).....	Κεφάλαιο 5
Εξιιώσεις από (76) έως (80).....	Κεφάλαιο 6
Πίνακες από (1) έως (2).....	Κεφάλαιο 1

Υπόμνημα Β:

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 2.....	42
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3.....	47
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 4.....	76
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 5.....	121
Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 6.....	142

Υπόμνημα Γ:

Ο χαρακτηρισμός με XRD έγινε στη σχολή Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών όπως επίσης και ο χαρακτηρισμός με SEM για την 1^η διέλαση.Ο χαρακτηρισμός με SEM για την 3^η διέλαση έγινε στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ο χαρακτηρισμός με οπτικό μικροκόπιο έγινε στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών και τέλος οι υπεραγώγιμες ιδιότητες μετρήθηκαν στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» στο Ινστιτούτο επιστήμης Υλικών με τη βοήθεια του υποψήφιου διδάκτορα Ι. Θεοδωρακόπουλου του εργαστηρίου κατεργασιών των υλικών.

Υπόμνημα Δ:

Συγκεντρωτική βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία.

1. The Rise of the Superconductors, P.J.Ford, G.A.Saunders, CRC Press.
2. Room Temperature Superconductivity, Andrei Marouchkine, Cambridge International Science Publishing.
3. High-temperature superconducting compound YBa₂Cu₃Se₇ with T_c = 371 K, V. D. Shabetnik, S. Yu. Butuzov, and V. I. Plaksii, *Technical Physics Letters* 21 (5): 382-384.
4. Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Δ. Παντελής, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996.
5. Μαγνητικά και Υπεραγώγιμα Υλικά, Ευάγγελος Χριστοφόρου, ΕΜΠ, 2007.
6. Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Ιωάννης Χρυσουλάκης, Δημήτρης Παντελής, εκδόσεις Παπασωτηρίου.
7. The origin of the anomalous superconducting properties of MgB₂, Hyoung Joon Choi, David Roundy, Hong Sun, Marvin L. Cohen & Steven G. Louie, *Letters to Nature*.
8. Influences of heat treatment and doping on microstructure and superconducting properties of MgB₂ superconductor, G.Yan, Y.Feng, Y.F.Lu, L.Zhu, W.X.Jing, H.H.Weng
9. Handbook of High Temperature Superconductivity: Theory and Experiment, J.Robert Schrieffer (Editor), James S.Brooks (Associate Editor), Springer.
10. Superconductivity Volume 1: Conventional and Unconventional Superconductors, K.H. Bennemann, J.B. Ketterson, Springer.
11. Synthesis and stoichiometry of MgB₂, D.G. Hinks, J.D. Jorgensen, H. Zheng, S. Short, Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Building 223 9700 S. Cass Avenue, Argonne, IL 60439, USA)
12. Synthesis of nanocrystalline magnesium diboride (MgB₂) metallic superconductor by mechano-chemical reaction and post-annealing, R.A. Varin, Ch. Chiu, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ont., Canada N2L 3G1, *Journal of Alloys and Compounds* 407 (2006) 268–273
13. Influence of MgB₂ powder quality on the transport properties of Cu-sheathed MgB₂ tapes H. Fujii, H. Kumakura, H. Togano, Materials Engineering laboratory, National Institute for Materials Science, 1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan, *Physica C* 2001.
14. http://en.wikipedia.org/wiki/Eugene_Podkletnov

15. Superconductivity of MgB₂ wires, T.R.Yang, G.Ilonca, A.V.Pop, R.Stiufiuc, O.Fordui, PhysicaC, 388-389, (2003), 125-126.
16. Critical Currents and Vortex dynamics in superconducting MgB₂, Y.Bugoslavsky, G.K.Perkins, X.Qi, L.F.Cohen, A.D.Caplin, Nature, accepted for publication on 19/2/01
17. Κατεργασίες Ι ,Δ. Μανωλάκος, ΕΜΠ.
18. Drozda Tom, Wick Charles, Bakerjian Ramon, Veilleux Raymond F., Petro Louis, *Tool and manufacturing engineers handbook*, SME, ISBN 0872631354.
19. Joseph Bramah. (2009). In *Encyclopædia Britannica*. Retrieved August 21, 2009, from Encyclopædia Britannica Online: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/77465/Joseph-Bramah>
20. Διέλαση Διμεταλλικών και πορώδων υλικών, Σπυριδών Ράπτης, ΕΜΠ, Αθήνα 2002.
21. Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών :Μη-συμβατικές κατεργασίες, Α.Μάμαλης, εκδόσεις Άνωση, Αθήνα 2000.
22. Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών :Μεταλλικά τεχνικά υλικά, εκδόσεις Άνωση, Α. Μάμαλης
23. X-Ray Diffraction, Peter Moeck, Physical Metallurgy for Engineers, Portland State University.
24. Τεχνικά Υλικά ,Δ. Μανωλάκος, ΕΜΠ.
25. Superconductor technology: Applications to microwave , electro-optics, electrical machines and propulsion systems, Jha, A R (1998), 1st Edition, United States of America, John Wiley & Sons, Inc.
26. Πτυχιακή εργασία, Κρυστρονική και Υπεραγωγιμότητα , Λουκάς Φουσέκης-Ευαγγελίου, ΤΕΙ Αθήνας, 2000.
27. Scientific American
28. Η γοητεία των παράξενων quark, R.Michael Barnett, Henry Muhry, Helen. R.Quinn, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
29. SUPERCONDUCTIVITY AND CRYOGENICS FOR THE LARGE HADRON COLLIDER, Ph. Lebrun, LHC Project Report 441.
30. Rail Gun. (2009). In *Wikipedia*. Retrieved August 21, 2009, from Wikipedia Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>
31. Gauss Gun. (2009). In *Wikipedia*. Retrieved August 21, 2009, from Wikipedia Online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun>.
32. http://science.nasa.gov/headlines/y2003/05feb_superconductor.htm
33. <http://superconductors.org/emp-bomb.htm>