



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ, ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΕΡΙΩΝ (TUNGSTEN
INERT GAS, T.I.G..)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΖΩΗΣ ΠΕΤΡΑΚΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΟΥ Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

Πρόλογος	5
Prologue	6
Ευχαριστίες – Υπογραφές Εξεταστικής Επιτροπής	8
Εισαγωγή	9
Ορισμός και Σκοπός των Μεθόδων ΜΚΕ	9
Εφαρμογές των Μεθόδων ΜΚΕ	10
Οι Μέθοδοι ΜΚΕ	10
Αξιοπιστία και Στατιστική των Μεθόδων ΜΚΕ	12
Μαγνητικές Μέθοδοι: Έλεγχος Θορύβου Barkhausen	12
Θεωρητικό Μέρος	13
I) Α. Μαγνητισμός	13
1. Μαγνητική διπολική ροπή	13
2. Ατομικές μαγνητικές ροπές	14
3. Διάνυσμα μαγνήτισης M	16
4. Πεδίο μαγνήτισης ή ένταση μαγνητικού πεδίου H	19
5. Μαγνητική διαπερατότητα και μαγνητική επιδεκτικότητα	20
B. Σιδηρομαγνητισμός	21
Γ. Η προέλευση του σιδηρομαγνητισμού και η αλληλεπίδραση ανταλλαγής	22
Δ. Μαγνήτιση, απομαγνήτιση και τα φαινόμενα που προκύπτουν	25
1. Μαγνητικές περιοχές	25
2. Τοιχώματα περιοχών	28
3. Κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων	29
4. Εξάρτηση του M από το H - φαινόμενο Barkhausen και βρόχος υστέρησης	31
E. Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά	36
1. Γενικά	36
2. Μαλακά μαγνητικά υλικά: mild steel, αποτελούμενες φάσεις, χαρακτηριστικά και εφαρμογές	37
II) Α. Ηλεκτρικός Χάλυβας	41
1. Μεταλλουργικά Στοιχεία	41
2. Προσανατολισμός Κόκκων	43
3. Μαγνητικές Ιδιότητες Ηλεκτρικών Χαλύβων	46
III) Α. Συγκολλήσεις	48
B. Συγκολλήσεις με τήξη	48
1. Κατηγορίες	48
2. Γενικά χαρακτηριστικά συγκολλήσεων υψηλής θερμοκρασίας	50
3. Συγκόλληση τόξου – Γενικά χαρακτηριστικά	51
4. Το ηλεκτρικό τόξο	53
5. Συγκόλληση με αδρανές αέριο και μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο - TIG	55
6. Πεδίο εφαρμογής και ιδιαιτερότητες της TIG: Συγκόλληση χαλύβων	57

IV) Φαινόμενα κατά τη συγκόλληση	58
A. Θερμικά Φαινόμενα	58
1. Θερμικός κύκλος συγκόλλησης	58
B. Μεταλλουργικά φαινόμενα	61
1. Ζώνη Συγκόλλησης	61
2. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη ενός ανθρακούχου χάλυβα	63
3. Η θερμική επηρεασμένη ζώνη ελαφρά κραματωμένου χάλυβα	65
4. Παραμένουσες Τάσεις και παραμορφώσεις	67
Πειραματικό Μέρος	71
A. Δείγματα και μεταλλογραφική προετοιμασία	71
1. 1. Δοκίμια: Υλικό, filler, μέθοδος συγκόλλησης και οι πειραματικές διαδικασίες συνοπτικά	71
2. Εγκιβωτισμός	72
3. Λείανση	73
4. Στίλβωση	73
5. Χημική προσβολή	74
B. Πειραματικές διατάξεις	75
1. Διάταξη μέτρησης Barkhausen noise	75
2. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) Αρχή Λειτουργίας	76
3. Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο	80
Γ. Αποτελέσματα πειραματικών διαδικασιών – Σχολιασμός	81
1. Αποτελέσματα μέτρησης Barkhausen noise	81
2. Παρατηρήσεις	87
3. Αποτελέσματα παρατήρησης ενδεικτικών δοκιμών στο SEM – Στοιχειακές αναλύσεις - Σχολιασμός	90
4. Παρατηρήσεις	109
Δ. Σχόλια - Συμπεράσματα	110
Παράρτημα	113
Βιβλιογραφία	227
Βιογραφικό (CV)	228

Πρόλογος:

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσω αρχικά τη θεωρία του μαγνητισμού, πού ακριβώς οφείλεται, τι φαινόμενα λαμβάνουν χώρα κλπ, προκειμένου στη συνέχεια να αναπτύξω το φαινόμενο του θορύβου Barkhausen, καθώς κυρίως πάνω σε αυτό βασίζεται μια μαγνητική μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου μαγνητικών (φερρομαγνητικών) υλικών, την οποία αξιοποιώ στην παρούσα εργασία, προκειμένου να εξετάσω δοκίμια ηλεκτρικού φερριτικού χάλυβα τα οποία συγκολλήθηκαν με την μέθοδο ηλεκτρικού τόξου TIG, με απώτερο σκοπό να αποδείξω τη ύπαρξη μονοτονικής συσχέτισης μεταξύ του σήματος Barkhausen noise και των μαγνητικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου εξεταζόμενου υλικού αφού υπέστη συγκόλληση, με ότι αυτό συνεπάγεται, και της μικροδομής των επιμέρους ζωνών που προκύπτουν (ζώνη τήξης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη, μέταλλο βάσης).

Πιο συγκεκριμένα, εξετάσαμε 8 ελάσματα του ίδιου ελαφρά κραματωμένου ηλεκτρικού χάλυβα, τα οποία συγκολλήθηκαν μεν με τη χρήση της ίδιας μεθόδου, υπό διαφορετικές παραμέτρους δε (ένταση ρεύματος, χρήση ή μη μετάλλου προσθήκης). Ελήφθησαν μετρήσεις θορύβου Barkhausen με τη χρήση διάταξης σημειακής μέτρησης τόσο στα ελάσματα ως είχαν, αμέσως μετά το πέρας της συγκόλλησης χωρίς οποιαδήποτε άλλη κατεργασία να προηγείται, τόσο και μετά από επιφανειακό καθαρισμό και εξομόλυνση της επιφάνειας. Και στις δύο φάσεις οι μετρήσεις συσχετίστηκαν με τις θέσεις πάνω στην επιφάνεια των ελασμάτων που λήφθηκαν, ώστε στη συνέχεια να εξαχθούν συμπεράσματα και τυχόν συσχετίσεις μεταξύ των διαφοροποιήσεων του σήματος, τον αριθμό περιστροφών μαγνητικών περιοχών και της ποιοτικής ένδειξης μαγνητικής διαπερατότητας (ιδιότητες που παίζουν σημαντικό ρόλο, ειδικά στον ηλεκτρικό χάλυβα) σε σχέση με τις προκύπτουσες από τη συγκόλληση ζώνες. Σε τελική φάση, ελήφθησαν δειγματοληπτικά μερικά αντιπροσωπευτικά δοκίμια τα οποία παρατηρήθηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), όπου δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη μικροδομή και τις διαφοροποιήσεις στο μέγεθος κόκκων κλπ των επιμέρους ζωνών.

Στο πέρας των πειραματικών διεργασιών εξάχθηκαν μερικά ενδιαφέροντα συμπεράσματα, όπως ότι η συγκόλληση TIG, ειδικά σε τόσο λεπτά ελάσματα ηλεκτρικού χάλυβα, ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που τροφοδοτείται, μπορούν να επηρεαστούν δυσμενώς, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, οι βασικές μαγνητικές ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα, καθώς και ότι υφίσταται άμεση συσχέτιση μεταξύ των αποκρίσεων στις μετρήσεις θορύβου Barkhausen με την μικροδομή της εκάστοτε ζώνης. Συνοπτικά, παρατηρήθηκε ότι σε γενικές γραμμές η συγκόλληση και η παρεχόμενη από αυτή θερμότητα δύναται να προκαλέσει μεταβολές στη μορφή της μικροδομής (μεγέθυνση των κόκκων στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δημιουργία δενδριτών στη ζώνη τήξης), καθώς και μικροδιαφορισμούς σε σημεία εντός ή κοντά στα όρια των κόκκων, λόγω μεγάλων και ταχέων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας που λαμβάνουν χώρα τόσο κατά τη συγκόλληση όσο και στην ψύξη που ακολουθεί, καθιστώντας την πλήρη διάχυση δύσκολη, ή ακόμα και ανέφικτη. Όλα τα παραπάνω ουσιαστικά επηρεάζουν τις τελικές μαγνητικές ιδιότητες του συγκολλημένου ελάσματος, ιδιότητες που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο υλικό και οφείλουν να πληρούν αυστηρές προϋποθέσεις στη βιομηχανία.

Prologue:

In this essay for the master degree of my studies I unfold the basics considering magnetism, the mechanisms behind it, its properties, the phenomena that occur during the magnetization of a magnetic material, so I may specifically unfold the phenomenon of the Barkhausen noise, which is the basic parameter in which a significant magnetic non-destructive testing (NDT) is based on. I refer to this, as it is the method I made use of, in order to examine specimens of a certain metallic material (electrical steel), that were subjected to the welding method TIG. My goal is to prove the existence of a relation between the Barkhausen noise we receive, when we magnetize the specimens by applying a magnetic field with monitored parameters, and the magnetic properties of the material in all the zones that were created after the welding took place (fusion zone, heat affected zone and base metal), the micro-structure, the average grain size in every zone and the differentiations that occur near the grain boundaries and the inner of the grains, because of the fast and extreme fluctuations of the temperature, during the welding and during the cooling after it.

More specifically, we examined 8 specimens of the same material / alloy, each one was welded under different circumstances (different amperage), plus in some of them filler metal was added and in some others not. Then we measured the signal of the Barkhausen noise using a certain layout on particular points on the surface of the plates and depicted the measurements on graphs, with the position of the points the measurements were taken from on the xx' axis and the other Barkhausen noise's parameters on the yy' axis, so the direct relation between them becomes clear. This procedure took place right after the end of the welding procedure, and a second time, in order to confirm the first measurements, after cleaning the surface of the welded lamina with grinding e.t.c. We depicted all the measurements, before the and after the grinding, in relation with the point of measuring, in order to find correlations between each zone (fusion, heat affected zone or base metal) and the signal it gives out (movement of magnetic domains, magnetic permeability). In the end, I observed the micro-structure of the welded thin metallic plates with the use of SEM, so I could have a clearer picture of the changes that might have occurred inside of the specimens, like the changes of average grain size in each zone, the differentiations of the composition inside the grains and near the boundaries of them.

After the completion of the above experimental procedures, these conclusions were extracted: that indeed there is a correlation between the range of the amperage, thus the amount of heat applied on the specimen that is welded, and the changes of the grain sizes in each zone, causing in the end changes in the magnetic properties, that are so significant for this specific kind of alloy. The changes are not confined in terms of grain size only. The whole structure changes, like in the fusion zone, where the ferrite turns into dendrites, affecting in their turn the magnetic properties in that certain important zone, and thus influencing the output of the Barkhausen signal on a great scale. Also the composition seems to show some fluctuations, when we compare the composition (% atomic weight) near the boundaries and near the inner centre of the grains, because of the dramatic changes

of the temperature during welding and cooling afterwards, not allowing the atoms of the components (silica, to be more precise) to fully re-position themselves evenly in the structure grid. All the above phenomena cause the so significant properties of the welded electrical steel to change and in this essay we expose the correlation between the structural changes of each zone and the changes in the Barkhausen noise output.

Η παρούσα εργασία έλαβε χώρα στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας των
Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τους:

Μ. Οξενκιουν – Πετροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Γ. Φούρλαρη, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. Χριστοφόρου, Καθηγητή Ε.Μ.Π.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Ορισμός και Σκοπός των Μεθόδων ΜΚΕ:

Ο χάλυβας, και ανάμεσα στα διάφορα προϊόντα αυτού συμπεριλαμβάνεται και ο ηλεκτρικός χάλυβας (electrical steel), είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά, καθώς χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικούς κινητήρες, μετασχηματιστές και λοιπές εφαρμογές όπου απαιτείται συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες, όπως μικρές απώλειες ενέργειας για μαγνητισμό και απομαγνητισμό, όπως και ο περιορισμός στο ελάχιστο δυνατό των εμφανιζόμενων δινορρευμάτων κατά τη λειτουργία αυτών.

Πρόκειται λοιπόν για προϊόν με πολλές εφαρμογές, και μάλιστα σε πολλές συγκολλημένες κατασκευές, γι' αυτό κατανοούμε την ανάγκη ύπαρξης μη καταστροφικών τεχνικών αξιολόγησης των συγκολλημένων αυτών χαλύβδινων κατασκευών, προκειμένου να διαπιστωθεί, με ασφάλεια και αξιοπιστία, τόσο η ύπαρξη κάποιας ατέλειας στο υλικό, όσο και η κατάσταση της μικροδομής στα σημεία συγκόλλησης αυτού, που δύναται να επηρεάζει άμεσα τις μαγνητικές και μηχανικές ιδιότητες της τελικής κατασκευής, και κατ' επέκταση την αποτελεσματικότητα και αντοχή της κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Εξαρτήματα και συγκολλημένες κατασκευές από ηλεκτρικό χάλυβα αποτελούν σημαντικά μέρη σε πλήθος εφαρμογών όπου οφείλουν να πληρούνται οι προαναφερθείσες απαιτήσεις όσο αφορά τις μαγνητικές ιδιότητες και είναι δυνατό μετά το πέρας της συγκόλλησης και συναρμολόγησης να έχουν υπάρξει μεταβολές στην μικροδομή που μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς τις αρχικές ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό και η ύπαρξη ενός μη καταστροφικού ελέγχου αυτών των μικροδομικών αλλαγών και μαγνητικών ιδιοτήτων στις συγκολλημένες περιοχές είναι, όπως κατανοούμε, επιτακτική.

Αλλά και γενικότερα, οι συγκολλήσεις είναι από τις πιο ευρέως εφαρμοζόμενες και διαδεδομένες μεθόδους ένωσης επιμέρους μεταλλικών μερών, προκειμένου να συναρμολογηθούν γερές, αξιόπιστες και λειτουργικές κατασκευές χωρίς ιδιαίτερες απώλειες πολύτιμου υλικού, χωρίς μεγάλη άσκηση τάσεων, όπως γίνεται με τις ηλώσεις ή λοιπές μηχανικές πακτώσεις, και φυσικά όταν απαιτείται υψηλή παραγωγικότητα, συνάφεια και στεγανότητα στις ενώσεις και καλές τελικές μαγνητικές και μηχανικές ιδιότητες και αντοχές. Σε όλες τις περιπτώσεις των συγκολλήσεων απαιτείται μιας μορφής μη καταστροφικού ελέγχου των ραφών, για την ύπαρξη ατελειών ή σημαντικών αλλαγών στη μικροδομή της συγκολλημένης περιοχής, το βαθμό συνάφειας της ένωσης, καθώς και αν διαθέτουν τις ιδιότητες που οφείλουν να έχουν, ώστε να καθίσταται η τελική κατασκευή λειτουργική, ασφαλής και οικονομική.

Γενικά, μη καταστροφικές δοκιμές (NDT: Non Destructive Testing) ή Μη καταστροφικοί Έλεγχοι (NDI: Non Destructive Inspection), ή μη καταστροφικές αξιολογήσεις (NDE: Non Destructive Evaluation) ονομάζονται οι έλεγχοι που δεν καταστρέφουν το εξεταζόμενο αντικείμενο. Οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής. Ο αντικειμενικός μας σκοπός είναι να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα των ΜΚΕ με τη

θεωρία της Θραυστομηχανικής ώστε να προβλέψουμε την επέκταση τυχών ρωγμών ή μεταβολών της μικροδομής και να υπολογίσουμε τον κίνδυνο αστοχίας του υλικού. Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι θα χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος των ελαττωμάτων σε μια κατασκευή, σημαντικές μεταβολές στις μαγνητικές ιδιότητες και μικροδομή συγκολλημένου ηλεκτρικού χάλυβα στην προκειμένη περίπτωση, χωρίς όμως να τη καταστρέψουν ούτε να επηρεάσουν τη λειτουργικότητάς της. Με την συνδυασμένη χρήση των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) και της θραυστομηχανικής μπορούμε να είμαστε ενήμεροι συνεχώς για την καλή «υγεία» μιας κατασκευής (Health Monitoring) και για το προβλεπόμενο χρόνο ζωής και καλής λειτουργίας της (Residual Lifetime).

Κάθε μέθοδος ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακρίβειας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός καταστροφικού ελέγχου. Όμως οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο καθώς αφήνουν την κατασκευή άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία. Καταστροφικοί και μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο αξιοπιστίας μιας μεθόδου, οπότε τυχαία δείγματα ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβειά της μεθόδου.

Εφαρμογές των Μεθόδων ΜΚΕ:

Πολλές κατασκευές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς μη καταστροφικούς ελέγχους, ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι: ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και στον οπλισμό τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών κλπ. Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

- Στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο).
- Στην αεροδιαστημική (Πλαίσια αεροπλάνων και διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες, τζετ).
- Στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες).
- Στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες)
- Σε εγκαταστάσεις πετροχημικής, πυρηνικής παραγωγής ρεύματος, παραγωγής ρεύματος ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις).
- Στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες).
- Σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς.
- Στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
- Στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα).

Οι Μέθοδοι ΜΚΕ:

Ο ΜΚΕ χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους, κάθε μία από τις οποίες βασίζεται σε συγκεκριμένη επιστημονική παραδοχή ή αρχή λειτουργίας και επίσης μπορεί να διακρίνεται σε περισσότερες από μια τεχνικές. Η αξία κάθε μεθόδου εξαρτάται από

το είδος του προβλήματος. Μια μέθοδος/τεχνική, λόγω φύσεως και της λειτουργίας της, μπορεί να είναι από ιδανική έως και εντελώς άχρηστη για την εφαρμογή που έχουμε υπ' όψιν μας. Για το λόγο αυτό η σωστή επιλογή είναι σημαντική για την τελική απόδοση του ΜΚΕ. Οι κυριότερες κατηγορίες μεθόδων και τεχνικές ΜΚΕ ακολουθούν παρακάτω:

Οπτικές Μέθοδοι

- Οπτικός έλεγχος (Visual Inspection)

- Οπτικός έλεγχος με μικροσκόπιο

- Οπτικός έλεγχος με Βιντεοσκόπηση (Video Inspection)

- Οπτικές μέθοδοι με Laser:

 - Ολογραφία (Holography)

 - Συμβολομετρία (ESP Interferometry)

 - Δυναμικός Έλεγχος Επιφανείας (Dynamic Surface-Inspection)

Ραδιογραφικές μέθοδοι (Radiographic testing) όπως:

- Ακτίνες Χ (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays)

- Ψηφιακή Τομογραφία (Computed Tomography)

- Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια) (Neutron Radiography)

Μέθοδοι Υπερήχων (Ultrasonic inspection)

- Τεχνικές Ανάκλασης

- Τεχνικές Περίθλασης (Time of Flight Diffraction ultrasonics – TOFD)

- Συστοιχίες Φάσης Υπερήχων (Phased Array ultrasonics)

- Περιστρεφόμενα συστήματα (Internal Rotary Inspection System - IRIS)

Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant Flaw testing)

Μέθοδοι Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission, AE) – (φάσμα υπερήχων)

Μέθοδος Θερμικών Εκπομπών (Thermal Emission)

Ηλεκτρικές μέθοδοι

- Ρεύματα Eddy (Eddy-Current & Remote field testing - RFT)

- Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop)

Μαγνητικές μέθοδοι

- Έλεγχος Μαγνητικό Μελάνι/Σκόνη (Magnetic Ink/Powder)

- Έλεγχος με Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particles)

- Μαγνητογραφία (Magnetography)

- Απώλεια Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL)

- Έλεγχος θορύβου Barkhausen.

Μηχανικοί Έλεγχοι

- Μέθοδος Ακουστικής Πρόσκρουσης (Acoustic-Impact) – (ηχητικό φάσμα)

- Θερμογραφικός Έλεγχος (Thermographic inspection) (υπέρυθροι έλεγχοι)

- Μέθοδοι Μηχανικής Αντίστασης (Mechanical Impedance)

- Έλεγχοι Ταλαντώσεων (Vibration Monitoring)

Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection & testing)

Μικροκυματικές μέθοδοι (Microwave)

Αξιοπιστία και Στατιστική των Μεθόδων ΜΚΕ:

Η αξιοπιστία κάθε μεθόδου ΜΚΕ εξαρτάται από τις πιθανότητες σωστής ή λάθος διάγνωσης που έχει η μέθοδος. Κάθε εξεταζόμενο εξαρτάται μπορεί να έχει πραγματικά ελαττώματα (Ναι) ή να είναι χωρίς ελαττώματα (Όχι). Όλες οι δυνατές περιπτώσεις που προκύπτουν από τον συνδυασμό των παραπάνω απαντήσεων είναι τέσσερις. Συγκεκριμένα έχουμε: μπορεί να έχει πραγματικά

1. Σωστή Κατάφαση: Είναι ελαττωματικό (N) και ο ΜΚΕ το θεωρεί (N).
2. Λάθος Κατάφαση: Δεν είναι ελαττωματικό (O) αλλά ο ΜΚΕ το θεωρεί (N).
3. Λάθος Άρνηση: Είναι ελαττωματικό (N) αλλά ο ΜΚΕ δεν το θεωρεί (O).
4. Σωστή Άρνηση: Δεν είναι ελαττωματικό (O) και ο ΜΚΕ δεν το θεωρεί (O).

Δύο ποσότητες που χρησιμοποιούνται συχνά είναι η πιθανότητα εντοπισμού και η πιθανότητα λάθος συναγερού κάθε μεθόδου ή τεχνικής. Η πιθανότητα εντοπισμού αντιστοιχεί στη πιθανότητα να είναι πραγματικά ελαττωματικό υπό τη συνθήκη η μέθοδος μας δίνει είτε σωστή κατάφαση (OR) ή λάθος κατάφαση. Η πιθανότητα λάθους συναγερού αντιστοιχεί στη πιθανότητα να μην είναι ελαττωματικό υπό τη συνθήκη ότι η μέθοδος μας δίνει είτε λάθος κατάφαση (OR, 1st) σωστή άρνηση.

Μαγνητικές Μέθοδοι: Έλεγχος Θορύβου Barkhasuen:

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών ή αλλαγών στην μικροδομή του υλικού. Όταν ένα δοκίμιο μαγνητιστεί και περιέχει μια ασυνέχεια στην επιφάνειά του ή κάτω από αυτήν, ή η δομή έχει μεταβληθεί σημαντικά από άποψη μέσο μέγεθος κόκκου, σύσταση ή έχουν προκύψει μετασχηματισμοί φάσεων, δημιουργείται μια παραμόρφωση στη μαγνητική ροή η οποία προκαλεί ένα τοπικό πεδίο απώλειας μαγνητικής ροής. Οι μέθοδοι βασίζονται στους νόμους του Maxwell (1873) και χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και πολύ ισχυρούς υπολογιστές. Οι μαγνητικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που μαγνητίζονται.

Οι ατέλειες στη κρυσταλλική δομή ενός υλικού, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μηχανικές ιδιότητές τους, είναι οι ίδιες που επηρεάζουν και τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Η μεταξύ τους σχέση δεν έχει γίνει ακόμα πλήρως κατανοητή αλλά διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και των βημάτων Barkhausen παρέχουν πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες. Ο μαγνητισμός των υλικών συμβαίνει με μια σειρά μικρών βημάτων από τον ένα κόκκο στον άλλο. Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα μεγάφωνο, τα βήματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν έναν θόρυβο (ένα ανάλογο φαινόμενο είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή). Ο θόρυβος Barkhausen είναι ευαίσθητος στη παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικροατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους.

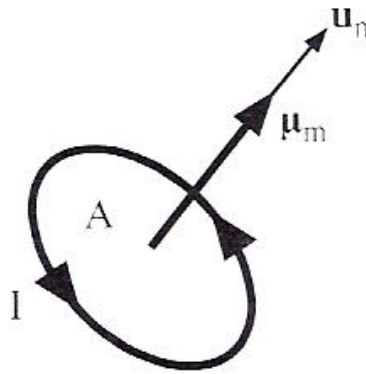
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ:

1) Α. Μαγνητισμός:

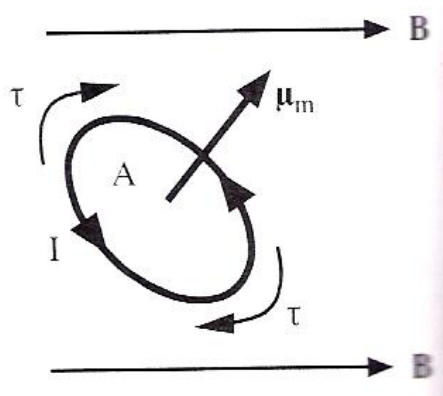
1. Μαγνητική διπολική ροπή:

Για την εξήγηση των μαγνητικών ιδιοτήτων των υλικών θα χρησιμοποιήσουμε έννοιες που στηρίζονται στην έννοια της μαγνητικής διπολικής ροπής. Έστω ένας βρόχος ρεύματος σαν αυτός της εικόνας 1.1. Ενδεχομένως να πρόκειται για ένα πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα I . Για λόγους απλότητας θα υποθέσουμε ότι ο βρόχος του ρεύματος βρίσκεται σε ένα επίπεδο. Η επιφάνεια που ορίζεται από το ρεύμα είναι A . Έστω u_n το μοναδιαίο διάνυσμα που εξέρχεται από την επιφάνεια αυτή. Η φορά του διανύσματος αυτού είναι τέτοια ώστε, όταν κοιτάζουμε προς την ίδια φορά, το ρεύμα να έχει γύρω μας τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Τότε η μαγνητική διπολική ροπή ή απλά μαγνητική ροπή μ_m ορίζεται από τη σχέση:

$$\mu_m = I A u_n \quad (1) \quad [1]$$



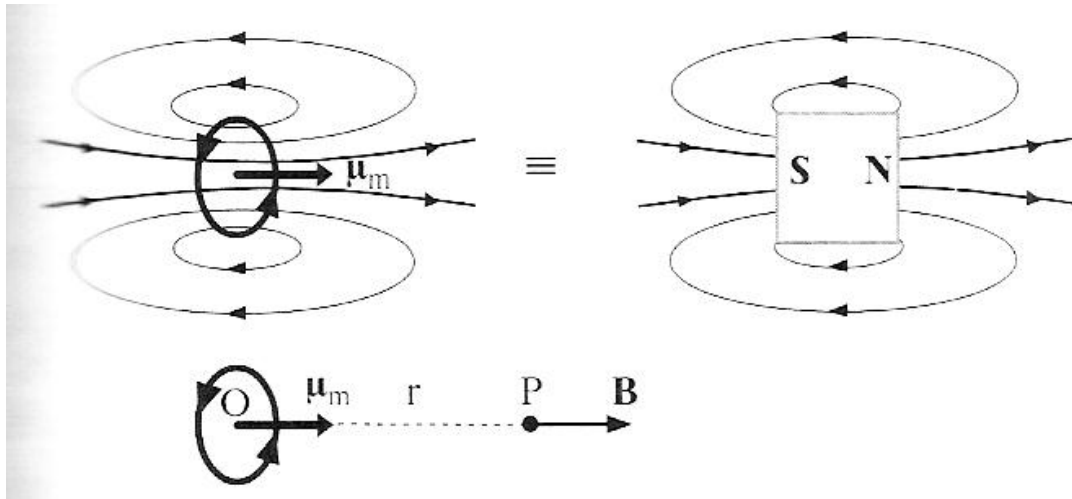
Εικόνα 1.1: Ορισμός της μαγνητικής ροπής.



Εικόνα 1.2: Όταν μια μαγνητική διπολική ροπή βρεθεί εντός πεδίου, τότε αναπτύσσεται μια μηχανική ροπή.[1]

Όταν μια μαγνητική ροπή βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε επενεργεί σε αυτήν την ροπή, η οποία τείνει να την περιστρέψει και να ευθυγραμμίσει τον άξονά της με το μαγνητικό πεδίο (εικόνα 1.2). Επιπλέον, αφού η

μαγνητική ροπή είναι ένας βρόχος ρεύματος, δημιουργείται γύρω της ένα μαγνητικό πεδίο B (εικόνα 1.3), το οποίο είναι όμοιο με το πεδίο που δημιουργείται γύρω από μια μαγνητική ράβδο. Μπορούμε, από το ρεύμα I και τη γεωμετρία του, να υπολογίσουμε το μαγνητικό πεδίο B (η ανάλυση μπορεί να βρεθεί σε πολλά εγχειρίδια φυσικής). Για παράδειγμα, το πεδίο B σε ένα σημείο P που βρίσκεται σε απόσταση r από τον άξονα του πηνίου και στο κέντρο αυτού (εικόνα 1.3) είναι ευθέως ανάλογο της μαγνητικής ροπής αλλά και αντιστρόφως ανάλογο στην Τρίτη δύναμη της απόστασης (r^3), ισχύει δηλαδή $B \propto \mu_m/r^3$.

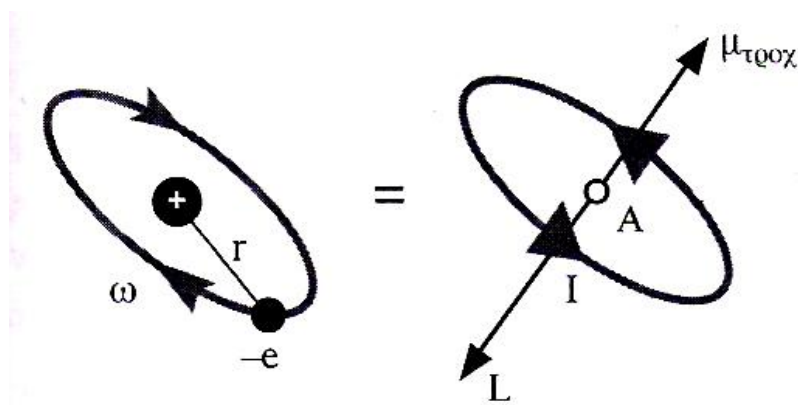


Εικόνα 1.3: Ένα μαγνητικό δίπολο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, ακριβώς όπως και ένας ραβδόμορφος μαγνήτης. Το πεδίο B εξαρτάται από τη μ_m .

2. Ατομικές μαγνητικές ροπές:

Ένα ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται σε ένα άτομο συμπεριφέρεται σαν ένας βρόχος ρεύματος και έχει μαγνητική διπολική ροπή, η οποία ονομάζεται τροχιακή μαγνητική ροπή $\mu_{\text{τροχ}}$ (orbital magnetic moment) (εικόνα 2.1). Αν ω η γωνιακή συχνότητα του ηλεκτρονίου, τότε το ρεύμα I που αντιστοιχεί στο περιστρεφόμενο ηλεκτρόνιο

είναι:
 $I = \text{Φορτίο που ρέει ανά μονάδα χρόνου} = -e/\text{περίοδος} = -(e\omega)/(2\pi)$



Εικόνα 2.1: Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε τροχιά είναι ισοδύναμο με μια μαγνητική διπολική ροπή $\mu_{\text{τροχ}}$.

Αν r η ακτίνα της τροχιάς, τότε η μαγνητική διπολική ροπή είναι:

$$\mu_{\text{τροχ}} = I(\pi r^2) = -(e\omega r^2)/2$$

Αλλά αν η ταχύτητα v του ηλεκτρονίου είναι ωr και η τροχιακή του στροφορμή είναι:

$$L = (m_e v)r = m_e \omega r^2$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση αυτή στη $\mu_{\text{τροχ}}$, λαμβάνουμε:

$$\mu_{\text{τροχ}} = -(eL)/(2m_e) \quad (2)$$

Βλέπουμε ότι η μαγνητική ροπή είναι ανάλογη της τροχιακής στροφορμής και ότι τα δύο μεγέθη συνδέονται με έναν παράγοντα που περιλαμβάνει το λόγο μάζας προς το φορτίο του ηλεκτρονίου. Ο αριθμητικός παράγοντας που συσχετίζει την τροχιακή στροφορμή με τη μαγνητική ροπή είναι στην περίπτωση αυτή $e/(2m_e)$ και ονομάζεται γυρομαγνητικός λόγος. Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση (2) υποδεικνύει ότι η τροχιακή μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου έχει αντίθετη φορά από την L . Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο αρνητικό φορτίο του ηλεκτρονίου.

Το ηλεκτρόνιο έχει επίσης και μια εσωτερική στροφορμή S , που αντιστοιχεί στο spin του. Στο spin του ηλεκτρονίου οφείλεται η ύπαρξη της μαγνητικής ροπής spin, η οποία συμβολίζεται μ_{spin} . Η σχέση που συνδέει τη μαγνητική αυτή ροπή με την S δεν είναι η ίδια με την εξίσωση (2). Ο γυρομαγνητικός λόγος είναι στην περίπτωση αυτή διπλάσιος από ότι προηγουμένως:

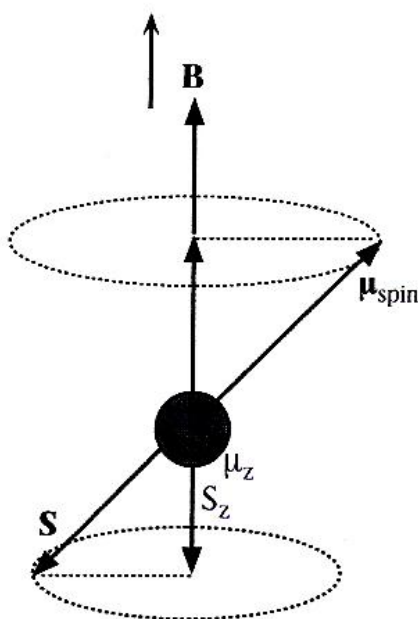
$$\mu_{\text{spin}} = -(eS)/m_e \quad (3)$$

Η συνολική μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου απαρτίζεται από τη $\mu_{\text{τροχ}}$ και τη μ_{spin} , προστιθέμενες με τον κατάλληλο τρόπο. Δεν μπορούμε να πάρουμε απλά το άθροισμα των δύο μαγνητικών ροπών, αφού είναι αμφότερες διανυσματικές ποσότητες. Επιπλέον, η συνολική μαγνητική ροπή $\mu_{\text{ατόμου}}$ του ατόμου εξαρτάται από την τροχιακή κίνηση και τα spin όλων των ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια όμως που βρίσκονται στις συμπληρωμένες υποστιβάδες δεν συνεισφέρουν στη συνολική μαγνητική ροπή. Αυτό οφείλεται στο ότι, για κάθε ηλεκτρόνιο με κάθε L (ή S), υπάρχει ένα άλλο ηλεκτρόνιο με αντίθετο L (ή S). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι το διάνυσμα L είναι χωροκβαντισμένο μέσω του m_l (μαγνητικός κβαντικός αριθμός, προκαλεί τον κβαντισμό της συνιστώσας της τροχιακής στροφορμής που είναι παράλληλη με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο) και σε μια συμπληρωμένη υποστιβάδα όλες οι αρνητικές και οι θετικές τιμές του m_l είναι κατειλημμένες. Παρομοίως, το πλήθος των ηλεκτρονίων που έχουν spin πάνω ισούται με το πλήθος των ηλεκτρονίων που έχουν spin κάτω. Έτσι σε μια συμπληρωμένη υποστιβάδα, το συνολικό ηλεκτρονικό spin είναι μηδέν και δεν υπάρχει καθόλου μαγνητική ροπή spin του ηλεκτρονίου. Επομένως, μόνο οι μη συμπληρωμένες υποστιβάδες συνεισφέρουν στη συνολική μαγνητική ροπή ενός ατόμου.

Έστω ένα άτομο, το οποίο, εκτός από τις συμπληρωμένες εσωτερικές υποστιβάδες, έχει και ένα ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται σε ένα s τροχιακό ($l=0$). (αριθμός γωνιακής στροφορμής). Αυτό σημαίνει ότι η τροχιακή μαγνητική ροπή

είναι μηδέν και ότι η μαγνητική ροπή του ατόμου οφείλεται στο spin του ηλεκτρονίου και μόνο, $\mu_{\text{ατόμου}} = \mu_{\text{spin}}$. Παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στη διεύθυνση z, η μαγνητική ροπή δεν μπορεί απλά να περιστραφεί και να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο, επειδή η spin στροφορμή πρέπει στην κβαντομηχανική να είναι χωροκβαντισμένη. Θα πρέπει δηλαδή η S_z (η συνιστώσα της S στον άξονα z) να είναι $m_s \hbar$, όπου $m_s = \pm 1/2$ είναι ο μαγνητικός κβαντικός αριθμός του spin. Η ροπή που επενεργεί στο περιστρεφόμενο (ιδιοπεριστροφή) ηλεκτρόνιο, προκαλεί τη μετάπτωση του άξονα του μαγνητικού spin γύρω από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (εικόνα 2.2). Η μετάπτωση είναι τέτοια ώστε $S_z = -1/2 \hbar$ και δημιουργεί μια μέση μαγνητική ροπή μ_z παράλληλα με το πεδίο, η οποία δίνεται από την εξίσωση (3) με S_z στη θέση του S:

$$\mu_z = -(eS_z)/m_e = -(em_s \hbar)/m_e = (e\hbar)/(2m_e) = \beta \quad (4)$$



Εικόνα 2.2: Η μαγνητική ροπή spin περιστρέφεται (μετάπτωση γύρω από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που είναι παράλληλο στον άξονα z και έχει μια μ_z παράλληλη με τον άξονα z.

Η ποσότητα β ονομάζεται μαγνητόνη του Bohr και η τιμή της είναι $9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ ή JT^{-1} .

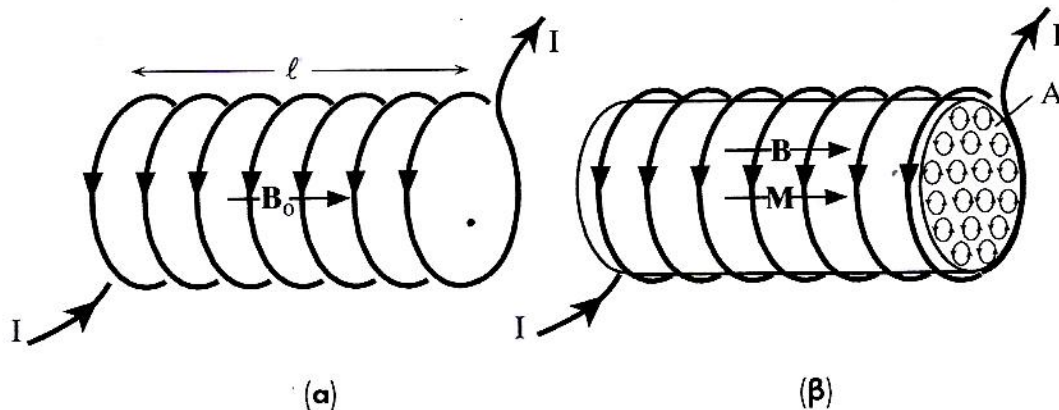
Επομένως το spin ενός και μόνο ηλεκτρονίου έχει μαγνητική ροπή παράλληλα με το πεδίο μια μαγνητόνη του Bohr.

3. Διάνυσμα μαγνήτισης M:

Έστω ένα σωληνοειδές πηνίο, ιδανικά απείρου μήκους, εντός του οποίου υπάρχει αέρας (ή κενό) (εικόνα 3.1, α). Το μαγνητικό πεδίο εντός του πηνίου είναι B_0 , όπου ο δείκτης 0 αναφέρεται στο γεγονός ότι το πεδίο είναι στο κενό. Το πεδίο εξαρτάται από το ρεύμα I του πηνίου και από τον αριθμό των περιελίξεων n ανά μονάδα μήκους. Το πεδίο θα είναι:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 I' \quad (5)$$

όπου I' είναι το ρεύμα ανά μονάδα μήκους του πηνίου, δηλαδή $I' = nI$, και μ_0 η απόλυτη διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου σε Henry ανά μέτρο, Hm^{-1} .



Εικόνα 3.1: α) Έστω ένα μακρύ σωληνοειδές πηνίο. Αν το μέσο εντός του πηνίου είναι κενό, τότε το μαγνητικό πεδίο είναι B_0 . β) Αν εισάγουμε ένα υλικό εντός του σωληνοειδούς, τότε δημιουργείται μαγνήτιση M .

Αν εντός του πηνίου τοποθετήσουμε ένα κυλινδρικό υλικό μέσο (εικόνα 3.1, β), τότε βλέπουμε ότι το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται. Το νέο μαγνητικό πεδίο παρουσία του υλικού μέσου συμβολίζεται B και καλείται μαγνητική επαγωγή. Θα θεωρήσουμε ότι B_0 είναι το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο εντός του οποίου τοποθετείται το υλικό μέσο.

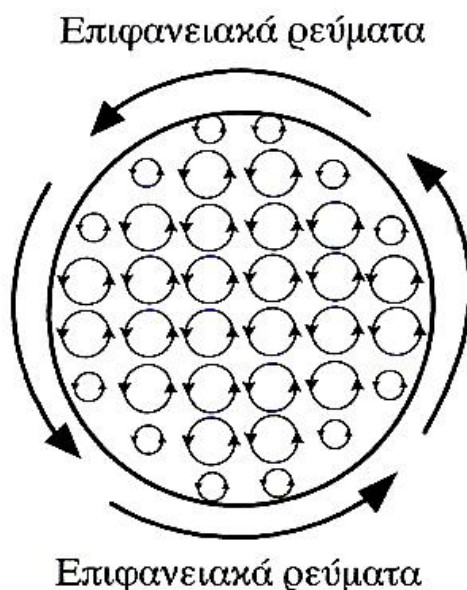
Κάθε άτομο του υλικού μέσου αντιδρά στο εφαρμοζόμενο πεδίο και αναπτύσσει, ή αποκτά, μια μαγνητική ροπή μ_m παράλληλα με το εφαρμοζόμενο πεδίο. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κάθε μαγνητική ροπή μ_m είναι το αποτέλεσμα της μετάπτωσης της ατομικής μαγνητικής ροπής γύρω από το B_0 . Επομένως, το υλικό μέσο αναπτύσσει μια συνολική μαγνητική ροπή παράλληλα με το πεδίο και μαγνητίζεται. Το διάνυσμα της μαγνήτισης M περιγράφει την ένταση της μαγνήτισης του μέσου. Το M ορίζεται ως η μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου. Έστω ότι στον πολύ μικρό όγκο ΔV υπάρχουν N άτομα και ότι κάθε άτομο i έχει μαγνητική ροπή μ_{mi} (όπου $i = 1$ μέχρι N). Τότε το M ορίζεται με τον τρόπο:

$$M = (1/\Delta V)\Sigma\mu_{mi} = n_{at}\mu_{av} \quad (6)$$

όπου n_{at} είναι το πλήθος των ατόμων ανά μονάδα όγκου και $\mu_{μέση} (= \mu_{av})$ η μέση μαγνητική ροπή ανά άτομο. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι κάθε άτομο αποκτά μαγνητική ροπή $\mu_{μέση}$ παράλληλη προς το B_0 . Κάθε μία από τις μαγνητικές αυτές ροπές που είναι παράλληλες με το B_0 μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας στοιχειώδης βρόχος ρεύματος στην ατομική κλίμακα, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 3.1, β. Οι στοιχειώδεις αυτοί ρευματικοί βρόχοι οφείλονται στα ρεύματα των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό των ατόμων και αντιστοιχούν στην τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων και των spin τους. Το επίπεδο όλων των ρευματικών βρόχων είναι κάθετο στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

Έστω η διατομή του μαγνητισμένου μέσου (εικόνα 3.2). Η φορά του ρεύματος όλων των στοιχειωδών βρόχων ρεύματος στο επίπεδο αυτό, είναι προς την ίδια κατεύθυνση, αφού όλα τα άτομα αποκτούν την ίδια μαγνητική ροπή $\mu_{μέση}$.

Όλοι οι ρευματικοί βρόχοι που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις στο κύριο σώμα του υλικού διαρρέονται από ρεύμα σε αντίθετες κατευθύνσεις και αλληλοαναιρούνται. Επομένως, στο κύριο σώμα του υλικού, δεν υπάρχει συνολικά καθόλου ρεύμα, δηλαδή στο εσωτερικό ρεύμα είναι μηδέν. Τα ρεύματα όμως που βρίσκονται στους ρευματικούς βρόχους της επιφάνειας δεν μπορούν να αλληλοαναιρεθούν. Έτσι δημιουργείται συνολικά ένα επιφανειακό ρεύμα. Τα επιφανειακά ρεύματα επάγονται λόγω της μαγνήτισης του μέσου από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και εξαρτώνται επομένως από τη μαγνήτιση M του δείγματος.



Εικόνα 3.2: Οι στοιχειώδεις βρόχοι ρεύματος έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία επιφανειακών ρευμάτων. Στο εσωτερικό δεν υπάρχει ρεύμα, αφού σε κάθε σημείο το ρεύμα των γειτονικών βρόχων αλληλοαναιρείται.

Εκ του ορισμού της M , η συνολική μαγνητική ροπή του κυλινδρικού δείγματος είναι:

$$\text{Συνολική μαγνητική ροπή} = M (\text{όγκος}) = MAI$$

Υποθέστε ότι το ρεύμα μαγνήτισης στην επιφάνεια ανά μονάδα μήκους του δείγματος είναι I_m . Τότε το συνολικό επιφανειακό ρεύμα που κυκλοφορεί είναι $I_m l$ και η συνολική μαγνητική ροπή του δείγματος θα είναι εξ ορισμού:

$$\text{Συνολική μαγνητική ροπή} = (\text{Συνολικό ρεύμα}) \times (\text{επιφάνεια διατομής}) = I_m l A$$

Εξισώνοντας τις δύο μαγνητικές ροπές βρίσκουμε:

$$M = I_m$$

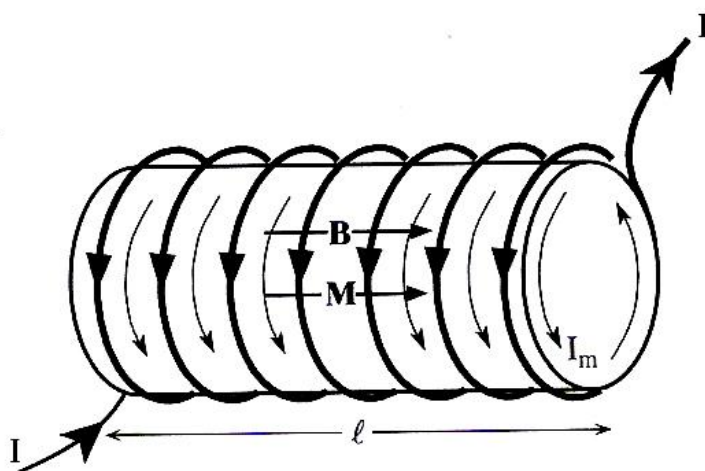
Καταλήξαμε στη σχέση αυτή εξετάζοντας μια συγκεκριμένη γεωμετρία δείγματος. Εξετάσαμε την περίπτωση κυλινδρικού δείγματος, στο οποίο το M είναι παράλληλο με τον άξονα του κυλίνδρου και όπου το I_m ρέει σε ένα επίπεδο κάθετο στο M . Η σχέση όμως είναι γενικότερη και η παραγωγής της υπάρχει σε πιο προχωρημένα εγχειρίδια. Πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι το ρεύμα

μαγνήτισης I_m δεν οφείλεται στη ροή των ελεύθερων φορέων φορτίου, όπως σε ένα χάλκινο σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα, αλλά οφείλεται σε εντοπισμένα ηλεκτρονικά ρεύματα στο εσωτερικό των ατόμων που βρίσκονται στην επιφάνεια του στερεού. Η εξίσωση (7) δηλώνει ότι μπορούμε να αναπαραστήσουμε τη μαγνήτιση ενός μέσου με επιφανειακό ρεύμα I_m ανά μονάδα μήκους, το οποίο ισούται με M .

4. Πεδίο Μαγνήτισης ή ένταση μαγνητικού πεδίου H :

Το μαγνητισμένο δείγμα της εικόνα 3.1, β που είναι τοποθετημένο εντός του σωληνοειδούς πηνίου αναπτύσσει ρεύματα μαγνήτισης στην επιφάνειά του. Συμπεριφέρεται επομένως σαν σωληνοειδές. Μπορούμε τώρα να εξετάσουμε το σωληνοειδές με ένα υλικό μέσο (εικόνα 4.1). Το μαγνητικό πεδίο στο μέσο δεν οφείλεται μόνο στα ρεύματα αγωγιμότητας I' στα καλώδια του σωληνοειδούς ανά μονάδα μήκους, αλλά επίσης και στα επιφανειακά ρεύματα μαγνήτισης I_m . Το μαγνητικό πεδίο B εντός του σωληνοειδούς δίνεται από τη συνήθη έκφραση που ισχύει για σωληνοειδή, στην οποία όμως η ρευματική συνιστώσα αποτελείται από το I' και από το I_m (εικόνα 4.1).

$$B = \mu_0(I' + I_m) = B_0 + \mu_0 M$$



Εικόνα 4.1: Το πεδίο B στο υλικό του σωληνοειδούς οφείλεται στο ρεύμα αγωγιμότητας I που διαρρέει τα καλώδια και στο ρεύμα μαγνήτισης I_m στην επιφάνεια του μαγνητικού μέσου, $B = B_0 + \mu_0 M$.

Η σχέση αυτή ισχύει γενικά και μπορεί να γραφτεί και σε διανυσματική μορφή:

$$B = B_0 + \mu_0 M \quad (8)$$

Το πεδίο σε ένα σημείο εντός του μαγνητισμένου υλικού είναι το άθροισμα του εφαρμοζόμενου πεδίου B_0 συν τη συνεισφορά της μαγνήτισης M του υλικού. Η μαγνήτιση προκύπτει από την εφαρμογή του B_0 λόγω του ρεύματος των ελεύθερων φορέων στα καλώδια του σωληνοειδούς. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα

αγωγιμότητας και μπορούμε να το ρυθμίσουμε εξωτερικά. Είναι τώρα χρήσιμο να εισάγουμε ένα διανυσματικό πεδίο που αναπαριστά την επίδραση του εξωτερικού ρεύματος (ρεύμα αγωγιμότητας) και μόνο. Το μέγεθος $B - \mu_0 M$ σε ένα σημείο ισούται εν γένει με τη συνεισφορά των εξωτερικών ρευμάτων στο μαγνητικό πεδίο στο εν λόγω σημείο εντός του υλικού, το οποίο μαγνητικό πεδίο ονομάζαμε B_0 . Το μέγεθος $B - \mu_0 M$ αναπαριστά το πεδίο μαγνήτισης επειδή είναι το πεδίο που δημιουργείται από τα εξωτερικά ρεύματα που μαγνητίζουν το υλικό. Το πεδίο μαγνήτισης H ορίζεται ως:

$$H = (B - M) / \mu_0 \quad (9)$$

ή

$$H = B_0 / \mu_0 \quad (10)$$

Το πεδίο μαγνήτισης είναι επίσης γνωστό και ως ένταση του μαγνητικού πεδίου και μετράται σε $A m^{-1}$. Ο λόγος για τον οποίο διαιρούμε με το μ_0 είναι ότι το διανυσματικό πεδίο H που προκύπτει σχετίζεται με απλό τρόπο με τα εξωτερικά ρεύματα αγωγιμότητας (μέσω του νόμου το Ampere). Αφού στο σωληνοειδές το B_0 είναι $\mu_0 nI$, το πεδίο μαγνήτισης σε ένα σωληνοειδές θα είναι:

$$H = nI = \text{συνολικό ρεύμα αγωγιμότητας ανά μονάδα μήκους} \quad (10)$$

Είναι εν γένει χρήσιμο να φανταζόμαστε ότι το H είναι η αιτία και το B το αποτέλεσμα. Η αιτία H εξαρτάται μόνο από τα εξωτερικά ρεύματα αγωγιμότητας, ενώ το αποτέλεσμα B εξαρτάται από τη μαγνήτιση M του υλικού.

5. Μαγνητική διαπερατότητα και μαγνητική επιδεκτικότητα:

Υποθέστε ότι στο σημείο P ενός υλικού, το μαγνητικό πεδίο είναι B και το πεδίο μαγνήτισης H . Έστω B_0 το μαγνητικό πεδίο στο P απουσία υλικού μέσου (κενό). Η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου στο P ορίζεται ως το μαγνητικό πεδίο ανά μονάδα πεδίου μαγνήτισης:

$$\mu = B / H \quad (11)$$

Με το μέγεθος αυτό συσχετίζεται το αποτέλεσμα B με την αιτία H σε ένα σημείο P του υλικού μέσου. Με απλούς ποιοτικούς όρους, η μ αναπαριστά το βαθμό στον οποίο ένα μαγνητικό πεδίο διεισδύει σε ένα υλικό μέσο. Η σχετική διαπερατότητα μ_r ενός μέσου είναι το ποσοστό κατά το οποίο αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο όταν εισάγεται ένα υλικό μέσο σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο στο κενό. Έστω, για παράδειγμα, ότι το πεδίο εντός ενός σωληνοειδούς που περικλείει το κενό είναι B_0 , ενώ το πεδίο εντός ενός σωληνοειδούς που περικλείει ένα υλικό μέσο είναι B . Τότε η μ_r ορίζεται ως:

$$\mu_r = B / B_0 = B / (\mu_0 H) \quad (12)$$

Από τις εξισώσεις (11) και (12) βλέπουμε καθαρά ότι:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Η μαγνήτιση M που αποκτά ένα υλικό εξαρτάται από το συνολικό μαγνητικό πεδίο B . Θα ήταν φυσικό να προχωρούσαμε την ανάλυση μας όπως και στα διηλεκτρικά, συσχετίζοντας τη M με το B , κατ' αναλογία με τη συσχέτιση της πόλωσης με το ηλεκτρικό πεδίο. Για ιστορικούς όμως λόγους η M συσχετίζεται με το H , δηλαδή με το πεδίο μαγνήτισης. Υποθέστε ότι το υλικό μέσο είναι ιστροπικό (έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλα τις διευθύνσεις, ένα ιδανικό υλικό). Τότε η μαγνητική επιδεκτικότητα χ_m του υλικού ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M = \chi_m H \quad (13)$$

Η σχέση αυτή δεν ισχύει για όλα τα μαγνητικά υλικά. Όπως θα δούμε στη συνέχεια για τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν ισχύει η σχέση (12). Αφού το μαγνητικό πεδίο είναι $B = \mu_0(H+M)$ θα έχουμε:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + \mu_0 \chi_m H = \mu_0 (1 + \chi_m) H$$

Και

$$M_r = 1 + \chi_m \quad (14)$$

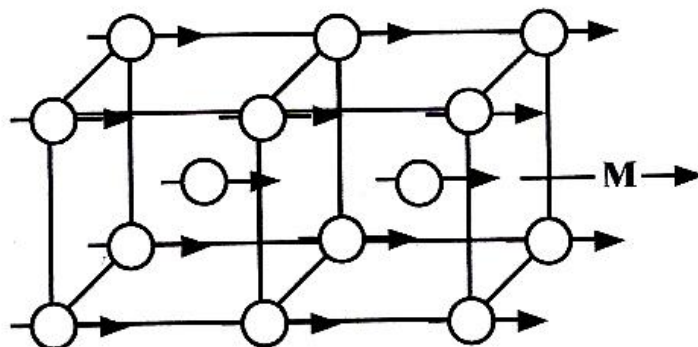
Η παρουσία του μαγνητικού υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω της σχετικής διαπερατότητας μ_r , ή $(1 + \chi_m)$, με την οποία πολλαπλασιάζεται η μ_0 . Μπορούμε εναλλακτικά να αντικαταστήσουμε τη μ_0 με τη $\mu = \mu_0 \mu_r$. Για παράδειγμα, η επαγωγή ενός σωληνοειδούς πηνίου όταν αυτό περικλείει ένα μαγνητικό μέσο αυξάνεται κατά μ_r .

B. Σιδηρομαγνητισμός:

Πρόκειται για μία εκ των 5 κατηγοριών (διαμαγνητικά, παραμαγνητικά, σιδηρομαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά, σιδηριμαγνητικά) στις οποίες κατατάσσονται τα μαγνητικά υλικά και με την οποία θα ασχοληθούμε στην προκειμένη περίπτωση.

Σιδηρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά (π.χ. ο σίδηρος) που έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση ακόμα και απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική επιδεκτικότητά χ_m είναι θετική και μάλιστα πολύ μεγάλη (ακόμα και άπειρη) και επιπλέον εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση M και το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο $\mu_0 H$ είναι εξαιρετικά μη γραμμική. Όταν το πεδίο είναι αρκετά μεγάλο, τότε η μαγνήτιση M του σιδηρομαγνήτη φτάνει στον κόρο (κορεσμό). Η ερμηνεία για το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού στηρίζεται στην κβαντομηχανική αλληλεπίδραση ανταλλαγής (που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια) μεταξύ των ατόμων του υλικού. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί το χωρισμό του υλικού σε περιοχές με μόνιμη μαγνήτιση. Στην εικόνα 1 απεικονίζεται μια μαγνητική περιοχή (magnetic domain) ενός τυπικού σιδηρομαγνητικού υλικού. Η περιοχή, λόγω του παραλληλισμού των μαγνητικών ροπών όλων των ατόμων Fe, έχει συνολικά ένα διάνυσμα μαγνήτισης M . Επειδή όλες οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι παράλληλες μεταξύ τους λέμε ότι η περιοχή αυτή παρουσιάζει μαγνητική τάξη. Το φαινόμενο του

σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie T_C . Για θερμοκρασίες κάτω από αυτήν, ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό (υλικό με θετική αλλά μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα, απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου και λόγω των τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ μορίων οι ροπές τους έχουν τυχαίους προσανατολισμούς και υπό την επίδραση εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές ροπές έχουν διάφορους προσανατολισμούς).



Εικόνα 1: Σε μια μαγνητισμένη περιοχή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, όπως ο σίδηρος, είναι από μόνες τους παράλληλες και έχουν την ίδια φορά. Υπάρχει ένα ισχυρό διάνυσμα μαγνήτισης M ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου.

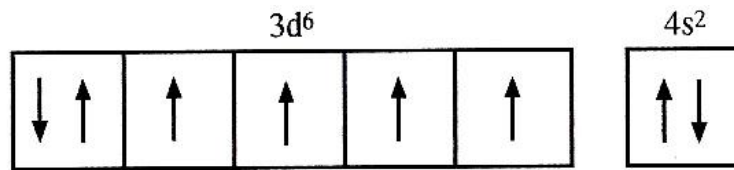
Γ. Η προέλευση του σιδηρομαγνητισμού και η αλληλεπίδραση ανταλλαγής:

Τα μέταλλα μετάβασης (σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο) είναι σιδηρομαγνητικά σε θερμοκρασία δωματίου. Επίσης τα μέταλλα σπάνιων γαιών (Ga, Dy) είναι σιδηρομαγνητικά σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές δωματίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να έχουν μόνιμη μαγνήτιση ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου. Έχουν δηλαδή άπειρη επιδεκτικότητα.

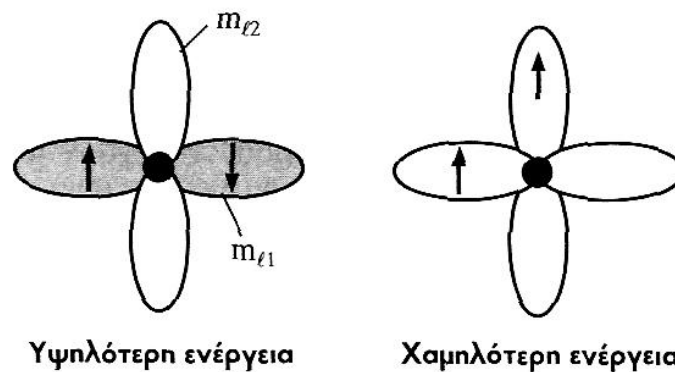
Σε ένα μαγνητισμένο κρύσταλλο σιδήρου, όλες οι ατομικές μαγνητικές ροπές είναι παράλληλες και έχουν την ίδια φορά (εικόνα 1). Στην περίπτωση που απεικονίζεται, όλες οι ροπές είναι παράλληλες προς την κρυσταλλογραφική διεύθυνση [100]. Επομένως, η συνολική μαγνήτιση θα είναι σε αυτήν την διεύθυνση. Θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί ότι ο λόγος για τον οποίο οι ροπές είναι παράλληλες είναι οι μαγνητικές δυνάμεις μεταξύ των ίδιων των ροπών, όπως συμβαίνει αντίστοιχα σε μακροσκοπικό επίπεδο όταν οι ραβδόμορφοι μαγνήτες αποκτούν διάταξη SNSN... Στην πραγματικότητα όμως, δεν είναι αυτή η αιτία που προκαλεί αυτόν τον παραλληλισμό των μαγνητικών ροπών. Η δυναμική ενέργεια της μαγνητικής αλληλεπίδρασης είναι μικρή, μικρότερη ακόμα και από τη θερμική ενέργεια.

Η ηλεκτρονική δομή του ατόμου σιδήρου είναι $[Ar]3d^64s^2$. Σε ένα απομονωμένο άτομο σιδήρου, τέσσερα από τα πέντε τροχιακά της υποστιβάδας 3d είναι μη κατειλημμένα. Λόγω του κανόνα του Hund, τα ηλεκτρόνια τείνουν να ευθυγραμμίσουν τα spin τους κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα πέντε τροχιακά 3d να περιέχουν δύο ζευγαρωμένα και τέσσερα μη ζευγαρωμένα ηλεκτρόνια (εικόνα 2).

Το απομονωμένο άτομο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια με παράλληλα spin και επομένως η spin μαγνητική του ροπή είναι 4β .



Εικόνα 2: Ένα απομονωμένο άτομο Fe έχει τέσσερα μη ζευγαρωμένα spin και η spin μαγνητική του ροπή είναι 4β .



Εικόνα 3: Ο κανόνας του Hund για ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια στηρίζεται στην αλληλεπίδραση ανταλλαγής.

Η προέλευση του κανόνα του Hund (εικόνα 3) έγκειται στο γεγονός ότι, όταν τα spin είναι παράλληλα (όταν τα ηλεκτρόνια έχουν το ίδιο m_s), τότε, λόγω της αρχής του αποκλεισμού του Pauli, τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να καταλαμβάνουν τροχιακά με διαφορετικό m_l , να έχουν δηλαδή διαφορετική κατανομή στο χώρο (το μέγεθος m_l καθορίζει τον προσανατολισμό της τροχιάς).

Η ύπαρξη διαφορετικών τιμών m_l έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια μεταξύ των ηλεκτρονίων λόγω της απώθησης Coulomb να είναι στην περίπτωση αυτή μικρότερη από ότι θα ήταν στην περίπτωση όπου τα ηλεκτρόνια έχουν αντίθετα spin (διαφορετικά m_s) καταλαμβάνοντας το ίδιο τροχιακό (ίδιο m_l) και επομένως την ίδια περιοχή του χώρου. Όπως φαίνεται, μολονότι η ενέργεια αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων δεν έχει σχέση με τις μαγνητικές δυνάμεις, εξαρτάται όμως από τον προσανατολισμό των spin τους (m_s), ή από τις spin μαγνητικές ροπές τους και είναι μικρότερη όταν τα spin είναι παράλληλα. Επομένως, δύο ηλεκτρόνια αποκτούν παράλληλα spin, όχι λόγω μιας απευθείας μαγνητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των spin μαγνητικών ροπών τους, αλλά λόγω της αρχής του αποκλεισμού του Pauli και της ενέργειας της ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης. Τα δύο αυτά δεδομένα συγκροτούν από κοινού την αλληλεπίδραση ανταλλαγής, η οποία εξαναγκάζει δύο ηλεκτρόνια να αποκτούν m_l και m_s τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται η ηλεκτροστατική ενέργεια. Επομένως, σε ένα άτομο η αλληλεπίδραση ανταλλαγής εξαναγκάζει δύο ηλεκτρόνια να αποκτούν το ίδιο m_s αλλά διαφορετικό m_l . Αυτό συμβαίνει λόγω της αρχής του αποκλεισμού του Pauli. Αυτός είναι ο λόγος για τον

οποίο ένα απομονωμένο άτομο Fe έχει στην υποστιβάδα 3d τέσσερα μη ζευγαρωμένα spin.

Στον κρύσταλλο βέβαια, τα εξωτερικά ηλεκτρόνια δεν είναι δεσμευμένα από τα άτομα Fe από τα οποία προέρχονται. Αυτό ισχύει ειδικά για τα ηλεκτρόνια 4s. Τα ηλεκτρόνια χαρακτηρίζονται πλέον από κυματοσυναρτήσεις που ανήκουν σε ολόκληρο το στερεό. Στο κρυσταλλικό επίπεδο, για το Fe, το Co και το Ni, εξακολουθεί να ισχύει κάτι σαν τον κανόνα του Hund. Αν δύο ηλεκτρόνια 3d αποκτήσουν παράλληλα spin και καταλάβουν διαφορετικές κυματοσυναρτήσεις (αποκτούν επομένως διαφορετικές κατανομές αρνητικού φορτίου), τότε η αμοιβαία απώθηση Coulomb που προκύπτει μεταξύ τους και με άλλα ηλεκτρόνια, όπως επίσης και η έλξη με τα θετικά ιόντα Fe, έχουν ως αποτέλεσμα μια συνολική μείωση της δυναμικής ενέργειας. Η μείωση της ενέργειας οφείλεται και πάλι στην αλληλεπίδραση ανταλλαγής και είναι άμεσο αποτέλεσμα της αρχής του αποκλεισμού του Pauli και των δυνάμεων Coulomb. Άρα, η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων 3d παραλληλίζουν τα spin τους χωρίς να χρειάζονται την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου. Το πλήθος των ηλεκτρονίων που όντως αποκτούν παράλληλο spin εξαρτάται από την ένταση της αλληλεπίδρασης ανταλλαγής και για τον κρύσταλλο του σιδήρου είναι 2.2 ηλεκτρόνια ανά άτομο. Αφού οι κυματοσυναρτήσεις των ηλεκτρονίων 3d σε ολόκληρο τον κρύσταλλο του σιδήρου είναι εντοπισμένες γύρω από τα ιόντα του σιδήρου, ορισμένοι προτιμούν να θεωρούν ότι τα ηλεκτρόνια 3d βρίσκονται τον περισσότερο χρόνο γύρω από τα άτομα Fe. Για το λόγο αυτό σχεδιάσαμε το μαγνητισμένο κρύσταλλο σιδήρου κατά τον τρόπο που τον σχεδιάσαμε στην εικόνα 1.

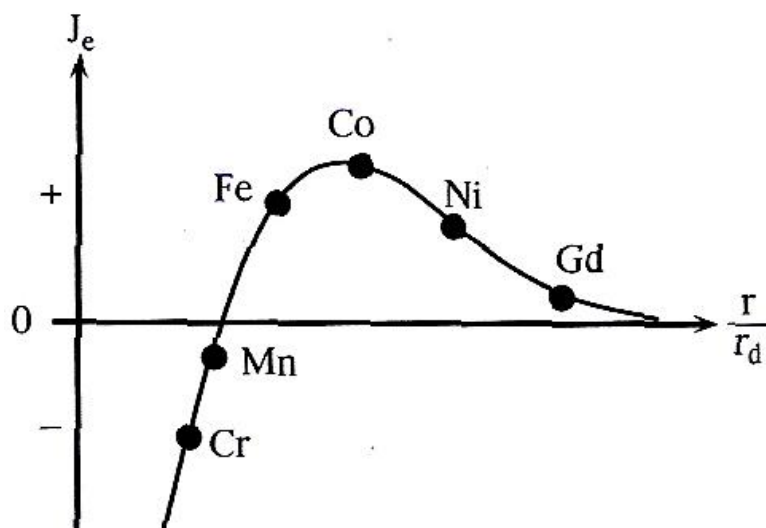
Θα μπορούσε κανείς να σκεφτεί ότι όλα τα στερεά θα έπρεπε να συμπεριφέρονται σαν τον σίδηρο και να γίνονται αυθόρμητα σιδηρομαγνητικά, αφού η ευθυγράμμιση των spin έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές χωρικές κατανομές του αρνητικού φορτίου και κατά πάσα πιθανότητα μείωση της ηλεκτροστατικής ενέργειας. Όμως αυτό δεν ισχύει πάντα. Γνωρίζουμε ότι, στα ομοιοπολικά στερεά, τα ηλεκτρόνια αποκτούν ελάχιστη ενέργεια όταν τα spin των δύο ηλεκτρονίων έχουν αντίθετη φορά. Στους ομοιοπολικούς δεσμούς των μορίων, η αλληλεπίδραση ανταλλαγής δεν μειώνει την ενέργεια. Όταν τα spin των ηλεκτρονίων είναι παράλληλα, τότε η χωρική κατανομή του αρνητικού φορτίου είναι τέτοια που δημιουργείται μια αμοιβαία συνισταμένη ηλεκτροστατική απώθηση μεταξύ των θετικών πυρήνων.

Στην απλούστερη περίπτωση, όταν δηλαδή εξετάζουμε δύο άτομα, η ενέργεια ανταλλαγής εξαρτάται από το διατομικό διαχωρισμό των δύο αλληλεπιδρώντων ατόμων και από τα σχετικά spin των δύο εξωτερικών ηλεκτρονίων (στα οποία αναφερόμαστε ως ηλεκτρόνιο 1 και ηλεκτρόνιο 2). Για την κβαντομηχανική, η ενέργεια αλληλεπίδρασης μπορεί να παρασταθεί με όρους της ενέργειας ανταλλαγής E_{ex} :

$$E_{ex} = -2J_e S_1 S_2 \quad (15)$$

όπου S_1 και S_2 είναι η στροφορμή λόγων spin των αντίστοιχων ηλεκτρονίων, J_e μια αριθμητική ποσότητα που ονομάζεται ολοκλήρωμα ανταλλαγής και στο οποίο συμπεριλαμβάνεται η ολοκλήρωση των κυματοσυναρτήσεων με τους διάφορους

όρους της δυναμικής ενέργειας αλληλεπίδρασης. Άρα, ο όρος αυτός εξαρτάται από τις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις και, επομένως, από τη διατομική απόσταση. Για την πλειοψηφία των στερεών, ο όρος J_e είναι αρνητικός, και έτσι η ενέργεια ανταλλαγής είναι αρνητική όταν οι S_1 και S_2 έχουν αντίθετη φορά, όταν δηλαδή τα spin είναι αντιπαράλληλα. Αυτή είναι η αντισιδηρομαγνητική κατάσταση. Για τον Fe, Co και Ni η J_e είναι θετική και η E_{ex} είναι αρνητική όταν οι S_1 και S_2 είναι παράλληλες. Επομένως, τα spin των ηλεκτρονίων 3d των ατόμων αποκτούν την ίδια φορά προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν την ενέργεια ανταλλαγής. Η αυθόρμητη αυτή μαγνήτιση είναι το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού. Στην εικόνα 4 απεικονίζεται με ποιο τρόπο το J_e καθώς μεταβάλλεται ο λόγος της διατομικής απόστασης προς την ακτίνα της υποστιβάδας 3d (r/r_d). Για τα μεταβατικά μέταλλα Fe, Co, Ni, ο λόγος r/r_d είναι τέτοιος ώστε η ποσότητα J_e να είναι θετική. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, η ποσότητα αυτή είναι αρνητική και δεν προκαλείται σιδηρομαγνητική συμπεριφορά. Για να αναφερθεί ότι το Mn, το οποίο δεν είναι σιδηρομαγνητικό, μπορεί να κραματωθεί με άλλα στοιχεία ώστε να αυξηθεί ο λόγος r/r_d και έτσι να καταστεί σιδηρομαγνητικό.



Εικόνα 4: Το ολοκλήρωμα ανταλλαγής ως συνάρτηση του λόγου r/r_d όπου r η διατομική απόσταση και r_d η ακτίνα τροχιάς d (ή η μέση ακτίνα της υποστιβάδας d). Τα μέταλλα μεταξύ Cr και Ni (συμπεριλαμβανομένων και των αυτών των δύο) είναι μεταβατικά μέταλλα. Για το Gd ο άξονας x αντιστοιχεί στο μέγεθος r/r_f , όπου r_f η ακτίνα της τροχιάς f .

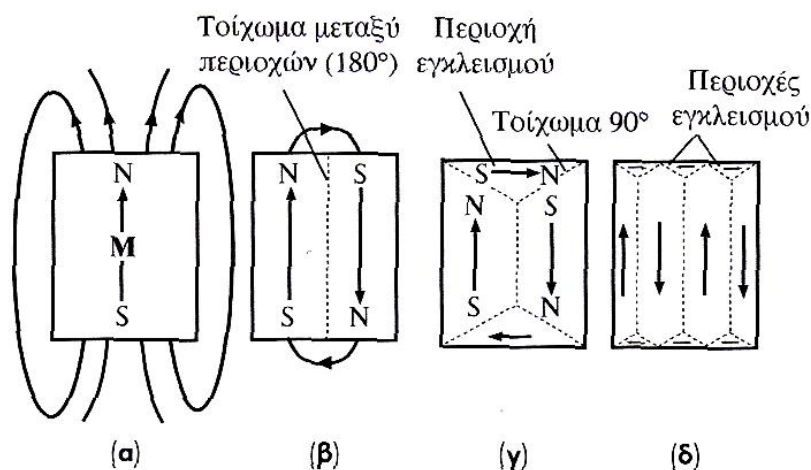
Δ. Μαγνήτιση, απομαγνήτιση και τα φαινόμενα που προκύπτουν:

1. Μαγνητικές περιοχές:

Είναι δυνατόν ένας μονοκρυσταλλός σιδήρου να μην έχει παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Αν θερμάνουμε ένα μαγνητισμένο κομμάτι σιδήρου σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας Curie και στη συνέχεια το ψύξουμε χωρίς να εφαρμόσουμε μαγνητικό πεδίο, τότε το δείγμα δεν θα έχει παραμένουσα μαγνήτιση. Ο λόγος της απουσίας μαγνήτισης είναι η δημιουργία μαγνητικών περιοχών που αλληλοαναιρούνται. Μια μαγνητική περιοχή (magnetic

domain) είναι μια περιοχή του κρυστάλλου στην οποία όλες οι spin μαγνητικές ροπές έχουν τον ίδιο προσανατολισμό έτσι ώστε να παράγεται μαγνητική ροπή σε μία διεύθυνση.

Στην εικόνα 1.1, α απεικονίζεται ένας μονοκρύσταλλος σιδήρου ο οποίος, λόγω του φαινομένου του σιδηρομαγνητισμού (προσανατολισμός όλων των ατομικών spin), έχει παραμένουσα μαγνήτιση. Ο κρύσταλλος είναι σαν μια μαγνητική ράβδος και γύρω του υπάρχουν οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Όπως γνωρίζουμε, στο μαγνητικό πεδίο αποθηκεύεται δυναμική ενέργεια ΔE που ονομάζεται μαγνητοστατική ενέργεια. Μπορούμε να ελαττώσουμε την ενέργεια αυτή του εξωτερικού πεδίου διαιρώντας τον κρύσταλλο σε δύο περιοχές με αντίθετη μαγνήτιση (εικόνα 1.1, β). Έτσι οι δυναμικές γραμμές του εξωτερικού πεδίου μειώνονται και υπάρχει λιγότερη δυναμική ενέργεια αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο. Οι γραμμές του πεδίου παραμένουν μόνο στα άκρα. Η διάταξη αυτή είναι ενεργειακά προτιμότερη, επειδή, ελαττώνοντας τις εξωτερικές γραμμές του πεδίου, ελαττώνουμε τη μαγνητοστατική ενέργεια. Δημιουργείται όμως έτσι ένα όριο ανάμεσα στις δύο περιοχές το οποίο ονομάζεται τοίχωμα Bloch. Το όριο είναι τα σημεία όπου αντιστρέφεται η μαγνήτιση και όπου, επομένως, αντιστρέφονται και τα ατομικά spin. Για να περιστρέψουμε όμως ένα ατομικό spin κατά 180° σε σχέση με το γειτονικό του, απαιτείται η προσφορά ενέργειας. Αυτό συμβαίνει επειδή, λόγω της ενέργειας ανταλλαγής, είναι ενεργειακά προτιμότερη η διάταξη των παράλληλων (και με την ίδια φορά) ατομικών spin. Λέμε ότι το τοίχωμα της εικόνας 1.1, β είναι ένα τοίχωμα 180° αφού κατά την διέλευση από αυτό η μαγνήτιση αντιστρέφεται κατά 180° . Άρα είναι προφανές ότι η περιοχή του τοιχώματος, όπου μεταβάλλεται η διεύθυνση (ή η φορά) των γειτονικών ατομικών spin κατά τη μετάβαση από τη μία περιοχή στην άλλη, έχει μικρότερη ΔE από τον κύριο σώμα της κάθε περιοχής, όπου όλα τα ατομικά spin είναι ευθυγραμμισμένα.



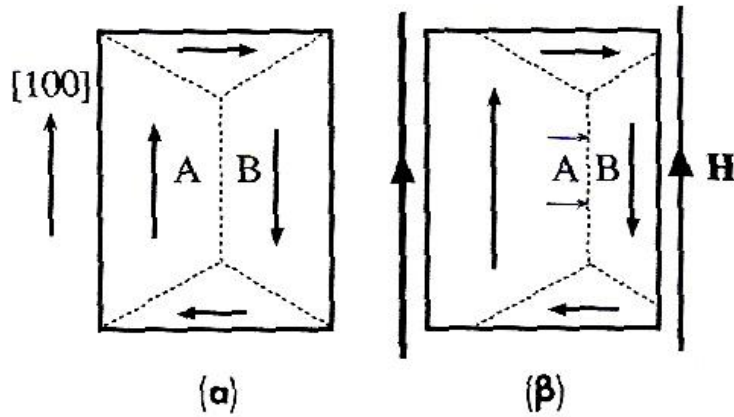
Εικόνα 1.1: α) Μια μαγνητισμένη σιδηρομαγνητική ράβδος στην οποία υπάρχει μια μαγνητική περιοχή, και η οποία δημιουργεί επομένως μαγνητικό πεδίο. β) Ο σχηματισμός δύο μαγνητικών περιοχών με αντίθετη μαγνήτιση μειώνει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Υπάρχουν παρόλα αυτά δυναμικές γραμμές στα άκρα του μαγνήτη. γ) Ο σχηματισμός περιοχών εγκλεισμού στα άκρα περιορίζει τις εξωτερικές δυναμικές γραμμές. δ) ένα δείγμα με πολλές μαγνητικές περιοχές και

περιοχές εγκλεισμού. Δεν υπάρχει καθόλου εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και το δείγμα δείχνει μη μαγνητισμένο.

Το εύρος του τοιχώματος μεταξύ των περιοχών δεν είναι μια διατομική απόσταση αλλά το τοίχωμα έχει μεγαλύτερο πλάτος. Το πλάτος του τοιχώματος για τον σίδηρο είναι της τάξης του 0,1μm, και ισούται με αρκετές εκατοντάδες ατομικές αποστάσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος του τοιχώματος τόσο μεγαλύτερη η ενεργειακή του διαφορά από το κύριο σώμα της περιοχής.

Η μαγνητοστατική ενέργεια που σχετίζεται με τις πεδιακές γραμμές στις άκρες της εικόνας 1.1, β μπορεί να μειωθεί περαιτέρω εξαφανίζοντας τις γραμμές αυτές, κλείνοντας τις άκρες με πλευρικές περιοχές, με περιοχές δηλαδή των οποίων η μαγνήτιση είναι κατά 90° κάθετη προς τις αρχικές περιοχές (1.1, γ). Οι περιοχές αυτές ονομάζονται περιοχές εγκλεισμού και τα τοιχώματά τους είναι τοιχώματα επίσης 90°. Στα τοιχώματα αυτά η μαγνήτιση περιστρέφεται κατά 90°. Μειώνοντας όμως τη μαγνητοστατική ενέργεια, έχουμε αυξήσει τη δυναμική ενέργεια των τοιχωμάτων, αφού έχουν προστεθεί περισσότερα τοιχώματα. Η δημιουργία καινούργιων μαγνητικών περιοχών συνεχίζεται (αυθόρμητα) μέχρις ότου η μείωση της δυναμικής ενέργειας που επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός επιπλέον τοιχώματος ισούται με την αύξηση της δυναμικής ενέργειας λόγω της προσθήκης ενός επιπλέον τοιχώματος. Η συνολική ενέργεια του δείγματος είναι τότε η ελάχιστη και βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, ενώ η συνολική του μαγνήτιση είναι μηδέν. Στην εικόνα 1.1, δ απεικονίζεται ένα δείγμα που έχει πολλές περιοχές και μηδενική μαγνήτιση. Το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή των μαγνητικών περιοχών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το μέγεθος και το σχήμα του δείγματος. Για σωματίδια σιδήρου με διάσταση μικρότερη από 0,01μm, η αύξηση της δυναμικής ενέργειας για τη δημιουργία τοιχώματος είναι πολύ μεγαλύτερη και τα σωματίδια αυτά είναι σωματίδια μίας μόνο περιοχής, άρα είναι πάντοτε μαγνητισμένα.

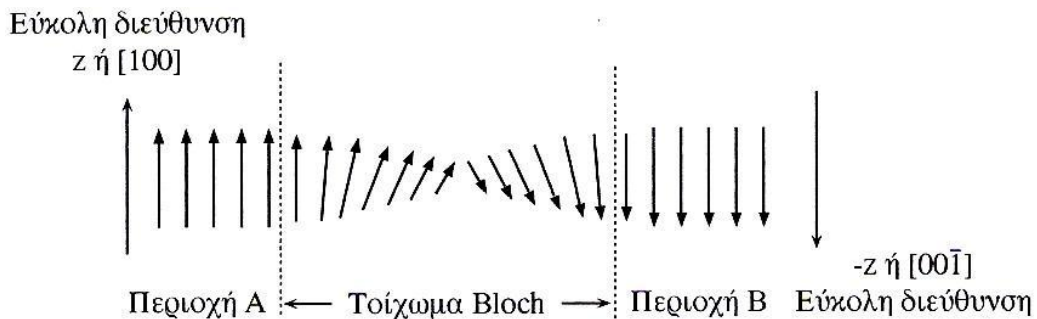
Η μαγνήτιση κάθε περιοχής είναι συνήθως παράλληλη προς μια από τις προτιμώμενες διευθύνσεις, τις διευθύνσεις δηλαδή αυτές προς τις οποίες διευκολύνεται ο προσανατολισμός των ατομικών spin (τις διευθύνσεις δηλαδή όπου επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της επίδρασης της αλληλεπίδρασης ανταλλαγής). Για το σίδηρο η μαγνήτιση είναι εύκολη σε οποιαδήποτε από τις έξι <100> διευθύνσεις (παράλληλα με τις ακμές του κύβου). Οι διευθύνσεις αυτές ονομάζονται εύκολες διευθύνσεις. Η μαγνήτιση του κρυστάλλου παράλληλα με ένα εφαρμοζόμενο πεδίο πραγματοποιείται μέσω της αύξησης των περιοχών με μαγνήτιση (ή συνιστώσες μαγνήτισης M) παράλληλη με το εφαρμοζόμενο πεδίο H (εικόνα 1.2). Θεωρούμε για λόγους απλότητας ότι το πεδίο μαγνήτισης είναι παράλληλο με μία από τις εύκολες διευθύνσεις. Το τοίχωμα Bloch μεταξύ των περιοχών A και B μετακινείται προς τα δεξιά και έτσι, η περιοχή A μεγαλώνει εις βάρος της B, που μικραίνει. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος αποκτά μια συνολική μαγνήτιση M παράλληλα με το H. Η μετακίνηση του τοιχώματος Bloch προκαλείται από τα spin του τοιχώματος και από τα spin της περιοχής B που εφάπτονται σε αυτό. Τα spin αυτά περιστρέφονται βαθμιαία από το εφαρμοζόμενο πεδίο, αφού σε αυτά επενεργεί μια ροπή. Επομένως, η διαδικασία της μαγνήτισης πραγματοποιείται λόγω της μετακίνησης των τοιχωμάτων Bloch ενός κρυστάλλου.



Εικόνα 1.2: α) Ένας μη μαγνητισμένος κρύσταλλος σιδήρου απουσία εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Οι περιοχές A και B έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος και αντίθετη μαγνήτιση. β) Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε το τοίχωμα μεταξύ των περιοχών κινείται προς την πλευρά της περιοχής B. Έτσι η περιοχή A μεγαλώνει, ενώ η B μικραίνει. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η απόκτηση του δείγματος συνολικής μαγνήτισης.

2. Τοιχώματα περιοχών:

Όπως προαναφέραμε, οι spin μαγνητικές ροπές αντιστρέφονται κατά τη διέλευση μέσα από ένα τοίχωμα περιοχής. Έχουμε αναφέρει ότι το τοίχωμα δεν έχει πλάτος μια μόνο ατομική απόσταση, αφού αυτό θα συνεπαγόταν ότι τα spin δύο γειτονικών ατόμων θα σχημάτιζαν γωνία 180° και για αυτό το λόγο η αλληλεπίδραση ανταλλαγής θα ήταν εξαιρετικά ισχυρή. Στην εικόνα 2.1 απεικονίζεται μια σχηματική αναπαράσταση της δομής ενός τοιχώματος Bloch 180° που χωρίζει τις περιοχές A και B. Οι γειτονικές μαγνητικές ροπές spin περιστρέφονται σταδιακά και ότι η περιστροφή είναι πλήρης σε διάστημα αρκετών ατομικών αποστάσεων. Η ύπαρξη των δυνάμεων ανταλλαγής ανάμεσα στα γειτονικά ατομικά spin καθιστά ενεργειακά προτιμότερη τη μικρή σχετική περιστροφή. Αν επιδρούσαν μόνο οι δυνάμεις ανταλλαγής, τότε η σχετική περιστροφή των γειτονικών spin θα ήταν τόσο μικρή που το πάχος του τοιχώματος 180° θα ήταν άπειρο.



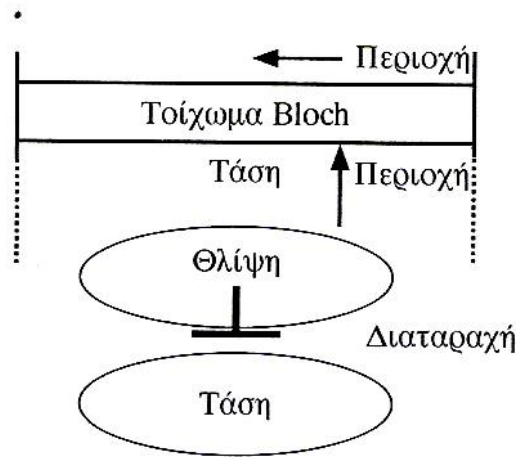
Εικόνα 2.1: Σε ένα τοίχωμα Bloch οι spin μαγνητικές ροπές των γειτονικών ατόμων είναι βαθμιαία περιστρεφμένες. Για να περιστραφεί η μαγνητική ροπή κατά 180° απαιτούνται αρκετές εκατοντάδες ατομικών διαστημάτων.

Οι μαγνητικές ροπές, όμως, που δεν είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς την εύκολη διεύθυνση μαγνήτισης, έχουν επιπλέον ενέργεια, η οποία ονομάζεται ενέργεια ανισοτροπίας (K) (ανισοτροπία: διαφορετικές ιδιότητες, όπως μαγνητικές, σε κάθε κρυσταλλική διεύθυνση). Αν το τοίχωμα είναι παχύ τότε η ενέργεια K του τοιχώματος θα είναι αρκετά μεγάλη, καθώς περιέχει πολλές μαγνητικές ροπές που περιστρέφονται πέραν της εύκολης διεύθυνσης. Η ενέργεια ανισοτροπίας του τοιχώματος ελαχιστοποιείται όταν ο προσανατολισμός της μαγνητικής ροπής μεταβάλλεται κατά 180° και από την εύκολη διεύθυνση ($+z$), μεταβαίνει, χωρίς ενδιάμεσες περιστροφές, και πάλι στην ίδια διεύθυνση έχοντας όμως αντίθετη φορά ($-z$). Για να πραγματοποιηθεί αυτό απαιτείται η ύπαρξη ενός τοιχώματος με πάχος μια ατομική απόσταση. Το πάχος του τοιχώματος είναι στην πραγματικότητα ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ενέργεια ανταλλαγής (που απαιτεί την ύπαρξη ενός τοιχώματος μεγάλου πάχους) και την ενέργεια ανισοτροπίας (που απαιτεί την ύπαρξη ενός πολύ λεπτού τοιχώματος). Το πάχος ισοροπίας του τοιχώματος είναι αυτό για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική δυναμική ενέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της ενέργειας ανταλλαγής και της ενέργειας ανισοτροπίας εντός του τοιχώματος. Στην περίπτωση του σιδήρου το πάχος είναι περίπου $0,1\mu\text{m}$, ενώ για το κοβάλτιο, όπου η ενέργεια ανισοτροπίας είναι μεγαλύτερη, το πάχος είναι μικρότερο.

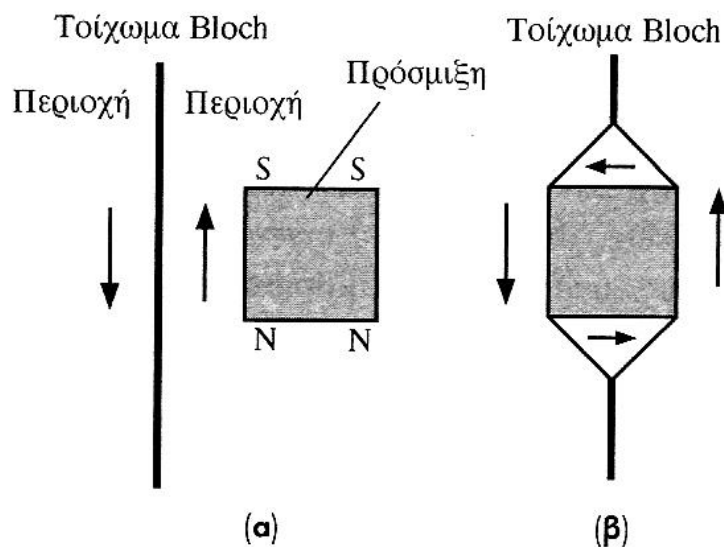
3. Κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων:

Για να μαγνητιστεί ένας σιδηρομαγνητικός μονοκρυστάλλος θα πρέπει να μετακινηθούν τα τοιχώματα των περιοχών που έχουν μαγνήτιση παράλληλη προς το επιβαλλόμενο πεδίο εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση είναι αντίθετη προς τη μαγνήτιση του επιβαλλόμενου πεδίου. Η μετακίνηση ενός τοιχώματος εντός ενός κρυστάλλου επηρεάζεται από τις κρυσταλλικές ατέλειες και τις προσμίξεις και δεν είναι ομαλή. Για παράδειγμα σε ένα τοίχωμα Bloch 90° , η διεύθυνση της μαγνήτισης μεταβάλλεται κατά 90° κατά τη διέλευση μέσα από το τοίχωμα. Λόγω της μαγνητικής παραμόρφωσης, η παραμόρφωση του πλέγματος δεν είναι ίδια στις δύο πλευρές του τοιχώματος αυτού και έτσι δημιουργείται μια περίπλοκη κατανομή παραμόρφωσης, και επομένως, και τάσης. Όπως γνωρίζουμε, οι κρυσταλλικές ατέλειες όπως οι διαταραχές, οι σημειακές ατέλειες κλπ, δημιουργούν γύρω τους κατανομές παραμόρφωσης και τάσης. Άρα, τα τοιχώματα των περιοχών και οι κρυσταλλικές ατέλειες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι διαταραχές είναι γραμμικές ατέλειες οι οποίες παραμορφώνουν το πλέγμα σε αρκετή απόσταση γύρω τους. Στην εικόνα 3.1 απεικονίζεται σχηματικά μια διαταραχή που περιβάλλεται από εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις και ένα τοίχωμα το οποίο έχει μια εφελκυστική τάση από τη μεριά της διαταραχής. Αν το τοίχωμα πλησιάσει πολύ στη διαταραχή, τότε οι θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις αλληλοαναιρούνται και το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός απαραμόρφωτου πλέγματος, το οποίο χαρακτηρίζεται από μικρότερη ενέργεια παραμόρφωσης. Η διάταξη που χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη ενέργεια, κρατάει το τοίχωμα της περιοχής κοντά στη διαταραχή. Για να απομακρυνθεί τώρα το τοίχωμα από τη διαταραχή απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου. Τα τοιχώματα μεταξύ των περιοχών επηρεάζονται επίσης και από τις μη μαγνητικές προσμίξεις και τα εγκλείσματα. Ένα έγκλεισμα για παράδειγμα, που βρίσκεται σε μια περιοχή, μαγνητίζεται, δημιουργούνται σε αυτό βόρειος και νότιος πόλος

(εικόνα 3.2, α). Αν το τοίχωμα έπρεπε να περάσει μέσα από το έγκλεισμα, αν έπρεπε δηλαδή γύρω από αυτό να υπάρχουν δύο διαφορετικές περιοχές (3.2, β), τότε η μαγνητοστατική ενέργεια θα ήταν μικρότερη –γεγονός που είναι ενεργειακά προτιμότερο. Η μείωση της μαγνητοστατικής δυναμικής ενέργειας σημαίνει ότι απαιτείται πλέον μεγαλύτερη δύναμη για να κινηθεί το τοίχωμα και να απομακρυνθεί από το έγκλεισμα. Η πρόσμιξη επομένως συγκρατεί κατά κάποιο τρόπο το τοίχωμα, παρεμποδίζοντας την κίνησή του.



Εικόνα 3.1: Η κατανομή τάσης και της παραμόρφωσης γύρω από μια διαταραχή και κοντά σε ένα τοίχωμα μεταξύ περιοχών.



Εικόνα 3.2: Η αλληλεπίδραση ενός τοιχώματος με ένα μαγνητικό έγκλεισμα (χωρίς μόνιμη μαγνήτιση). α) Το έγκλεισμα μαγνητίζεται και υπάρχει μαγνητοστατική ενέργεια. β) Η διάταξη αυτή έχει μικρότερη δυναμική ενέργεια και για αυτό είναι προτιμότερη.

Επομένως, βλέπουμε ότι η κίνηση ενός τοιχώματος εντός κρυστάλλου δεν είναι ομαλή, αλλά ότι πραγματοποιείται με απότομα άλματα. Το τοίχωμα συγκρατείται σε κάποιο σημείο από μια ατέλεια ή πρόσμιξη και για να ελευθερωθεί απαιτείται η εφαρμογή ενός ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου. Μόλις αποδεσμευτεί

το τοίχωμα κινείται μέχρις ότου δεσμευτεί από μια άλλη ατέλεια, όπου και παραμένει μέχρι το πεδίο να αυξηθεί ακόμα περισσότερο και να αποδεσμευτεί εκ νέου. Κάθε φορά που το τοίχωμα αποδεσμεύεται παράγονται πλεγματικές ταλαντώσεις, που σημαίνει ότι το μέρος της ενέργειας χάνεται ως θερμότητα. Η συνολική κίνηση του τοιχώματος είναι μην αντιστρέψιμη (υστερητική) και συνεπάγεται απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας που διοχετεύεται στον κρύσταλλο.

4. Εξάρτηση του M από το H – Φαινόμενο Barkhausen και βρόγχος υστέρησης:

Η πλειοψηφία των μαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές είναι πολυκρυσταλλικά. Επομένως στη μικροδομή τους αποτελούνται από πολλούς κόκκους διαφόρων μεγεθών και προσανατολισμών, που εξαρτώνται από την προετοιμασία και το θερμικό ιστορικό των συστατικών. Σε ένα μη μαγνητισμένο πολυκρυσταλλικό δείγμα κάθε κρυσταλλικός κόκκος περιέχει πολλές μαγνητικές περιοχές (εικόνα 4.1). Η δομή των περιοχών σε κάθε κόκκο εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του κόκκου και, ως ένα βαθμό, από τη μαγνήτιση των γειτονικών κόκκων. Οι πολύ μικροί κόκκοι (μικρότεροι από 0,1μm) μπορεί να περιέχουν μια μόνο περιοχή. Στις πιο πολλές περιπτώσεις όμως οι πολλοί κόκκοι περιέχουν πάνω από μία περιοχές. Η δομή δεν θα έχει στο σύνολό της καθόλου μαγνήτιση, εφόσον βέβαια δεν της είχε προηγουμένως επιβληθεί κάποιο μαγνητικό πεδίο. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι το δείγμα είχε θερμανθεί σε θερμοκρασία Curie και στη συνέχεια ψύχθηκε μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου χωρίς εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

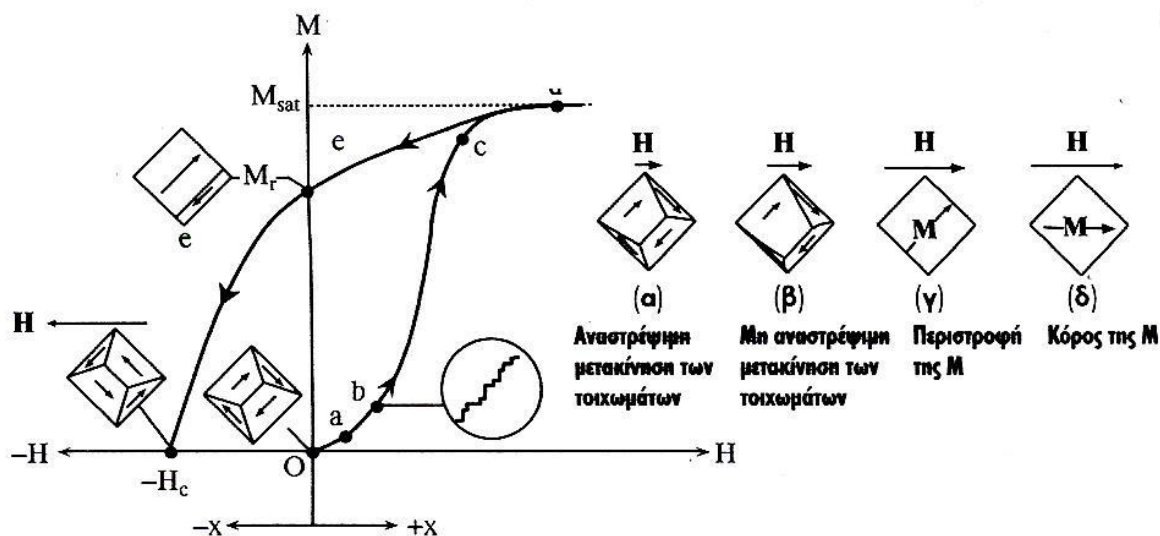


Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση των μαγνητικών περιοχών εντός των κόκκων ενός μη μαγνητισμένου πολυκρυσταλλικού δείγματος σιδήρου. Οι πολύ μικροί κόκκοι αποτελούνται από μια περιοχή.

Έστω εφαρμογή ενός πολύ μικρού εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου $\mu_0 H$. Έστω επίσης ότι η διεύθυνση στην οποία εφαρμόζεται το πεδίο είναι η $+x$. Τα τοιχώματα των περιοχών των διάφορων κόκκων αρχίζουν να μετακινούνται, και οι περιοχές των οποίων μια συνιστώσα του προσανατολισμού της μαγνήτισης είναι παράλληλη προς το πεδίο μεγαλώνουν εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση είναι ενάντια στο πεδίο (σημείο a, εικόνα 4.2). Τα τοιχώματα των περιοχών που είναι δεσμευμένα από ατέλειες της κρυσταλλικής δομής τείνουν να εξαφανιστούν. Δημιουργείται μια πολύ μικρή αλλά σημαντική μαγνήτιση παράλληλα με το πεδίο. Αυτό σημειώνεται στην περιοχή Oa της καμπύλης της μαγνήτισης προς το πεδίο μαγνήτισης (M-H) (εικόνα 4.2). Καθώς το πεδίο συνεχίζει να αυξάνεται τα τοιχώματα διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις (σημείο b, 4.2) και συναντούν διάφορα εμπόδια, όπως κρυσταλλικές ατέλειες, προσμίξεις, δεύτερες φάσεις κ.ο.κ., τα οποία έλκουν τα τοιχώματα και εμποδίζουν την κίνησή τους. Ένα τοίχωμα που είναι δεσμευμένο σε μια ατέλεια δεδομένου ενός εφαρμοζόμενου πεδίου, δεν μπορεί να κινηθεί μέχρις ότου το πεδίο αυξηθεί αρκετά. Τότε θα ασκείται στο τοίχωμα επαρκής δύναμη ώστε να το αποδεσμεύσει. Το τοίχωμα κινείται στη συνέχεια απρόσκοπτα μέχρι να συναντήσει το επόμενο εμπόδιο. Καθώς ένα τοίχωμα απελευθερώνεται απότομα από μια δομική ατέλεια και κατευθύνεται προς το επόμενο εμπόδιο, δύο παράγοντες προκαλούν ουσιαστικά την παραγωγή θερμότητας: οι απότομες μεταβολές της παραμόρφωσης του πλέγματος αφενός (που οφείλονται στη μαγνητική παραμόρφωση) δημιουργούν πλεγματικά κύματα τα οποία απομακρύνουν μέρος της ενέργειας και απότομες μεταβολές της μαγνήτισης αφετέρου, που επάγουν δινορρέυματα (eddy currents) τα οποία καταναλώνουν ενέργεια λόγω της θέρμανσης Joule (οι μαγνητικές περιοχές έχουν μη μηδενική ηλεκτρική αντίσταση). Οι διαδικασίες αυτές συνεπάγονται τη μετατροπή της ενέργειας σε θερμότητα και είναι μη αντιστρέψιμες. Τα απότομα άλματα στη μετακίνηση των τοιχωμάτων προκαλούν, αυξανόμενου του μαγνητικού πεδίου, απότομες μεταβολές στη μαγνήτιση του δείγματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο Barkhausen.

Αν ένα πηνίο αγώγιμου καλωδίου τοποθετηθεί πλησίον του δείγματος, την ώρα που δρα μαγνητικό πεδίο και προκαλεί τη μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, το αποτέλεσμα θα είναι ένας ηλεκτρικός παλμός στο πηνίο, εξαιτίας της αλλαγής της μαγνήτισης.

Η πρώτη παρατήρηση αυτού του ενδιαφέροντος φαινομένου με το συγκεκριμένο τρόπο πραγματοποιήθηκε από τον προαναφερθέν φυσικό Prof. Heinrich Barkhausen το 1919. Απέδειξε ότι ο βρόγχος υστέρησης (γραφική αναπαράσταση των φαινομένων μαγνήτισης ενός υλικού σε διάγραμμα κάθετων αξόνων, x για τη μαγνήτιση και y για το εξωτερικό επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο) δεν είναι, από άποψη ομαλότητας των καμπυλών του, συνεχής αλλά αντιθέτως χαρακτηρίζεται από απότομα ασυνεχή «σκαλοπάτια», τα οποία οφείλονται στα άλματα Barkhausen, δηλαδή στην απότομη υστερητική μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Όταν οι παλμοί προστίθενται όλοι μαζί, από όλες τις μετακινήσεις μαγνητικών τοιχωμάτων, ένα σήμα, όμοιο με θόρυβο, παράγεται (Barkhausen noise) (εικόνα 4.2).[4]



Εικόνα 4.2: Η εξάρτηση της M από το H για ένα αρχικά μη μαγνητισμένο πολυκρυσταλλικό δείγμα σιδήρου (σημείο O).

- Υπό την εφαρμογή πολύ ασθενούς πεδίου η μετακίνηση των τοιχωμάτων είναι αντιστρέψιμη (ανυστερητική).
- Η μετακίνηση των τοιχωμάτων είναι μη αντιστρέψιμη (υστερητική) και πραγματοποιείται με απότομα άλματα.
- Σχεδόν όλοι οι κόκκοι αποτελούνται από μια περιοχή και έχουν φτάσει στη μαγνήτιση κόρου στην εύκολη διεύθυνση.
- Η μαγνήτιση των επιμέρους κόκκων πρέπει να περιστραφεί για να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο H .
- Όταν το πεδίο απομακρύνεται, τότε το δείγμα επιστρέφει από την κατάσταση d στην e .

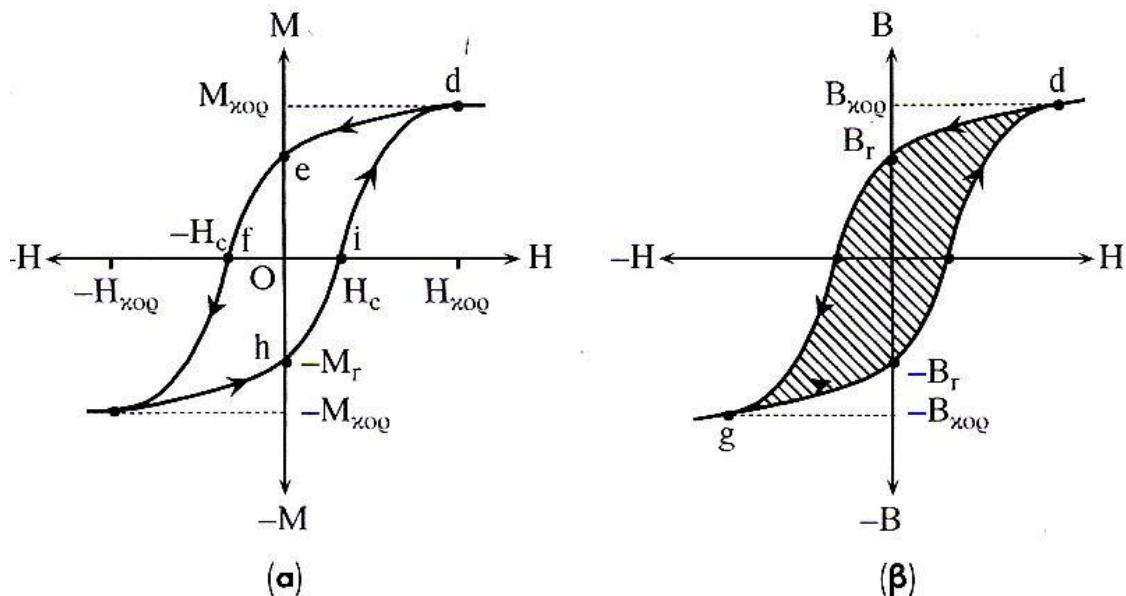
Για να απομαγνητίσουμε το δείγμα πρέπει να εφαρμόσουμε ένα πεδίο μαγνήτισης H_c με την αντίθετη φορά.

Καθώς αυξάνουμε το πεδίο, η μαγνήτιση συνεχίζει να αυξάνεται με απότομες μετακινήσεις τοιχωμάτων. Οι μετακινήσεις αυτές προκαλούν τη διεύρυνση των περιοχών με μαγνήτιση σε απόκλιση από το πεδίο. Κάποια στιγμή κάθε κρυσταλλικός κόκκος αποκτά μια μόνο περιοχή με μαγνήτιση σε μία από τις εύκολες διευθύνσεις (4.2, σημείο c). Ο προσανατολισμός ορισμένων κόκκων είναι τέτοιος που η εύκολη διεύθυνσή τους, και επομένως και η M που έχουν αποκτήσει, είναι παράλληλη προς το πεδίο. Σε πολλούς άλλους κόκκους, όμως η μαγνήτιση σχηματίζει μια γωνία με το H (4.2, c). Από το σημείο αυτό και μέχρι το d κάθε περαιτέρω αύξηση του πεδίου προκαλεί την περιστροφή της μαγνήτισης των κόκκων και τον προσανατολισμό τους με τη διεύθυνση του πεδίο H . Το πεδίο γίνεται κάποια στιγμή τόσο ισχυρό ώστε η M να είναι παράλληλη με το H , και η μαγνήτιση του δείγματος φτάνει στον κόρο M_{sat} , όντας ταυτόχρονα παράλληλη με το πεδίο H (άξονας $x-x'$) (σημείο d , 4.2).

Αν μειώναμε και τελικά μηδενίζαμε το πεδίο μαγνήτισης, τότε η μαγνήτιση κάθε κόκκου θα περιστρεφόταν ώστε να γίνει παράλληλη με την πλησιέστερη εύκολη διεύθυνση στον κόκκο. Επιπλέον, σε ορισμένους κόκκους, προκειμένου να μειωθεί η μαγνήτισή τους, θα δημιουργούνταν καινούργιες μικρές περιοχές (σημείο

e, 4.2). Στο τέλος της διαδικασίας αυτής, μετά δηλαδή τη μετάβαση από το σημείο d στο e, το δείγμα διατηρεί μια μόνιμη μαγνήτιση, η οποία ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση (M_r).

Αν εφαρμόσουμε τώρα ένα πεδίο μαγνήτισης με την αντίστροφη φορά ($-x$), τότε η μαγνήτιση του δείγματος, που θα εξακολουθούσε να είναι παράλληλη στη διεύθυνση $+x$ θα μειωνόταν και κάποια στιγμή, όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι αρκετά μεγάλο, τότε η M θα ήταν μηδέν και το δείγμα θα είχε απομαγνητιστεί πλήρως. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί στο σημείο f (εικόνα 4.3, α). Το πεδίο μαγνήτισης H_c που απαιτείται για να απομαγνητιστεί πλήρως το δείγμα ονομάζεται συνεκτικό πεδίο. Το μέγεθος αυτό παριστά την αντίσταση που παρουσιάζει το δείγμα στην απομαγνήτιση. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στο σημείο f το δείγμα αποτελείται ξανά από κόκκους που περιέχουν πολλές μαγνητικές περιοχές. Επομένως, κατά τη διαδικασία της απομαγνήτισης, κατά τη μετάβαση από το σημείο e στο f, δημιουργούνται νέες μαγνητικές περιοχές. Η διαδικασία της απομαγνήτισης συνεπάγεται το σχηματισμό, γύρω από τις κρυσταλλικές ατέλειες νέων μαγνητικών περιοχών που αναιρούν τη συνολική μαγνήτιση.



Εικόνα 4.3: α) Ενδεικτική καμπύλη υστέρησης $M-H$. β) Αντίστοιχη καμπύλη $B-H$. Η σκιασμένη επιφάνεια εντός του βρόγχου υστέρησης ισούται με τις απώλειες ενέργειας ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο.

Αν συνεχίσουμε να αυξάνουμε το μαγνητικό πεδίο προς την κατεύθυνση $-x$ (4.3, α), τότε η διαδικασία από το f και μετά γίνεται όμοια με τη διαδικασία της μαγνήτισης από το σημείο a μέχρι το d της εικόνας 4.2, με μόνη διαφορά ότι η φορά του πεδίου τώρα είναι $-x$, ενώ πριν ήταν $+x$. Στο σημείο g το δείγμα έχει φτάσει στη μαγνήτιση κόρου στη διεύθυνση $-x$. Η πλήρης εξάρτηση της M από την H καθώς το μαγνητικό πεδίο κάνει έναν πλήρη κύκλο, έχει όψη του κλειστού βρόγχου της εικόνας 4.3, οποίος λέγεται βρόχος υστέρησης. Βλέπουμε ότι στην διεύθυνση $-x$ και στην $+x$ η μαγνήτιση φτάνει στον κόρο ($M_{κορ}$) όταν το H φτάνει στην τιμή $H_{κορ}$. Όταν απομακρύνουμε το πεδίο το δείγμα διατηρεί μια παραμένουσα μαγνήτιση που αντιστοιχεί στα σημεία e και h και σημειώνεται με M_r . Το πεδίο

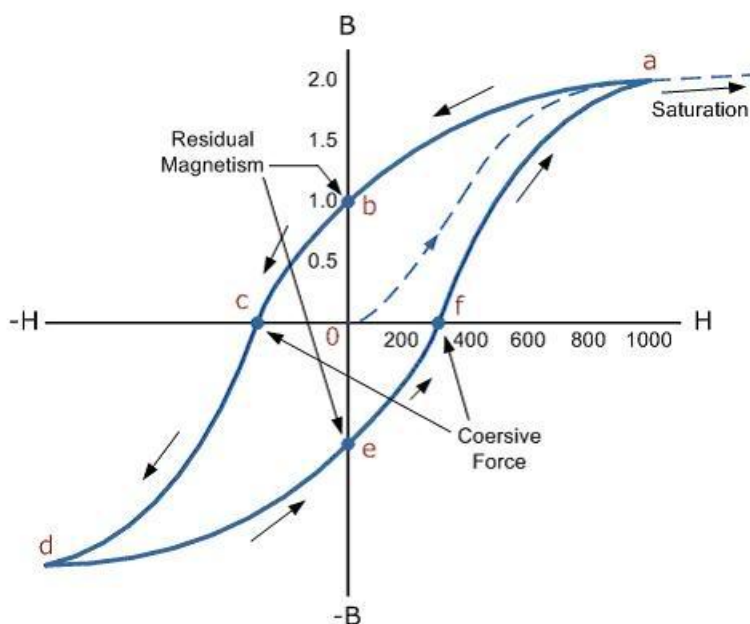
μαγνήτισης H_c που απαιτείται για να απομαγνητίσουμε το δείγμα ονομάζεται συνεκτικό πεδίο και αντιστοιχεί στα σημεία f και i . Η αρχική καμπύλη μαγνήτισης (4.2), στην οποία ξεκινήσαμε από μη μαγνητισμένη κατάσταση ονομάζεται αρχική (παρθενική) καμπύλη μαγνήτισης.

Μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα που να απεικονίζει τη μεταβολή του B και όχι της M (4.3, β). Ισχύει ο τύπος:

$$B = \mu_0 M + \mu_0 H$$

από τον οποίο προκύπτει ο βρόχος υστέρησης που συνδέει τα μεγέθη B και H . Η πολύ μικρή αύξηση του B με το H όταν η M έχει φτάσει ήδη στον Κάσο οφείλεται στη διαπερατότητα του κενού ($\mu_0 H$). Η επιφάνεια που περικλείεται από το βρόχο υστέρησης του B προς H (διαγραμμισμένη επιφάνεια βρόχου στο 4.3, β) αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο εφαρμογής του πεδίου.

Έστω ότι υποβάλλουμε ένα υλικό σε ένα κυκλικά εφαρμοζόμενο πεδίο, που έχει εναλλάξ φορά προς το $+x$ και $-x$), αλλά ότι δεν φτάνουμε μέχρι την μαγνήτιση κόρου του υλικού. Όπως είναι φανερό και στην εικόνα 4.4, ο βρόχος υστέρησης θα είναι διαφορετικός από την περίπτωση όπου το δείγμα φτάνει μέχρι τη μαγνήτιση κόρου. Το μαγνητικό πεδίο στο υλικό δεν φτάνει μέχρι την τιμή $B_{\text{κορ}}$ (που αντιστοιχεί στη $M_{\text{κορ}}$) αλλά, όταν το πεδίο μαγνήτισης είναι H_m , φτάνει μέχρι τη μέγιστη δυνατή τιμή B_m . Επειδή οι διαδικασίες της μαγνήτισης και απομαγνήτισης είναι μη αναστρέψιμες, θα εξακολουθεί να υπάρχει φαινόμενο υστέρησης. Το σχήμα του βρόχου υστέρησης εξαρτάται από την ένταση του εφαρμοζόμενου εξωτερικά μαγνητικού πεδίου και, επιπλέον, από το σχήμα, το μέγεθος και το υλικό του εξεταζόμενου δείγματος. Η περιοχή που περικλείεται εντός του βρόχου εξακολουθεί να αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου και κύκλο εφαρμογής του εναλλασσόμενου πεδίου. Ο βρόχος υστέρησης φτάνει μέχρι τις τιμές κόρου (4.3), τότε ονομάζεται βρόχος υστέρησης κόρου (κύριος βρόχος υστέρησης). Η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο του δείγματος εξαρτώνται από το βρόχο H - H . Οι τιμές που αναφέρονται αντιστοιχούν συνήθως στο βρόχο υστέρησης κόρου.



Εικόνα 4.4: Ο βρόχος υστέρησης B-H εξαρτάται από το πλάτος του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και από το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος, όπως και από το υλικό του.

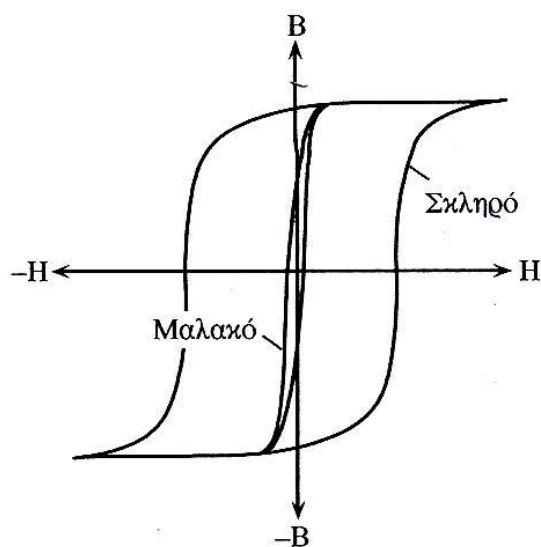
Ε. Σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά:

1.Γενικά:

Με βάση τη σχέση του B με το H, τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές διακρίνονται σε μαλακά και σε σκληρά μαγνητικά υλικά. Μια ενδεικτική μορφή των βρόχων υστέρησης απεικονίζεται στην εικόνα 1.1, παρακάτω. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Για να το θέσουμε διαφορετικά, οι βρόχοι B-H είναι στενοί. Το εμβαδόν της επιφάνειας του βρόχου υστέρησης είναι μικρό και, ως εκ τούτου, οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο εφαρμογής εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου εφαρμόζονται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης-απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν επίσης μικρές απώλειες υστέρησης, ή μικρή επιφάνεια βρόχου υστέρησης. Η λειτουργία των ηλεκτρονόμων (relays) που απαιτεί το άνοιγμα και το κλείσιμο ενός κυκλώματος, στηρίζεται στο μαγνητισμό και τον απομαγνητισμό ενός κομματιού σιδήρου και γι' αυτό χρησιμοποιούνται μαλακά μαγνητικά υλικά.

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά από την άλλη πλευρά, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και γι' αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες B-H είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες. Το συνεκτικό τους πεδίο είναι σχετικά μεγάλο, γεγονός που μαρτυρά ότι για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Το συνεκτικό πεδίο των σκληρών μαγνητικών υλικών μπορεί να είναι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερο

από το συνεκτικό πεδίο των μαλακών υλικών. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές. Είναι επίσης φανερό ότι η μαγνήτιση μπορεί να μεταβληθεί από μια διεύθυνση που τυχόν να βρίσκεται σε μια άλλη, για παράδειγμα από την $-B_r$ στην $+B_r$, με την εφαρμογή ενός κατάλληλου πολύ ισχυρού πεδίου μαγνήτισης. Αφού το συνεκτικό πεδίο είναι πολύ ισχυρό, αμφότερες οι καταστάσεις $-B_r$ και $+B_r$ παραμένουν μέχρι να τις μεταβάλλει και να προσανατολίσει διαφορετικά το μαγνητικό πεδίο ένα κατάλληλο, δηλαδή αρκετά ισχυρό, πεδίο μαγνήτισης. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται για τη μαγνητική εγγραφή ψηφιακών δεδομένων, όπου οι προαναφερθείσες καταστάσεις μπορούν να αντιστοιχούν στο 1 και το 0 (ή αντίστροφα).



Εικόνα 1.1: Μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά.

2. Μαλακά μαγνητικά υλικά: mild steel, αποτελούμενες φάσεις, χαρακτηριστικά και εφαρμογές:

Θα εμβαθύνουμε περισσότερο στα μαλακά μαγνητικά υλικά και στις χρήσεις τους, και συγκεκριμένα στον εμπορικό σίδηρο με προσμίξεις μέχρι 0,2% και συγκεκριμένα τους φερρίτες.

Καταρχάς, ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων. Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις «βαριές βιομηχανίες». Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας

χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. Μια από τις τρεις Ευρωπαϊκές Κοινότητες που ιδρύθηκαν το 1957 ήταν και η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.[2]

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες (αγγλ. grades), ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση. Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (αγγλ. carbon steels). Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα. Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το ποσοστό του άνθρακα. Εμείς στην προκειμένη εργασία εξετάσαμε δοκίμια χαλύβων χαμηλού άνθρακα ή μαλακούς χάλυβες (mild steels· C < 0,30%),

Γενικά, Ο φερρίτης είναι στερεά φάση καθαρού σιδήρου ή στερεό διάλυμα με βασικό συστατικό τον σίδηρο που κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα. Ο φερρίτης είναι η κύρια φάση στους κοινούς χάλυβες και τους χυτοσιδήρους. Οι ιδιότητες του φερρίτη είναι σχεδόν ίδιες με τις ιδιότητες του καθαρού σιδήρου. Είναι όλκιμος και η εφελκυστική του αντοχή ανέρχεται σε περίπου 280 MPa. Η σκληρότητά του κυμαίνεται από 80 έως 100 HB (Brinell). Είναι επίσης ισχυρά μαγνητικός και μπορεί να αποκτήσει μόνιμη μαγνήτιση (σιδηρομαγνητικός) για θερμοκρασία χαμηλότερη από 770°C (θερμοκρασία Curie).

Ο φερρίτης ή α-Fe είναι σταθερός σε θερμοκρασία έως και 910°C. Η μέγιστη περιεκτικότητά του σε άνθρακα ανέρχεται σε 0,021% κ.β. στους 723°C και μειώνεται σε 0,006% κ.β. σε θερμοκρασία δωματίου. Σε θερμοκρασίες από 910 έως 1390°C, ο χωροκεντρωμένος κυβικός φερρίτης μετασχηματίζεται σε εδροκεντρωμένο κυβικό ωστενίτη (γ-Fe), που είναι πιο σκληρός και λιγότερο μαγνητικός (παραμαγνητικός). Σε θερμοκρασία ανώτερη από 1390°C έως το σημείο τήξης του σιδήρου (1539°C), ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε χωροκεντρωμένο κυβικό φερρίτη, που αποκαλείται δ-Fe για να ξεχωρίζει από τον φερρίτη των χαμηλών θερμοκρασιών. Η μέγιστη περιεκτικότητά του δ-Fe σε άνθρακα φτάνει το 0,09% στους 1493°C.

Η διαλυτότητα του άνθρακα στον φερρίτη είναι πολύ περιορισμένη, γιατί στο χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα τα άτομα του άνθρακα καταλαμβάνουν θέσεις παρεμβολής, δηλ. παρεμβάλλονται ανάμεσα στα διατεταγμένα άτομα του σιδήρου και, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους τους, προκαλούν έντονες τοπικές τάσεις. Εκτός από άνθρακα, ο φερρίτης μπορεί να περιέχει και μικρές ποσότητες από χρώμιο, νικέλιο, πυρίτιο ή και φώσφορο.

Στους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, ο φερρίτης αποτελεί το κύριο συστατικό. Υπό συνθήκες που πλησιάζουν την θερμοδυναμική ισορροπία (π.χ. ανοπτημένους χάλυβες), όταν η περιεκτικότητά του άνθρακα είναι μικρότερη από 0,76% κ.β. (ευτηκτοειδής σύσταση στο μετασταθές διάγραμμα φάσεων Fe-C), τότε ο φερρίτης σχηματίζει ξεχωριστούς κόκκους (κρυστάλλους) και συνυπάρχει μαζί με τον σεμεντίτη στην πλακοειδή («λαμελοειδή») δομή του περλίτη. Όταν η

περιεκτικότητα του άνθρακα είναι ίση η μεγαλύτερη από 0,76% κ.β., τότε ο φερρίτης υπάρχει μόνο στον περλίτη.

Ο φερρίτης υπάρχει επίσης και σε μετασταθείς δομές που προκύπτουν με απότομη ψύξη («βαφή») των χαλύβων. Μία τέτοια δομή είναι και η δομή Widmanstätten (Βιντμανστάτεν) που δημιουργείται όταν ο χάλυβας ψυχθεί απότομα από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε θερμοκρασία κατά λίγο χαμηλότερη. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο δημιουργείται φερρίτης που έχει μορφή μεγάλων σφηνών που διασταυρώνονται, καθώς αναπτύσσεται κατά μήκος ορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Ο φερρίτης είναι επίσης το κύριο συστατικό του μετασταθούς μπαινίτη, ο οποίος δημιουργείται όταν ο ρυθμός ψύξης είναι κάπως μεγαλύτερος, ώστε να αποφευχθεί η δομή Widmanstätten. Μαρτενσίτης δεν δημιουργείται όταν η τελική θερμοκρασία ψύξης δεν είναι αρκετά χαμηλή.[3]

Τέλος, λίγα πράγματα για τον περλίτη, καθώς το υλικό μας, το οποίο εξετάσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ήταν κοινός ανθρακούχος χάλυβας με κύρια φάση τον φερρίτη και –ελάχιστους μεν, υπαρκτούς δε- κόκκους περλίτη.

Ο περλίτης είναι μικρογραφική δομή του χάλυβα που αποτελείται από εναλλασσόμενα φύλλα («λαμέλες») φερρίτη (α -Fe) και σεμεντίτη (Fe_3C). Η σύστασή του είναι: 88,5% κ.β. φερρίτης και 11,5% κ.β. σεμεντίτης. Ο περλίτης σχηματίζεται κατά τον ευτηκτοειδή μετασχηματισμό του ωστενίτη (γ -Fe), όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από 727°C. Η ευτηκτοειδής σύσταση του ωστενίτη είναι 0,77% κ.β. C. Η ονομασία του περλίτη οφείλεται στο γεγονός ότι στο μικροσκόπιο παρουσιάζει λαμπερή εμφάνιση με ζώνες όπως το μάργαρο (σεντέφι), το υλικό δηλαδή που κάνει τα μαργαριτάρια να αστράφτουν. Επειδή περιέχει πολύ φερρίτη, ο περλίτης είναι και αυτός όλκιμος. Η σκληρότητά του είναι κάπως υψηλότερη και κυμαίνεται από 200 έως 250 HB (Brinell).

Γενικά, ένα ιδανικό μαλακό μαγνητικό υλικό έχει μηδενικό πεδίο (H_c), πολύ μεγάλη μαγνήτιση κόρου ($B_{\text{κορ}}$), μηδενική παραμένουσα μαγνήτιση (B_r), μηδενικές απώλειες υστέρησης και πολύ μεγάλα $\mu_{r,\text{max}}$ και μ_{ri} . Ο καθαρός σίδηρος, παρ' ότι είναι μαλακό μαγνητικό υλικό, δεν χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές μηχανές (εκτός από ορισμένες ειδικού τύπου εφαρμογές σε ηλεκτρονόμους) λόγω της μεγάλης αγωγιμότητάς του που, υπό συνθήκες επιβολής μεταβαλλόμενων πεδίων, επιτρέπει τη δημιουργία δινορρευμάτων. Τα επαγόμενα δινορρεύματα στο σίδηρο δημιουργούν ανεπιθύμητες απώλειες Joule (RI^2). Η προσθήκη ενός μικρού ποσοστού πυριτίου στο σίδηρο (πυρίτιο-σίδηρος), δημιουργεί το υλικό που είναι γνωστό και ως πυριτιούχος χάλυβας, ο οποίος έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση, μειώνοντας έτσι τα επαγόμενα δινορρεύματα. Ο πυριτιούχος χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως στους μετασχηματιστές ισχύος και στις ηλεκτρικές μηχανές. Γενικά πάντως για τον εμπορικό σίδηρο (προσμίξεις από 0,2% και κάτω) παρουσιάζονται μεγάλα δινορρεύματα απωλειών και: $\mu_0 H_c < 10^{-4}$, $B_{\text{κορ}} = 2,2$, $B_r < 0,1$, $\mu_{ri} = 150$, $\mu_{r,\text{max}} = 10^4$ και $W_h = 250$.

Οι φερρίτες είναι σιδηρομαγνητικά υλικά και είναι συνήθως ανάμικτα οξειδία μεταβατικών μετάλλων, ένα από τα οποία είναι ο σίδηρος. Ο φερρίτης Mn για παράδειγμα έχει χημικό τύπο $MnFe_2O_4$ και ο φερρίτης MgZn χημικό τύπο $Mg_{1-x}Zn_xFe_2O_4$. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως μονωτές και επομένως δεν αναπτύσσονται σε αυτά δινορρεύματα απωλειών. Τα υλικά αυτά είναι χρήσιμα σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, όπου οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων καθιστούν απαγορευτική τη χρήση οποιουδήποτε υλικού με μη μηδενική αγωγιμότητα. Μολονότι χαρακτηρίζονται από υψηλή αρχική διαπερατότητα και χαμηλές απώλειες, δεν έχουν το ίδιο μεγάλη μαγνήτιση κόρου όσο οι σιδηρομαγνήτες, και επιπλέον η θερμοκρασία χρήσεώς τους (που καθορίζεται από τη θερμοκρασία Curie) είναι μικρότερη. Υπάρχουν πολλοί τύποι εμπορικών φερριτών. Ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθούν, διαφέρουν στις αντοχές απωλειών τους και στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Οι φερρίτες MnZn για παράδειγμα έχουν υψηλή αρχική διαπερατότητα αλλά είναι χρήσιμοι μόνο μέχρι το 1MHz, ενώ οι φερρίτες NiZn από την άλλη έχουν μεν μικρότερη αρχική διαπερατότητα αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι τα 200MHz. Η αρχική διαπερατότητα μειώνεται εν γένει στην περιοχή των υψηλών συχνοτήτων αυξανόμενης της συχνότητας. Ενδεικτικές εφαρμογές: εφαρμογές HF μικρών απωλειών. Η χαμηλή αγωγιμότητά τους εν ολίγοις συνεπάγεται πολύ μικρά δινορρεύματα απωλειών. Αξιοποιούνται σε μετασχηματιστές HF, σε επαγωγείς και σε κεφαλές εγγραφής. $\mu_0 H_c = 10^{-5}$, $B_{κορ} = 0,4$, $B_r < 0,01$, $\mu_{ri} = 2 \times 10^3$, $\mu_{r, max} = 5 \times 10^3$ και $W_h < 0,01$.

II) Α. Ηλεκτρικός Χάλυβας:

Ο ηλεκτρικός χάλυβας (electrical steel), επίσης γνωστός και ως πυριτιούχος χάλυβας (silicon electrical steel, ή απλά silicon steel), ελασματοποιημένος/ διαστρωματοποιημένος χάλυβας (lamination steel), αναμεταδοτικός χάλυβας ρελέ (relay steel) ή χάλυβας μετατροπέων/ μετασχηματιστών (transformer steel), είναι είδος χάλυβα προσαρμοσμένο να διαθέτει συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες, όπως μικρό εμβαδό βρόγχου υστέρησης, που μεταφράζεται ουσιαστικά ως μικρές απώλειες ενέργειας για κάθε κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης, μεγάλη μαγνήτιση κόρου, ελάχιστες ή μηδενικές απώλειες υστέρησης, ελάχιστη ή μηδενική παραμένουσα μαγνήτιση, δηλαδή είναι κράμα χάλυβα κατασκευασμένο έτσι με απώτερο σκοπό να διαθέτει ιδιότητες μαλακού υλικού, με την ειδοποιό διαφορά ότι, σε σχέση με άλλους κοινούς ανθρακούχους και κραματωμένους χάλυβες που επίσης χαρακτηρίζονται από παρόμοιες μαγνητικές ιδιότητες, η προσθήκη σε αυτούς μικρό ποσοστό πυριτίου στο σίδηρο. Εξού και η ονομασία πυριτιούχος ηλεκτρικός χάλυβας. Η προσθήκη αυτή καθιστά τον χάλυβα να διαθέτει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση, μειώνοντας έτσι τα τυχόν επαγόμενα δινορρεύματα, άρα και μειώνοντας ανεπιθύμητες απώλειες Joule (Rl^2). Επίσης διακρίνονται για την πολύ υψηλή μαγνητική διαπερατότητά τους. Ο πυριτιούχος χάλυβας χρησιμοποιείται ευρέως στους μετασχηματιστές ισχύος και σε ηλεκτρικούς κινητήρες.

Το υλικό αυτό συνήθως κατασκευάζεται σε μορφή λωρίδων/ελασμάτων ψυχρής έλασης (cold-rolled strips), πάχους λιγότερο από 2mm. Αυτές οι λωρίδες αποτελούν τα στρώματα (laminations) και 'στοιβαγμένα' μαζί σχηματίζουν τον διαστρωματικό πυρήνα (laminated core), που με τη σειρά του αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των μετασχηματιστών (transformers), των επαγωγών ή αλλιώς στατών (stator) και ροτόρων ή αλλιώς στροφείων (rotors) των ηλεκτρικών κινητήρων. Τα λεπτά αυτά στρώματα, που μαζί σχηματίζουν τον πυρήνα, μορφοποιούνται στο κατάλληλο σχήμα με διάτρηση δια πίεσεως (punch and die) ή, για μικρότερες ποσότητες, μέσω κοπής δια χρήσεως laser ή διάβρωση σύρματος (wire erosion).

1. Μεταλλουργικά στοιχεία:

Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι σιδηρούχο κράμα που, σε γενικές γραμμές, δύναται να περιέχει από 0% ως 6,5% πυρίτιο (αναλογία Si:5Fe). Τα κράματα του εμπορίου συνήθως έχουν πυρίτιο ως και 3,2%, με τις υψηλότερες περιεκτικότητες να καθιστούν κράμα σχετικά υψηλότερης σκληρότητας και χαμηλότερης ευθραυστότητας κατά τη διάρκεια της ψυχρής έλασης. Μαγγάνιο και αλουμίνιο επίσης περιέχονται αλλά σε μικρότερα ποσοστά, με το ανώτατο όριο να κυμαίνεται γύρω στο 0,5%.

Το υλικό-βάση, από το οποίο παράγονται γενικά τα κράματα σιδήρου πυριτίου είναι το σιδηροπυρίτιο (Ferrosilicon), το οποίο αποτελεί κράμα σιδήρου πυριτίου με μέση περιεκτικότητα πυριτίου να κυμαίνεται από 15 ως και 90% κατά βάρος [8]. Επίσης περιέχονται μεγάλα ποσοστά πυριτιδίων σιδήρου (iron silicides). Το σιδηροπυρίτιο παράγεται με αναγωγή πυριτίας ή άμμου με κοκ, παρουσία πηγής

σιδήρου όπως το scrap. Σιδηροπυρίτιο με περιεκτικότητες Si περίπου 15% και κάτω παράγονται σε υψικαμίνους (blast furnace), ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά η παραγωγή λαμβάνει χώρα σε καμίνους ηλεκτρικού τόξου (electric arc furnace). Η υπεραφθονία πυριτίας εξυπηρετεί στην αποφυγή σχηματισμού καρβιδίων πυριτίου.



Εικόνα 1.1: Σιδηροπυρίτιο.

Το πυρίτιο αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση του χάλυβα, με φυσικό επακόλουθο να παρουσιάζεται σημαντικά μειωμένη η εμφάνιση δινορρευμάτων (eddy currents), καθώς και με περαιτέρω εκλέπτυνση του βρόγχου υστέρησης (εικόνα 1, παραπάνω), άρα και του εμβαδόν του, άρα και των απωλειών ενέργειας κατά των κύκλων μαγνήτισης και απομαγνήτισης. [9] Όμως, η κρυσταλλική δομή που προκύπτει προκαλεί σκλήρυνση και ευθραυστοποίηση του μετάλλου, γεγονός που επηρεάζει δυσμενώς την κατεργασιμότητά του, ειδικά όσο αφορά την ψυχρή έλαση.

Όταν πραγματοποιείται η σύνθεση και κραμάτωση του χάλυβα αυτού, τα επίπεδα του άνθρακα, θείου, οξυγόνου και αζώτου πρέπει να διατηρούνται όσο γίνεται πιο χαμηλά, καθώς τα συγκεκριμένα στοιχεία ευνοούν τον σχηματισμό ανεπιθύμητων καρβιδίων, σουλφιδίων, οξειδίων και νιτριδίων αντίστοιχα, η παρουσία των ενώσεων αυτών, ακόμα και σε σωματιδιακά μεγέθη μικρά όσο ένα μικρόμετρο σε διάμετρο, επηρεάζει επίσης δυσμενώς την κατεργασιμότητα, τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς και τις μαγνητικές ιδιότητες, καθώς «σκληραίνουν» μαγνητικά το υλικό, πλαταίνει ο βρόγχος υστέρησης και κατ' επέκταση οι απώλειες ενέργειας (hysteresis losses) κατά την μαγνήτιση-απομαγνήτιση, παρεμποδίζουν την περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, δρουν ως εμπόδια στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και προκαλούν πτώση της μαγνητικής διαπερατότητας (magnetic permeability). Η παρουσία του άνθρακα έχει πιο επιβλαβείς επιπτώσεις από ότι το θείο ή το άζωτο, καθώς προκαλεί μαγνητική γήρανση (magnetic aging) όταν με αργό ρυθμό εγκαταλείπει (λόγω των συνθηκών λειτουργίας του χάλυβα) το στερεό μητρικό διάλυμα και κατακρημνίζεται σε μορφή καρβιδίων στα όρια των κόκκων, με φυσικό επακόλουθο την μακροχρόνια απώλεια ενέργειας. Για αυτούς τους λόγους, ο άνθρακας συνιστάται να διατηρείται στα όσο το δυνατόν χαμηλότερα επιτρεπτά επίπεδα (ακόμα και χαμηλότερα του 0,005%). Τα επίπεδα του εμπεριεχομένου άνθρακα δύναται να πέσουν με ανόπτηση του χάλυβα σε ατμόσφαιρα απουσίας άνθρακα, με παροχή προστατευτικού αερίου υδρογόνου.

2. Προσανατολισμός κόκκων:

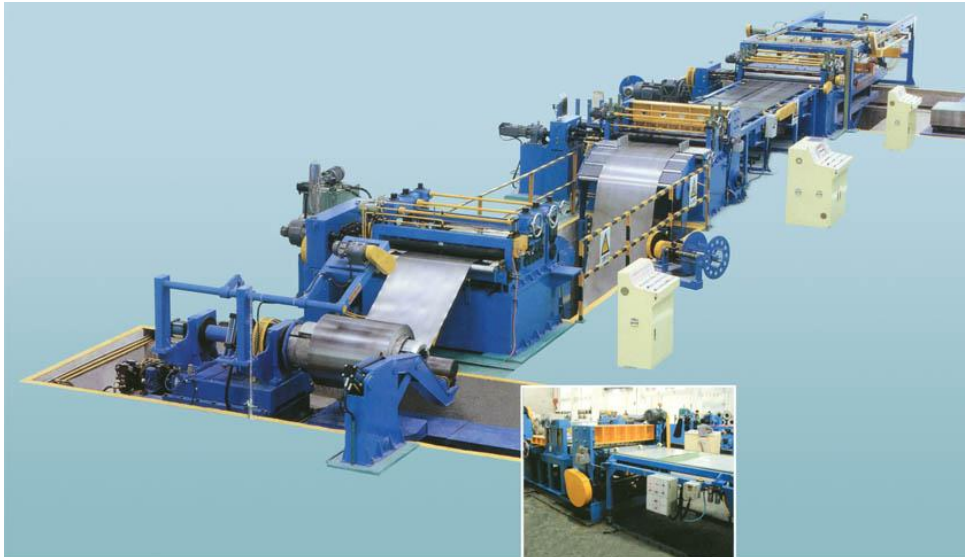
Όταν ο ηλεκτρικός χάλυβας δεν υπόκειται σε κάποια κατεργασία προκειμένου να επιτευχθεί συγκεκριμένος προσανατολισμός των κόκκων, οι συνήθεις περιεκτικότητες σε πυρίτιο κυμαίνονται μεταξύ 2 και 3,5%, ενώ οι μαγνητικές ιδιότητες παραμένουν ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις και θέσεις, τόσο σε μικροσκοπικό όσο και μακροσκοπικό επίπεδο, είναι δηλαδή ιστροπικός (isotropic). Ο τύπος αυτός χάλυβα συναντάται με τη συντομογραφία CRNGO (Cold-Rolled Non-Grain Oriented steel).

Αντίθετα, ο ηλεκτρικός χάλυβας συγκεκριμένου προσανατολισμού κόκκων (Grain Oriented Electrical Steel, ή αλλιώς CRGO, συντομογραφία του Cold-Rolled Grain Oriented steel) περιέχει συνήθως 3% Si (Si:11Fe) και κατεργάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε στον άξονα της ψυχρής έλασης να επιτυγχάνονται οι καλύτερες κατά δύναμιν ιδιότητες, χάρη στον αυστηρό έλεγχο του προσανατολισμού των κόκκων σε σχέση με το έλασμα. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής (magnetic flux density) στον άξονα προσανατολισμού των κόκκων δύναται να φτάσει ως και το 30% παραπάνω από έναν χάλυβα CRNGO, αν και η μαγνήτιση κορεσμού στον ίδιο άξονα ενδέχεται να παρουσιαστεί μειωμένη ως και 5%. Αυτό εφαρμόζεται για παραγωγή πυρήνων μετασχηματιστών διανομής και ενέργειας μεγάλου μεγέθους και 'φόρτου' εργασίας.

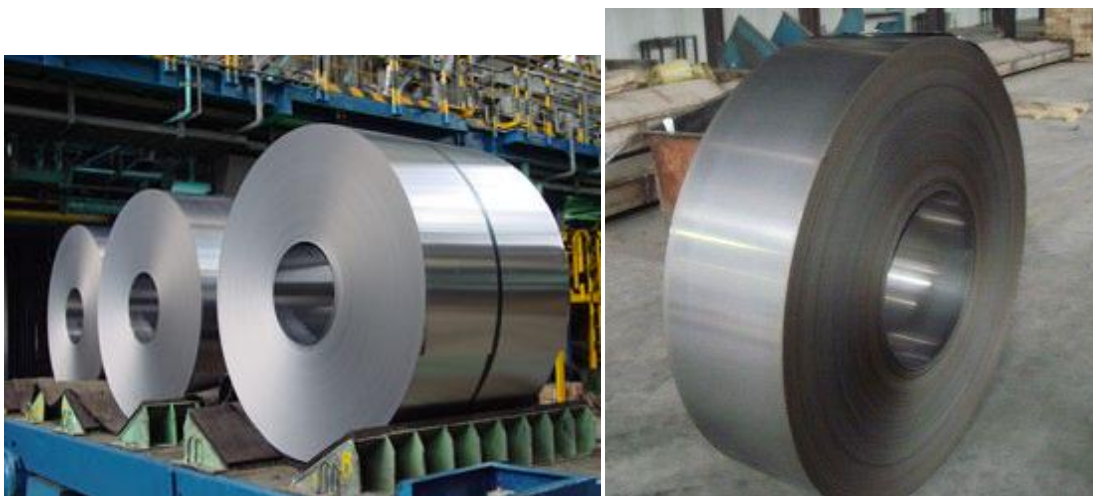
Ο χάλυβας CRGO συνήθως παράγεται σε ρολά φύλλων και στη συνέχεια κόβεται σε λεπτά ελάσματα, προκειμένου να κατασκευαστούν με τη σειρά τους αλληπάλληλα στρώματα σχηματίζοντας τους πυρήνες, αναπόσπαστα τμήματα των μετασχηματιστών.



Εικόνα 2.1: Συνήθης μικροδομή που απαντάται σε ηλεκτρικούς χάλυβες μη προσανατολισμένων κόκκων.



Εικόνα 2.2: Παραγωγή φύλλων ηλεκτρικού χάλυβα.



Εικόνα 2.3: Ρολά/κουλούρες φύλλων ηλεκτρικού χάλυβα.



Εικόνα 2.4: Βασικές εφαρμογές ηλεκτρικού χάλυβα (γεννήτριες – μετασχηματιστές).

Ο ηλεκτρικός χάλυβας προσανατολισμένης κρυσταλλικής δομής χρησιμοποιείται ευρέως σε μετασχηματιστές υψηλής ισχύος και μεγάλης διανομής ενέργειας, καθώς και σε ορισμένους μετασχηματιστές σε εφαρμογές παραγωγής ήχου [10].

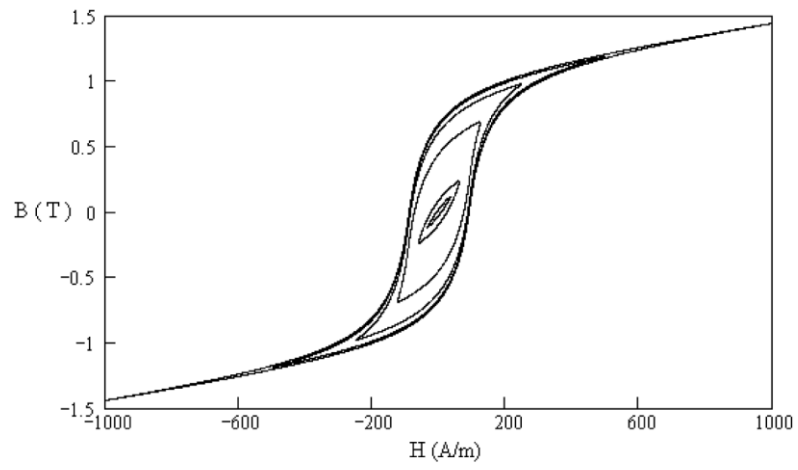
Ο τύπος CRNGO είναι λιγότερο ακριβός απ'ότι ο CRGO και αξιοποιείται σε εφαρμογές όπου πρώτη προτεραιότητα αποτελεί το κόστος και δεύτερη η αποτελεσματικότητα, καθώς και σε εφαρμογές όπου η μαγνητική ροή δεν είναι απολύτως σταθερή ή προσανατολισμένη σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, όπως λόγω χάρη σε ηλεκτρικούς κινητήρες και γεννήτριες, αποτελούμενα από κινούμενα μέρη. Αξιοποιείται, επιπροσθέτως, σε εφαρμογές σχετικά μικρού μεγέθους και έκτασης, όπου ο πολύ περιορισμένος χώρος δεν προσφέρεται για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρει ο ηλεκτρικός χάλυβας προσανατολισμένης μικροδομής.

Τέλος, υπάρχει και ο άμορφος ηλεκτρικός χάλυβας (amorphous steel), ο οποίος στην παρούσα εργασία δεν θα μας απασχολήσει, οπότε και θα αναφερθούμε απλώς πολύ περιληπτικά. Πυρήνες στρωματώσεων άμορφου ηλεκτρικού χάλυβα παρουσιάζουν ενεργειακές απώλειες της τάξης του ένα τρίτου των λοιπών κοινών ανθρακούχων χαλύβων. Πρόκειται για «μεταλλικό γυαλί» (“metallic glass”), παραγώμενο με χύτευση πυριτιούχου κράματος χάλυβα εντός περιστρεφόμενου και συνεχώς ψυχόμενου δίσκου, όπου ψύχει το τηγμένο μέταλλο με ταχύτατους ρυθμούς (της τάξης του 1MKelvin ανά second), ρυθμός δηλαδή που δρα απαγορευτικός στην ομαλή στερεοποίηση και κρυστάλλωση (σχηματισμό κόκκων). Ο άμορφος αυτός ηλεκτρικός χάλυβας έχει φτωχότερες μηχανικές ιδιότητες και το κόστος παραγωγής του διαμορφώνεται (σύμφωνα με στοιχεία του 2010) σε ύψος σχεδόν διπλάσιο, σε σχέση με αυτό ενός συμβατικού ψυχρά ελασσόμενου χάλυβα. Το γεγονός αυτό τον καθιστά αξιοποιήσιμο, από άποψη καθρά σχέσης κόστους – απόσβεσης, μόνο σε περιπτώσεις μεγάλης εμβέλειας εφαρμογών, όπως μετασχηματιστές υψηλής διανομής ενέργειας [11].

3) Μαγνητικές ιδιότητες ηλεκτρικών χαλύβων:

Οι μαγνητικές ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την υποβαλλόμενη θερμική κατεργασία, καθώς με αυτήν συνδέεται άρρηκτα το μέσο μέγεθος των κόκκων που προκύπτει στη μικροδομή. Η αύξηση του μεγέθους των κόκκων έχει ως αντίκτυπο τη μείωση των απωλειών υστέρησης. Αυτές οι απώλειες ενέργειας καθορίζονται με ειδικό στάνταρ τέστ και δύνανται να κυμαίνονται, για τους πιο κοινούς τύπους ηλεκτρικού χάλυβα σε εύρος 2 ως 10Watt/kg (1-5Watt/pound), σε συχνότητα 60Hz και με μαγνητικό πεδίο ισχύος 1,5Tesla. Ημι-κατεργασμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες παραδίδονται για περαιτέρω επεξεργασία σε τέτοια κατάσταση ώστε όταν πια έχει διαμορφωθεί το τελικό τους σχήμα, η τελική θερμική κατεργασία να αποφέρει κόκκους μέσου μεγέθους 150μm, διάμετρος αποδεκτή και επιθυμητή. Οι πλήρως επεξεργασμένοι χάλυβες συνήθως παραδίδονται με μονωτική επίστρωση, πλήρως κατεργασμένοι θερμικά και με συγκεκριμένες τελικές μαγνητικές ιδιότητες, με απότερο σκοπό την αξιοποίησή τους σε εφαρμογές όπου η τελική μορφοποίηση σχήματος δεν ενδέχεται να υποβαθμίσει τις ιδιότητες αυτές. Λυγισμός από ένα βαθμό και πάνω, λανθασμένη θερμική επεξεργασία και ψύξη, αντίξοες συνθήκες λειτουργίας, συγκολλήσεις (όπως θα δούμε στη συνέχεια) και άλλες διεργασίες που προκαλούν σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις, επηρεάζουν δυσμενώς τις μαγνητικές ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα και ενδέχεται να προκαλέσουν αύξηση στο θόρυβο λόγω της μαγνητοσυστολής [12][13].

Τέλος, να αναφέρουμε ότι το μέγεθος των μαγνητικών περιοχών σε φύλλο/έλασμα μπορεί να μειωθεί με χάραξη της επιφάνειας με τη χρήση είτε δέσμης laser, είτε μηχανικών και μηχανουργικών μέσων, με επακόλουθο την περαιτέρω μείωση των απωλειών υστέρησης στον συναρμολογημένο πυρήνα.



Εικόνα 3.1: Παράδειγμα θρόγχου υστέρησης ηλεκτρικού χάλυβα.

III) A. Συγκολλήσεις:

Τις μεθόδους σύνδεσης των μετάλλων μπορούμε να τις ταξινομήσουμε σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: μεθόδους μηχανικής σύνδεσης (χρησιμοποιούνται «στοιχεία σύνδεσης» όπως οι ηλώσεις και κοχλιώσεις), μεταλλουργικές μεθόδους σύνδεσης ή συγκολλήσεις (όπου τα μέταλλα συνενώνονται με τη βοήθεια μεταλλουργικών φαινομένων όπως τήξη, διάχυση και σχηματισμό στερεού διαλύματος) και μεθόδους σύνδεσης με κόλλες (στην πλειοψηφία τους είναι οργανικής φύσης). Στην παρούσα εργασία επειδή αξιοποιήθηκε μέθοδος της δεύτερης κατηγορίας, θα αναπτύξουμε λίγο περισσότερο το θέμα των συγκολλήσεων.

Η μέθοδο των συγκολλήσεων αποτελεί τη σπουδαιότερη τεχνική σύνδεσης μετάλλων και κραμάτων, καθώς χαρακτηρίζεται από υψηλή παραγωγικότητα, οικονομία και υψηλές λειτουργικές αποδόσεις. Υποδιαιρείται με τη σειρά της σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Συγκόλληση χαμηλής θερμοκρασίας (κασσιτεροκόλληση, soldering).
2. Συγκόλληση μέσης θερμοκρασίας (μπρουτζοκόλληση, ασημοκόλληση, brazing).
3. Συγκόλληση υψηλής θερμοκρασίας (αυτογενής ή αλλιώς συγκόλληση με τήξη, autogenous or fusion welding). [14]

B. Συγκόλληση με τήξη:

1. Κατηγορίες:

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με τήξη έναντι των άλλων τεχνικών είναι η μεγάλη αντοχή της σύνδεσης, η οποία μπορεί να φθάσει και να υπερβεί την αντοχή των συνδεόμενων μετάλλων, η εξασφαλισμένη στεγανότητα της σύνδεσης σε υγρά και αέρια, οι πρακτικά απεριόριστες δυνατότητες σύνδεσης, ανεξάρτητα από το σχήμα, πάχος και γεωμετρία των ελασμάτων, καθώς και η οικονομία που εξασφαλίζεται, από άποψη υλικού, χρόνου κατασκευής, ημερομισθίων κλπ.

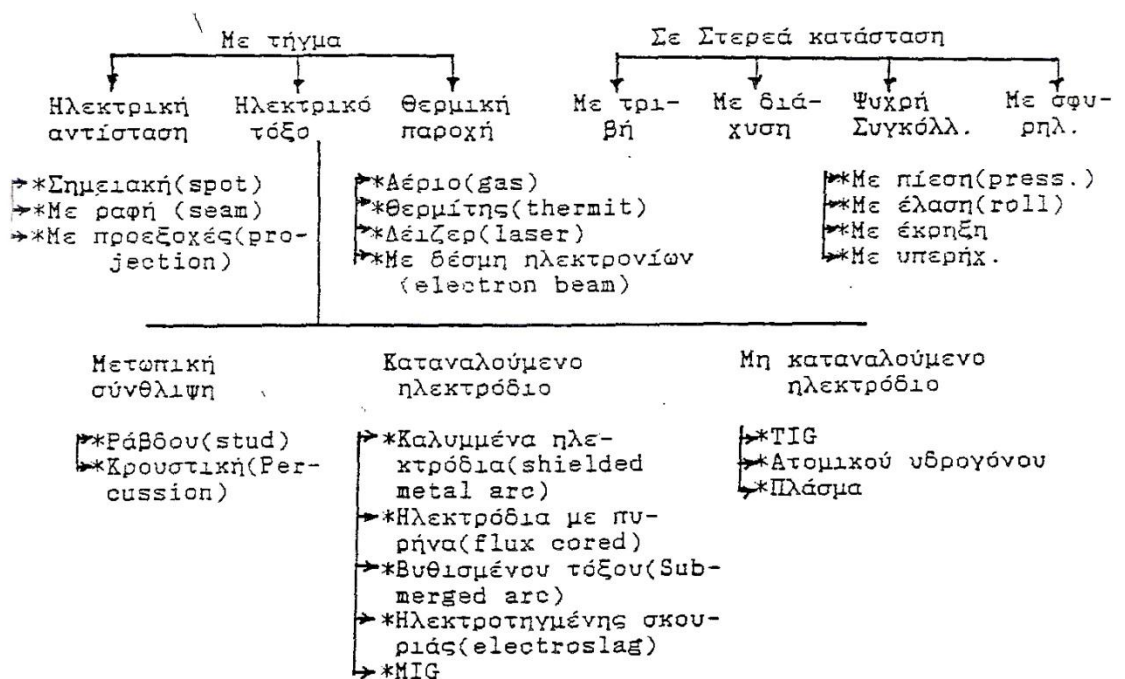
Τα μειονεκτήματα όμως είναι ο αυξανόμενος κίνδυνος ψαθυρής θραύσης, οφειλόμενη στη μονολιθικότητα των κατασκευών που πραγματοποιούνται με τέτοιες τεχνικές συγκόλλησης και στα τυχόν εσωτερικά ελαττώματα της συγκόλλησης, ο κίνδυνος στρέβλωσης και πλαστικής παραμόρφωσης των κατασκευών λόγω των θερμικών διαστολών, η δυσκολία συγκόλλησης ορισμένων μετάλλων/ κραμάτων που είναι επιρρεπή σε ψαθυροποίηση και παρουσίαση εσωτερικών ελαττωμάτων, ενώ τέλος ένα σημαντικό μειονέκτημα, που στην παρούσα εργασία εξετάζουμε κατά πόσο μπορούμε να εξαλείψουμε με τη μέθοδο του Barkhausen Noise Analysis, η δυσκολία διαπίστωσης της ύπαρξης ή μη εσωτερικών ελαττωμάτων με υπάρχουσες μη καταστρεπτικές δοκιμές.

Οι διάφορες τεχνικές της κατηγορίας των συγκολλήσεων με τήξη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο προσφοράς θερμότητας ή με βάση την προστασία του τήγματος από την ατμόσφαιρα και των ανεπιθύμητων στοιχείων

αυτής που δύναται να επηρεάσουν δυσμενώς την ποιότητα συγκόλλησης, ή ακόμα και με βάση άλλα τεχνολογικά χαρακτηριστικά. Παρακάτω παραθέτονται οι κατηγορίες αυτές συνοπτικά (Εικόνα 1.1 & 1.2).

- | | |
|-------------|---|
| ΘΕΡΜΑΝΣΗ | α) Με ηλεκτρικό τόξο (electric arc) |
| 1) ΜΕ | β) Με ηλεκτρική αντίσταση (electric resistance) |
| ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟ | γ) Με επαγωγική αντίσταση (induction) |
| | |
| 2) ΘΕΡΜΑΝΣΗ | α) Με φλόγα καυσίμου αερίου (oxyfuel gas) |
| ΘΕΡΜΟΧΗ- | β) Με πλάσμα (plasma arc welding) |
| ΜΙΚΗ | γ) Με εξωθερμική αντίδραση(thermit) |
| | |
| 3) ΜΕ ΑΚΤΙ- | α) Με δέσμη ηλεκτρονίων (electron beam) |
| ΝΟΒΟΛΙΑ | β) Με λέιζερ (laser) |
| | |
| 4) ΧΩΡΙΣ | α) Με συμπίεση (compression) |
| ΘΕΡΜΑΝ- | β) Με τριβή (friction) |
| ΣΗ | γ) Με έκρηξη(explosive welding) |

Εικόνα 1.1: Ταξινόμηση συγκολλήσεων με βάση τον τρόπο θέρμανσης.



Εικόνα 1.2: Συνοπτικός πίνακας τεχνικών συγκόλλησης με τήξη.

Τέλος, να αναφέρουμε περιληπτικά ότι, ως προς την προστασία του τήγματος από τυχόν ανεπιθύμητες οξειδώσεις ή προσμίξεις προκαλούμενες ή

προερχόμενες αντίστοιχα από τον ατμοσφαιρικό αέρα και τα περιεχόμενα σε αυτόν στοιχεία, διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες τεχνικών συγκόλλησης: χωρίς προστασία (no shielding), με απλή εκδίωξη του αέρα με συμπίεση των προς συγκόλληση επιφανειών μεταξύ τους (mechanical exclusion of air), υπό κενό (vacuum), σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (inert gas), σε ατμόσφαιρα δραστικού αερίου (active gas) και κάτω από σκουριά συλλιπάσματος (flux).

2. Γενικά χαρακτηριστικά συγκολλήσεων υψηλής θερμοκρασίας:

Όπως προ-αναφέραμε, η συγκόλληση υψηλής θερμοκρασίας είναι ταυτόσημη της συγκόλλησης με τήξη ή αλλιώς αυτογενής, και είναι η διαδικασία συνένωσης δύο μεταλλικών τεμαχίων τα οποία βρίσκονται σε στενή επαφή, ίσως και με άσκηση πίεσης, ενώ συγχρόνως θερμαίνουμε γύρω από τις εφαιπτόμενες επιφάνειες, έως ότου επέλθει η πλαστικοποίηση ή τήξη, προκειμένου να συνενωθούν.

Η συνένωση αυτή εξασφαλίζεται με διάχυση ατόμων μετάλλου από το ένα μεταλλικό τεμάχιο στο άλλο και με τοπική αναδόμηση των κόκκων, εξού και η ονομασία αυτογενής συγκόλληση σε στερεά κατάσταση, ή με στερεοποίηση τήγματος, προερχόμενο από τα δύο θερμαινόμενα άκρα των τεμαχίων, σε συνεπαφή, εξού και η ονομασία συγκόλληση με τήξη. Πρόκειται ουσιαστικά για σύμφυση (coalescence) των δύο τεμαχίων. Και οι δύο περιπτώσεις διέπονται από τους ίδιους μηχανισμούς: διάχυση ατόμων, δημιουργία νέων κόκκων είτε με στερεοποίηση του τήγματος είτε με ανακρυστάλλωση, και σχηματισμό στερεών διαλυμάτων. Αποτέλεσμα αυτών των μηχανισμών είναι η μόνιμη πια σύνδεση των δύο τεμαχίων.

Συνήθως, στην σύγχρονη πρακτική, αντί τα τεμάχια να βρίσκονται σε στενή επαφή, υπάρχει και η δυνατότητα να 'γεφυρώσουμε' το διάκενο μεταξύ των δύο άκρων τους με προσθήκη τήγματος προερχόμενο είτε από καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο είτε με σύρμα ίδιας ή παραπλήσιας σύνθεσης με τα προς συγκόλληση μέταλλα. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στη συναρμολόγηση σύνθετων ή/και μεγάλων κατασκευών.

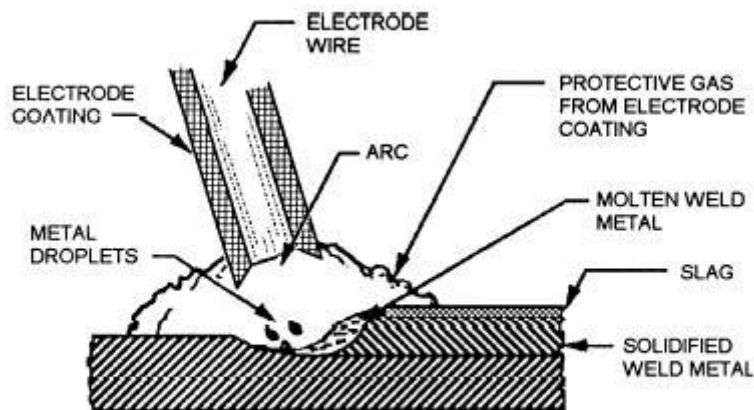
Δυστυχώς, ακόμα και η καλύτερη συγκόλληση απέχει από το ιδανικό, σύνδεση δηλαδή χαρακτηριζόμενη από πλήρη ομοιογένεια στη σύνθεση, μικροδομή και ιδιότητες (μηχανικές και μαγνητικές) σε σχέση με τα συνενωμένα τεμάχια. Συνήθως περιοριζόμαστε σε επίτευξη ικανοποιητικών ιδιοτήτων, όπως αντοχής, διάβρωσης κλπ, στην περιοχή συγκόλλησης και στις γειτονικές θερμικά επηρεασμένες ζώνες.

Μέταλλα και κράματα για τα οποία έχει επιτευχθεί τεχνολογικά άρτια συγκολλησιμότητα (ιδιότητα δηλαδή που αναφέρεται στη δυνατότητα πραγματοποίησης ικανοποιητικών ιδιοτήτων συγκόλλησης) είναι οι κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες, οι ελαφρά κραματωμένοι και μικροκραματωμένοι χάλυβες μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι ανοξειδωτοι και ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, καθώς και μέταλλα με εκτεταμένες βιομηχανικές εφαρμογές (νικέλιο,

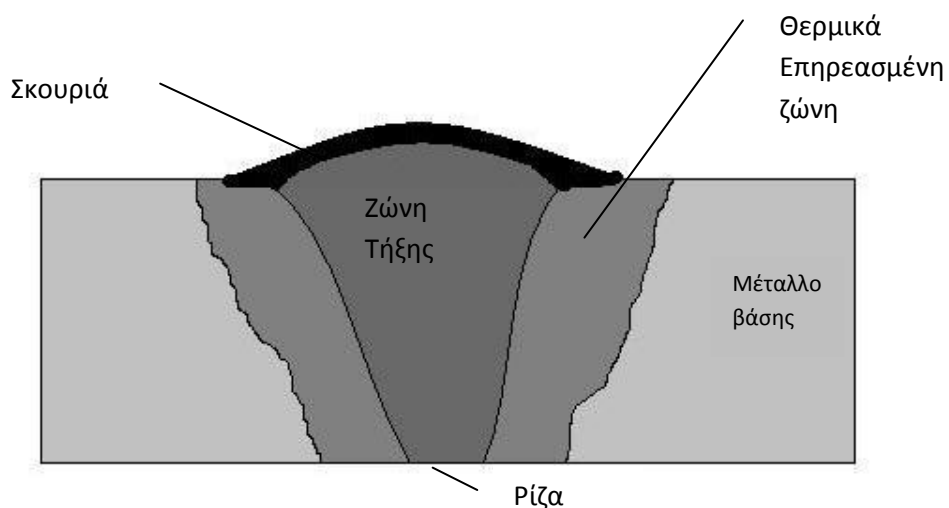
χαλκός, αλουμίνιο, τιτάνιο και τα κράματά τους), ομοίως και λιγότερο συνηθισμένα ή ιδιόμορφα στη συμπεριφορά μέταλλα όπως ο μόλυβδος, ζιρκόνιο, βηρύλιο, βολφράμιο και το μολυβδένιο, καθώς και την πλειοψηφία των πολύτιμων μετάλλων.

3. Συγκόλληση τόξου: Γενικά χαρακτηριστικά:

Μια απλοποιημένη μορφή συγκόλλησης ηλεκτρικού τόξου δίδεται στις παρακάτω εικόνες (3.1 & 3.2).



Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης τόξου (συγκεκριμένα με ντυμένο ηλεκτρόδιο. Διατομή παράλληλη στη ραφή συγκόλλησης).



Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση συγκόλλησης τόξου (κάθετη στη ραφή της συγκόλλησης διατομή).

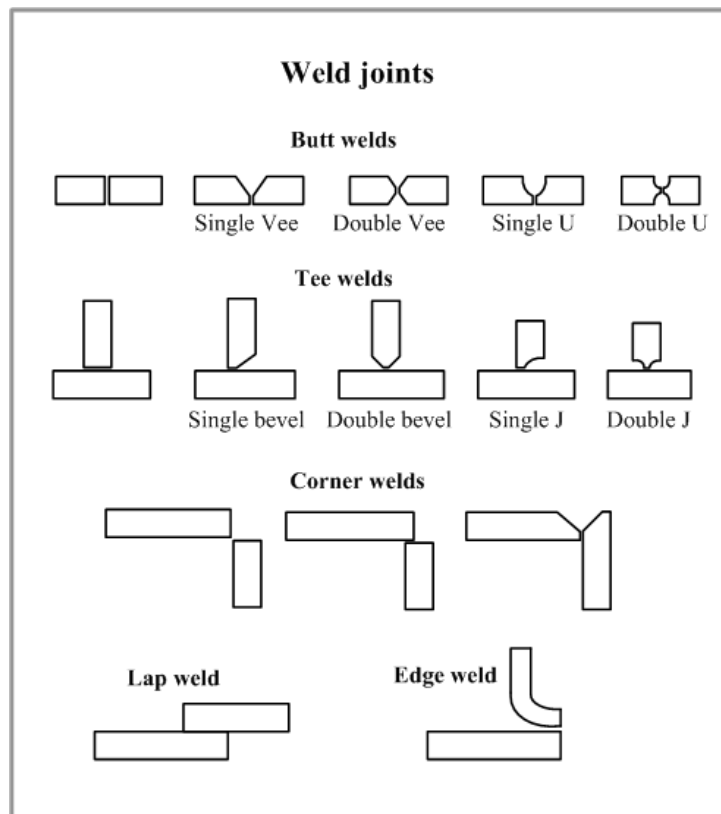
Τα τεμάχια που συγκολλούνται χαρακτηρίζονται ως μέταλλο βάσης, ενώ το τηγμένο μέταλλο που προστίθεται ονομάζεται μέταλλο προσθήκης ή συγκόλλησης.

Το ηλεκτρικό τόξο προκαλείται από μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο μέταλλο βάσης και το ηλεκτρόδιο, που είναι μεταλλικό σύρμα, συνήθως επικαλυμμένο εξωτερικά με κατάλληλο μεταλλουργικό συλλίπασμα προκειμένου να σχηματιστεί σκουριά που δρα προστατευτικά στη ζώνη τήξης, ώστε να μην αλληλεπιδράσει με τον ατμοσφαιρικό αέρα και προκύψουν οξειδώσεις που υποβαθμίζουν τις ιδιότητες της σύνδεσης. Παρακάτω θα ασχοληθούμε με την μέθοδο TIG, όπου δεν υφίσταται καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο, οπότε δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω σε αυτό το θέμα. Το τηγμένο μέταλλο προστατεύεται λοιπόν από τη σκουριά που το καλύπτει και μετά το πέρας της συγκόλλησης, όντας εύθραυστη, απομακρύνεται με χτυπήματα σφυριού.

Κατά τη συγκόλληση τήκεται ένα μέρος του μετάλλου βάσης από τις συγκολλούμενες παρειές και αναμειγνύονται, είτε μεταξύ τους, είτε με το τηγμένο μέταλλο προσθήκης (όπως στη μέθοδο που μας αφορά και θα αναφέρουμε παρακάτω, την μέθοδο TIG και τα fillers), είτε με το τήγμα που προέρχεται από το ηλεκτρόδιο (σε περίπτωση που χρησιμοποιείται κατάλληλο καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο). Η αναλογία του μετάλλου βάσης προς το συνολικό μέταλλο βάσης και ηλεκτροδίου που συμμετέχει στο τήγμα χαρακτηρίζεται ως αραίωση.

Σε άμεση επαφή με το στερεοποιημένο τήγμα που ονομάζεται ζώνη τήξης βρίσκεται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Πρόκειται για μια περιοχή του μετάλλου που δεν έφθασε στη θερμοκρασία τήξης, έφθασε όμως σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία ώστε να υποστεί είτε μετασχηματισμούς φάσεων, είτε ανακρυστάλλωση, είτε μεγέθυνση των κόκκων.

Για τη συγκόλληση ελασμάτων ή δομικών προφίλ, οι μορφές συγκόλλησης εμπίπτουν συνήθως σε μια από τις εξής κατηγορίες: μετωπική, με επικάλυψη, γωνιακή και ταύ (Εικόνα 3.3).



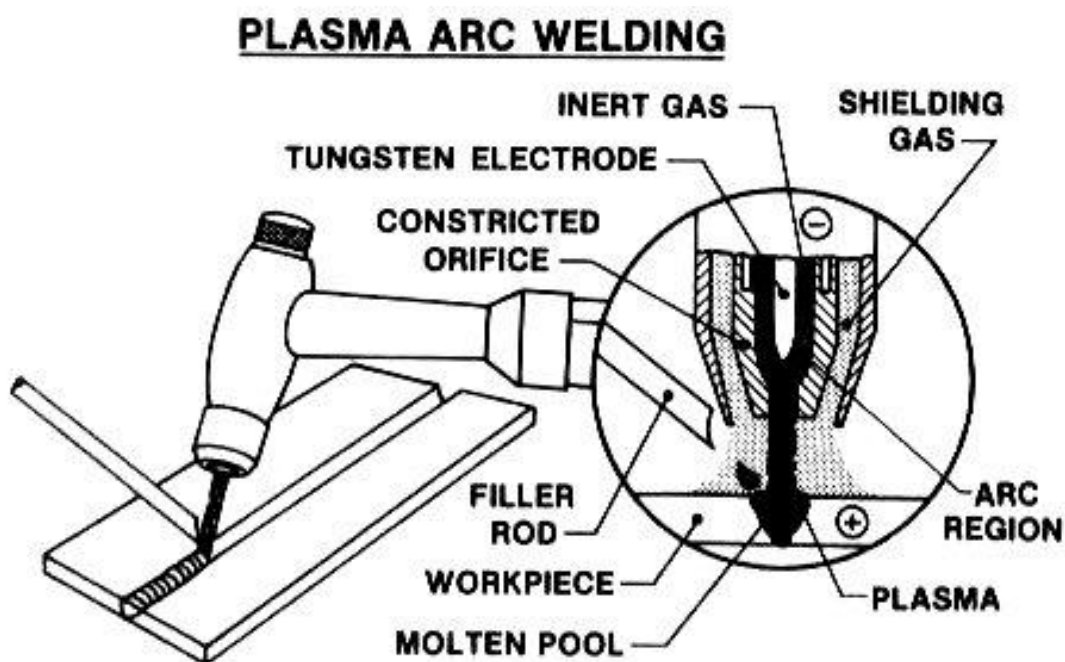
Εικόνα 3.3: Διάφοροι τύποι συγκολλητών συνδέσεων (από πάνω προς τα κάτω: πρώτη σειρά, μετωπικές, με διαφορετικές λοξοτομές, δεύτερη σειρά συνδέσεις σε σχήμα T, Τρίτη σειρά γωνιακές συνδέσεις, τέταρτη και τελευταία σειρά συγκολλήσεις με επικάλυψη).

4. Το Ηλεκτρικό Τόξο:

Το ηλεκτρικό τόξο είναι η βάση πολλών τεχνικών συγκόλλησης, των οποίων το κύριο γνώρισμα είναι η τήξη ενός μετάλλου προσθήκης μεταξύ των τεμαχίων που συγκολλούνται. Ο ρόλος του είναι διττός, καθώς χρησιμεύει ως πηγής θερμότητας, και αποδεικνύεται οικονομική, εύχρηστη, εύκολα ελεγχόμενη και υψηλής έντασης, ώστε να επιφέρει την επιθυμητή τήξη σε συγκεκριμένη στοχευμένη περιοχή. Επίσης όμως χρησιμεύει και για να οδηγεί το τηγμένο μέταλλο, το οποίο είναι σε μορφή σταγονιδίων, σε περίπτωση χρησιμοποίησης filler / καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου, προς τη θέση συγκόλλησης.

Το τόξο δημιουργείται από την τάση μιας συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος πηγής, ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το μέταλλο που συγκολλούμε. Πρόκειται ουσιαστικά για μια φωτεινή ηλεκτρική εκκένωση δια μέσου ιονισμένου αερίου, γνωστό και ως πλάσμα. Η εκκένωση έχει τη μορφή καμπάνας, στον κεντρικό άξονα της οποίας οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται δύναται να φτάσουν ακόμα και τους 5.000 – 50.000°C. Στην πράξη θέτουμε το τόξο σε λειτουργία στην περιοχή των μεγάλων εντάσεων, όπου το τόξο είναι πιο στενό και συγκεντρωμένο, προκειμένου να μην επηρεάσουμε με ανεπιθύμητο τρόπο μεγαλύτερη ζώνη γύρω από τη συγκόλληση, όχι τουλάχιστον μεγαλύτερη από αυτή που ούτως ή άλλως προκύπτει και είναι αδύνατον να αποφύγουμε ή έστω περιορίσουμε περαιτέρω. Στην ίδια περιοχή δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής φύσης οδηγούν τα σταγονίδια του μετάλλου από την κορυφή της καμπάνας (ηλεκτρόδιο) προς τη βάση (πλάκα

μετάλλου). Η εικόνα 4.1 δείχνει την κίνηση των ιόντων του πλάσματος μεταξύ των πόλων του τόξου. Προς το θετικό πόλο (άνοδο) οδεύουν τα ηλεκτρόνια, τα οποία λόγω της μικρής τους μάζας επιταχύνονται σε μεγάλο βαθμό από το ηλεκτρικό πεδίο και προσκρούοντας πάνω της την θερμαίνουν.



Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της πολικότητας σε συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο.

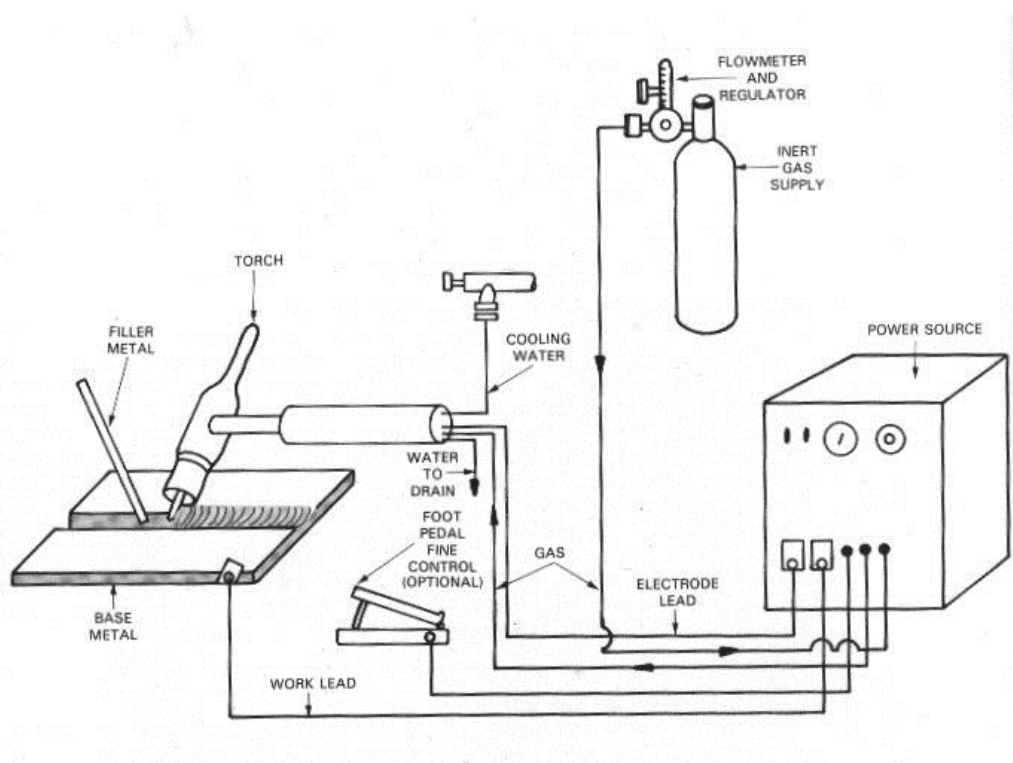
Η κάθοδος θερμαίνεται μεν, λιγότερο δε, επειδή τα θετικά ιόντα που προσκρούουν σε αυτήν επιταχύνονται σε μικρότερο βαθμό. Εφόσον χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα, συνήθως συνδέουμε τον αρνητικό πόλο της πηγής με το ηλεκτρόδιο και μιλάμε, σε αυτήν την περίπτωση, για ορθή / αρνητική πολικότητα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση (σύνδεση θετικού πόλου με το ηλεκτρόδιο) μιλάμε για αντίστροφη / θετική πολικότητα. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται στο ότι η ορθή πολικότητα, αφού αναπτύσσει υψηλότερες θερμοκρασίες στο μέταλλο βάσης, προκαλεί βαθύτερη τήξη και άρα, ως φυσικό επακόλουθο, μεγάλη σιείσδυση, ενώ η αντίστροφη πολικότητα έχει ως αποτέλεσμα την υποβοήθηση τη μεγαλύτερου βαθμού τήξη του ηλεκτροδίου ενώ η διείσδυση είναι σαφώς μικρότερη, καθιστώντας τη συγκόλληση καταλληλότερη για επενδύσεις και γομώσεις μεταλλικών τεμαχίων. Άλλος σπουδαίος της πολικότητας έχει να κάνει με την ικανότητα του τόξου να απομακρύνει οξείδια από την επιφάνεια της καθόδου. Για να λαμβάνει λοιπόν χώρα αυτή η ταυτόχρονη απομάκρυνση των επιφανειακών και ανεπιθύμητων στρωμάτων πυρίμαχου χαρακτήρα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η 'καλή υγεία' της συγκόλλησης, ενδείκνυται η χρήση αντίστροφης πολικότητας, καθώς η δράση των θετικών ιόντων που προσπίπτουν στην κάθοδο την αποξύνουν.

Περίληπτικά επίσης να αναφέρουμε ότι παίζει μεγάλο ρόλο η ένταση του ρεύματος να μην παρουσιάζει σοβαρές διακυμάνσεις ή να επηρεάζεται αισθητά από μικρομεταβολές των παραγόντων της συγκόλλησης ή του περιβάλλοντος. Επίσης, αν δεν είναι απολύτως απαραίτητο, προσπαθούμε να μην δουλεύουμε με συνεχές ρεύμα έντασης υψηλότερης από 200A, καθώς το τόξο δεν σχηματίζεται

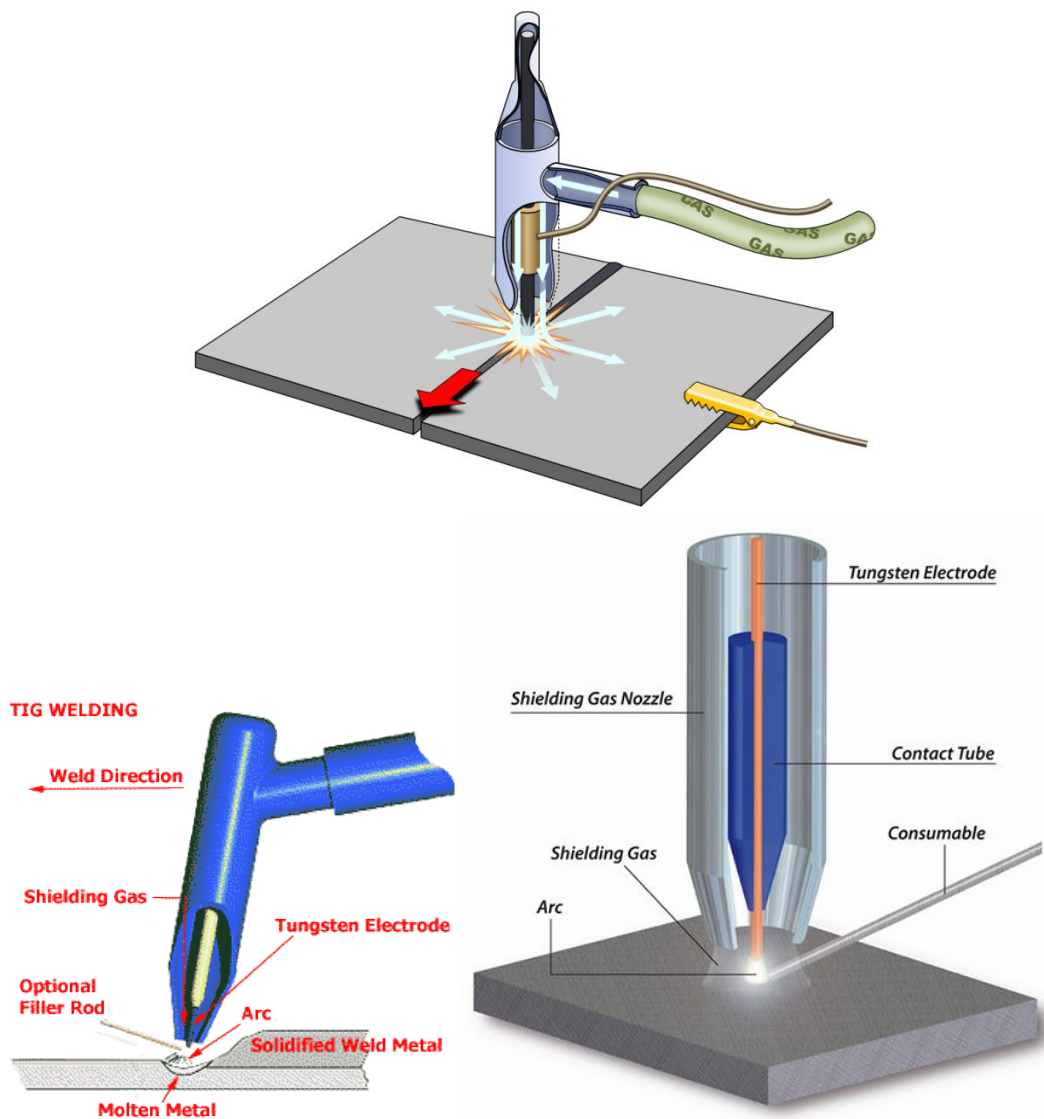
στην προέκταση του ηλεκτροδίου αλλά τείνει να αποκλίνει, με αποτέλεσμα να έχουμε λανθασμένη θέση απόθεσης τήγματος και η συγκόλληση να καθίσταται ποιοτικά απαράδεκτη. Το φαινόμενο αυτό λέγεται μαγνητικό φύσημα. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν πηγές ρεύματος χαμηλότερης τάσης (με μέγιστο τα 70V), αλλά ικανές να δίνουν μεγαλύτερες εντάσεις, της τάξης ακόμα και των εκατοντάδων Α. Επίσης, σε περίπτωση χρήσης εναλλασσόμενου ρεύματος να αναφέρουμε ότι η ένταση μεταβάλλεται μεταξύ 0 και μέγιστου, και έχει και αυτή με τη σειρά της τα εξής πλεονεκτήματα: μεγάλη ταχύτητα απόθεσης (κατάλληλη δηλαδή για μεγάλες ραφές συγκόλλησης και γενικά υψηλές απαιτήσεις από άποψη παραγωγικότητας) και όταν θέλουμε να αποφύγουμε το μαγνητικό φύσημα.

5. Συγκόλληση με αδρανές αέριο και μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο – TIG:

Η μέθοδος συγκόλλησης TIG βασίζεται στην παροχή υψηλής θερμότητας, προκειμένου να λάβει χώρα τήξη του μέταλλου βάσης και του μέταλλου προσθήκης (filler) –εφόσον χρησιμοποιείται- μεταξύ του αντικειμένου και ενός ηλεκτροδίου βολφραμίου ή κράματός του, το οποίο αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και δεν τήκεται. Το μέταλλο προσθήκης, υπό μορφή ράβδου, το χειρίζεται χειρωνακτικά ο συγκολλητής και προσεγγίζει το τόξο, τήκεται και αναμειγνύεται με το λουτρό, χωρίς να παίζει το ρόλο ηλεκτροδίου. Το λουτρό, το ηλεκτρόδιο βολφραμίου και το filler προστατεύονται με παροχή αδρανούς αερίου (ήλιο ή αργό υψηλής καθαρότητας), το οποίο διοχετεύεται συνεχώς γύρω από τη συγκόλληση. Σχηματικές αναπαραστάσεις της διάταξης και επιμέρους μερών ακολουθούν παρακάτω (εικόνα 5.1 – 5.2).



Εικόνα 5.1: Διάταξη συγκόλλησης TIG.



Εικόνα 5.2: σχηματική αναπαράσταση των μερών της λαβίδας.

Το συγκρότημα, όπως φαίνεται και παραπάνω, αποτελείται από τη λαβίδα που φέρει το ηλεκτρόδιο βολφραμίου με το ακροφύσιο αερίου και τον διακόπτη λειτουργίας, από τη φιάλη αερίου με τα ρυθμιστικά της και την πηγή ρεύματος, καθώς και το κιβώτιο ρύθμισης που συχνά ενσωματώνεται σε αυτήν. Η λαβίδα είναι αερόψυκτη ή υδρόψυκτη. Η πηγή ρεύματος που χρησιμοποιείται στις συγκολλήσεις TIG είναι πτωτικής τάσης, για τον λόγο ότι είναι μέθοδος χειρωνακτική. Επιπλέον επειδή ένα από τα χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι η υψηλή ποιότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και πηγές τελείως σταθερής τάσης για μοιόμορφο πάχος κορδονιού. Οι πηγές είναι συνήθως συνεχούς ρεύματος.

Τέλος, όσο αφορά τη διάταξη τροφοδοσίας αερίου και τη λαβίδα, η τροφοδοσία αυτού γίνεται από φιάλες ή κεντρικό σύστημα διανομής, με το αέριο να βρίσκεται υπό πίεση. Επίσης χρησιμοποιείται ένας μειωτήρας πίεσης και μια διάταξη μέτρησης παροχής, ώστε να μην σπαταλιέται άδικα αέριο. Επίσης χρησιμοποιούνται ροόμετρα ακριβείας. Η λαβίδα πρέπει να εξασφαλίζει

ομοιόμορφη –δίχως στροβιλισμούς- ροή αερίου, καλή ηλεκτρομόνωση μεταξύ των διαφόρων μερών της, καλή στεγανότητα έναντι εισβολής ατμοσφαιρικού αέρα στο τόξο και έναντι διαφυγής του νερού/ αερίου ψύξης προς το τόξο, και φυσικά άνεση κινήσεων (να περιλαμβάνει δηλαδή εύκαμπτους αγωγούς ρεύματος κλπ και να διαθέτει μικρό βάρος). Πρέπει να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες και να ψύχεται επαρκώς.

Επειδή το ηλεκτρόδιο βολφραμίου δεν πρέπει να τακεί, οι δυνατότητες της μεθόδου TIG περιορίζονται στην ορθή πολικότητα (αρνητικός πόλος στο ηλεκτρόδιο). Η ορθή πολικότητα έχει το πλεονέκτημα όπως αναφέραμε, της ικανοποιητικής διείδυσης.

6. Πεδίο εφαρμογής και ιδιαιτερότητες της TIG: Συγκόλληση χαλύβων:

Η τεχνική TIG μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέθοδος χαμηλής παραγωγικότητας δε, υψηλής ποιότητας τελικών συγκολλημένων κατασκευών δε.. Η περιοχή της έντασης κυμαίνεται από 10 ως και 400^A, με αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύ να κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 8kW. Είναι μέθοδος αρκετά ευέλικτη και με πολλές δυνατότητες. Πέρα όμως το μειονέκτημα της χαμηλής παραγωγικότητας, της συγκαταλέγεται και το υψηλό κόστος του προστατευτικού αερίου. Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε και τη δυσκολία αυτοματισμού και μηχανοποίησης, όμως σε περιπτώσεις όπως η παρούσα, σε συγκολλήσεις δηλαδή λεπτών φύλλων / ελασμάτων, το μέταλλο προσθήκης δεν είναι πάντα απαραίτητο. Η τεχνική επίσης επιβάλλει προσεκτική προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση τεμαχίων, ακριβείς διαστάσεις και καθαριότητα.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για τη συγκόλληση ελασμάτων και λαμαρινών μικρού πάχους και επειδή η βέργα του μετάλλου προσθήκης δεν περιβάλλεται από συλλίπασμα με αποξειδωτικά, δεν ενδείκνυται η συγκόλληση μη αποξειδωμένων χαλύβων, λόγω του κινδύνου το τελικό προϊόν να περιέχει πόρους αερίων. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται βέργες fillers με εμπεριεχόμενα αποξειδωτικά (τυπική σύσταση 0,15%C, 0,5%Si και 1,2%Mn).

Ελάσματα πάχους 0,2-0,8mm μπορούν να συγκολληθούν τέλεια, χωρίς παραμορφώσεις, θερμικές - μηχανικές, και χωρίς ανάγκη καθαρισμού. Για πάχη μέχρι 6mm η μέθοδος είναι απλώς αποδεκτή, για μεγαλύτερα ακόμα πάχη αποδεικνύεται αντιοικονομική.

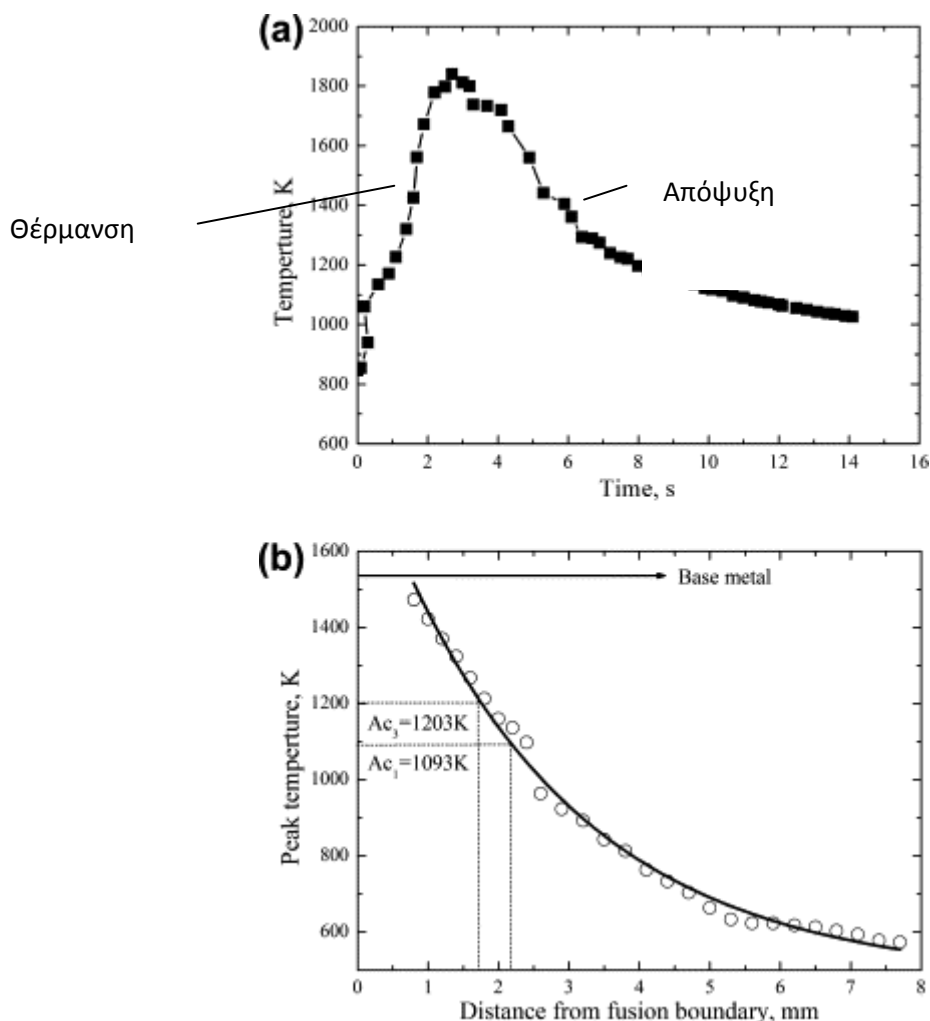
Η συγκόλληση είναι σχετικά χαμηλής ενέργειας και χειρωνακτική, χρησιμεύει για την πραγματοποίηση συγκόλλησης με ένα ριζικό πάσο, σε περιπτώσεις χοντρών ελασμάτων. Για τους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες και για χάλυβες με C > 0,3% η συγκόλληση TIG είναι δυνατή, με όλες τις επιφυλάξεις που ισχύουν γενικότερα σε τέτοιες περιπτώσεις. Ανάλογα με τη σύνθεση του χάλυβα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης μπορεί να χρειαστεί να προηγηθεί προθέρμανση ή, μετά το πέρας της συγκόλλησης, μεταθέρμανση ή κατάλληλη θερμική κατεργασία.

IV) Φαινόμενα κατά τη συγκόλληση:

A. Θερμικά Φαινόμενα:

1. Θερμικός κύκλος συγκόλλησης:

Θερμικός κύκλος ενός συγκεκριμένου σημείου στη γειτονιά μια συγκόλλησης λέγεται η μεταβολή της θερμοκρασίας από αυτή του περιβάλλοντος μέχρι ένα μέγιστο και πάλι μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ανάλογα με τη θέση του σημείου στη συγκόλληση, υπάρχει και διαφορετικός θερμικός κύκλος.



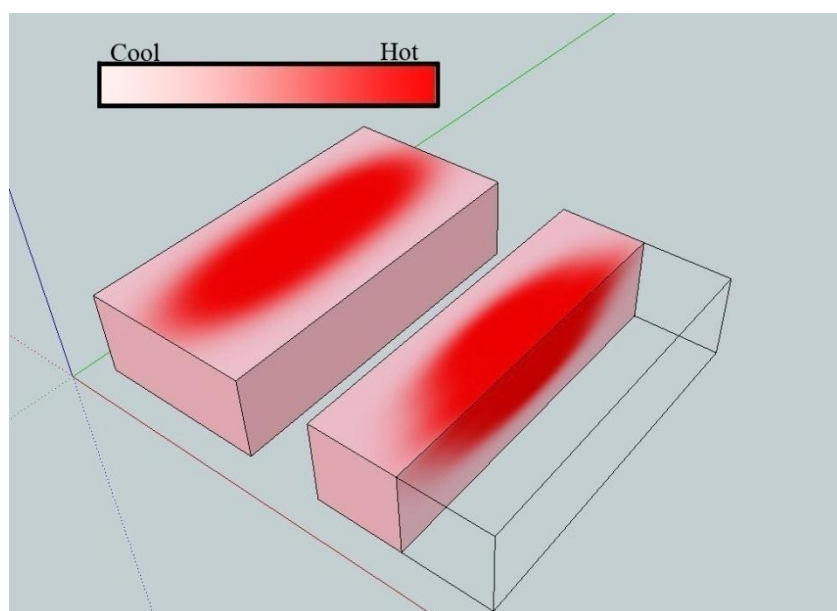
Εικόνα 1.1: Ενδεικτική μορφή θερμικού κύκλου συγκόλλησης (a), ενώ (b) ενδεικτική καμπύλη αναπαράστασης θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε μια συγκόλληση, που αναπαριστά τη σχέση μεταξύ απόστασης από τα όρια της συγκόλλησης και τη μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται.

Κατά κανόνα, σε κάθε κύκλο διακρίνουμε την περίοδο θέρμανσης, τη μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο σημείο που μελετάμε καθ'όλη τη διάκρεια συγκόλλησης και την περίοδο απόψυξης. Επίσης σημασία έχει η χρονική διάρκεια μεταξύ μιας χαρακτηριστικής θερμοκρασίας και πάνω. Στους χάλυβες, λόγω χάρη, μια χαρακτηριστική θερμοκρασία είναι η A_{C_3} , δηλαδή η θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης κατά τη θέρμανση. Οι θερμικοί κύκλοι έχουν μεγάλη σημασία, καθώς αποτελούν πραγματικές θερμικές κατεργασίες, από τις οποίες εξαρτώνται τόσο η τελική μικρογραφική δομή όσο και οι τελικές

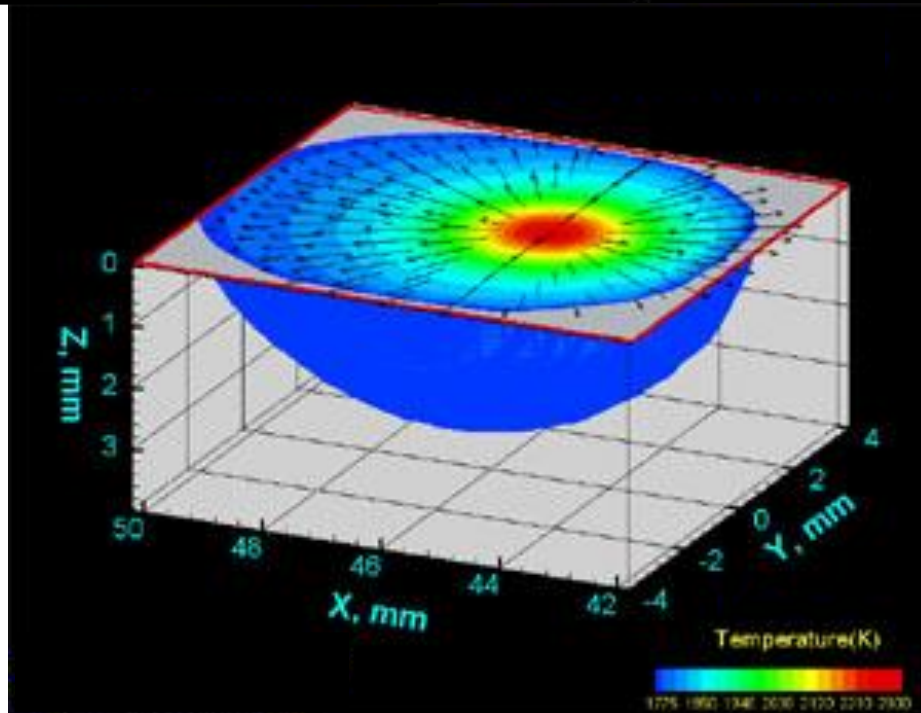
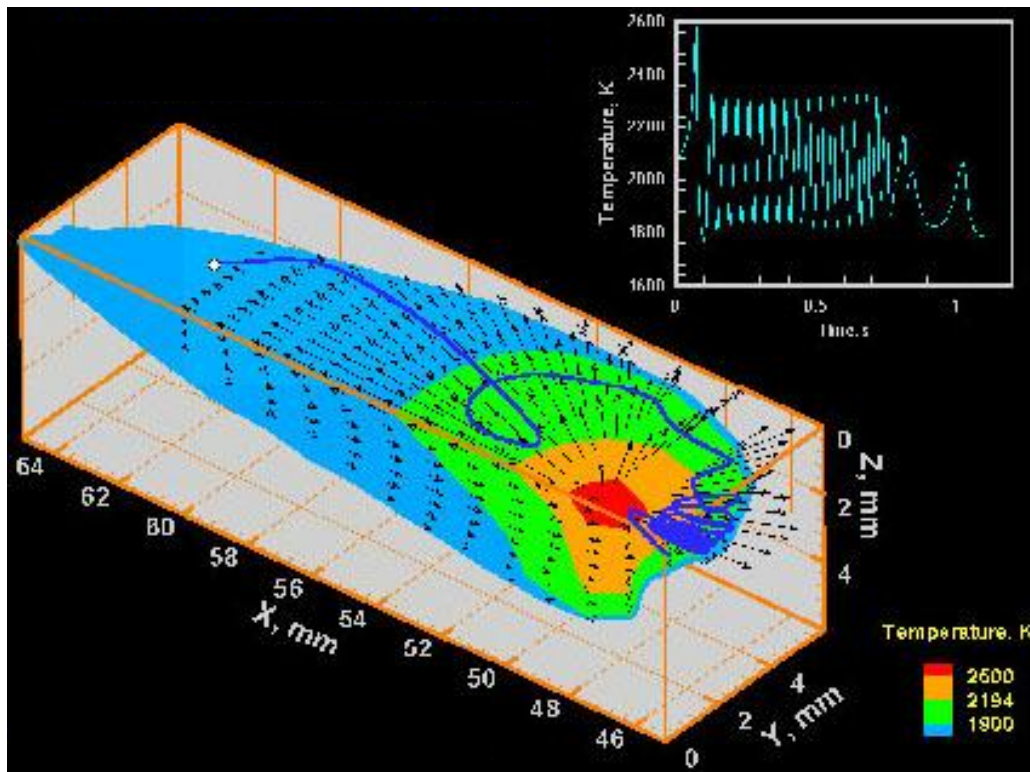
μηχανικές ιδιότητες που διαμορφώνονται. Έτσι, για τους χάλυβες, σε γενικές γραμμές, η ταχύτητα θέρμανσης, η μέγιστη αποκτώμενη θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε αυτήν είναι καθοριστικοί παράγοντες για τη δυνατότητα ωστενιτοποίησης, ομογενοποίησης με διάχυση και αύξησης μεγέθους των κόκκων. Στη συνέχεια η ταχύτητα απόψυξης καθορίζει με βάση τα διαγράμματα CCT τους διάφορους μετασχηματισμούς του ωστενίτη σε σταθερά και ασταθή, μαλακά ή σκληρά, εύθραυστα ή δύσθραυστα προϊόντα.

Οι θερμικοί κύκλοι εξαρτώνται κυρίως από τη μέθοδο, τη διαδικασία συγκόλλησης και τις επιλεγόμενες παραμέτρους, τη θέση και απόσταση του σημείου από τη γραμμή συγκόλλησης, το πάχος και έκταση των τεμαχίων που συγκολλούνται, από τον τύπο συγκόλλησης, την αρχική θερμοκρασία των τεμαχίων και από το είδος του προς συγκόλληση μετάλλου.

Η θερμική κατανομή, από την άλλη, αναφέρεται στη μέγιστη θερμοκρασία που αποκτούν όλα τα σημεία σε μια ευθεία εγκάρσια στη συγκόλληση και επιτρέπει τον προσδιορισμό της χωροταξικής κατανομής διαφόρων μικρογραφικών συστατικών. Για παράδειγμα στους χάλυβες επιτρέπει να διαπιστώσουμε το μέγεθος της ζώνης δεξιά και αριστερά της ραφής που παρουσίαση ανάπτυξη θερμοκρασιών άνω της χαρακτηριστικής (AC_3).



Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση χωροταξικής κατανομής αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών σε συγκόλληση.



Εικόνα1.3: Παραδείγματα ισοθερμοκρασιακών καμπυλών ή αλλιώς θερμοκρασιακού προφίλ κατά μήκος του άξονα μιας συγκόλλησης.

Κάθε ισοθερμοκρασιακή καμπύλη είναι μια έλλειψη της οποίας ο μικρός άξονας είναι τόσο περισσότερο μετατοπισμένος προς τα πίσω όσο η θερμοκρασία που αντιστοιχεί είναι μικρότερη. Λόγω της κίνησης του τόξου οι καμπύλες αυτές συνωθούνται μπροστά από το μέτωπο της συγκόλλησης. Όλες οι ισοθερμοκρασιακές προχωρούν με την ίδια ταχύτητα που προχωρεί η συγκόλληση, παραμένοντας αμετάβλητη όσο αφορά τη μορφή και τη σχετική θέση μεταξύ τους.

Το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από το τόξο σε κάθε 1cm της συγκόλλησης ονομάζεται (ειδική) θερμική παροχή και όσο αυτή είναι μεγαλύτερη, τόσο ελαττώνει τις θερμοκρασιακές διαφορές στο έλασμα, αυξάνει το χρόνο παραμονής σε υψηλή θερμοκρασία και ελαττώνει την ταχύτητα απόψυξης, πράγμα πλεονεκτικό για τους χάλυβες, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο ανεπιθύμητος σχηματισμός του μαρτενσίτη και μειώνεται ο κίνδυνος ευθραυστότητας λόγω απορρόφησης υδρογόνου. Επίσης, όπως είναι λογική, με υψηλή θερμική παροχή συνεπάγεται η αυξημένη ευκολία λήψης χώρας φαινομένων που απαιτούν μεγάλη χρονική παραμονή σε υψηλές θερμοκρασίες, και έτσι ευνοούνται η μετακίνηση των κόκκων και η κατακρήμνιση.

Επίσης, όσο η μάζα του τεμαχίου είναι μεγαλύτερη, τόσο η απόψυξη είναι ταχύτερη, ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν και οι ιδιότητες του προς συγκόλληση υλικού, όπως η θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα και η πυκνότητα. Υψηλή θερμική αγωγιμότητα έχει ως επακόλουθο υψηλή διαχυσιμότητα.

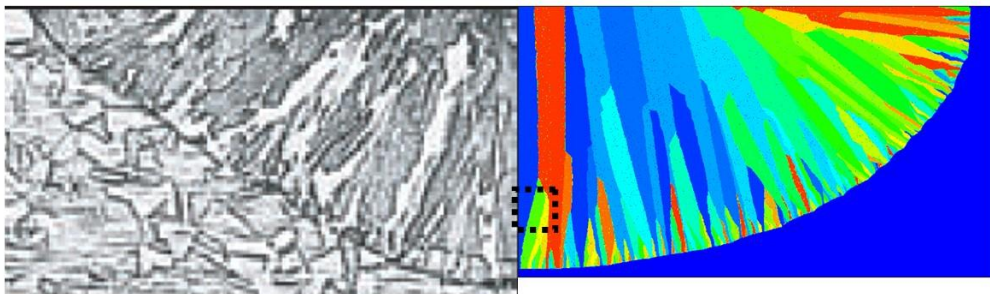
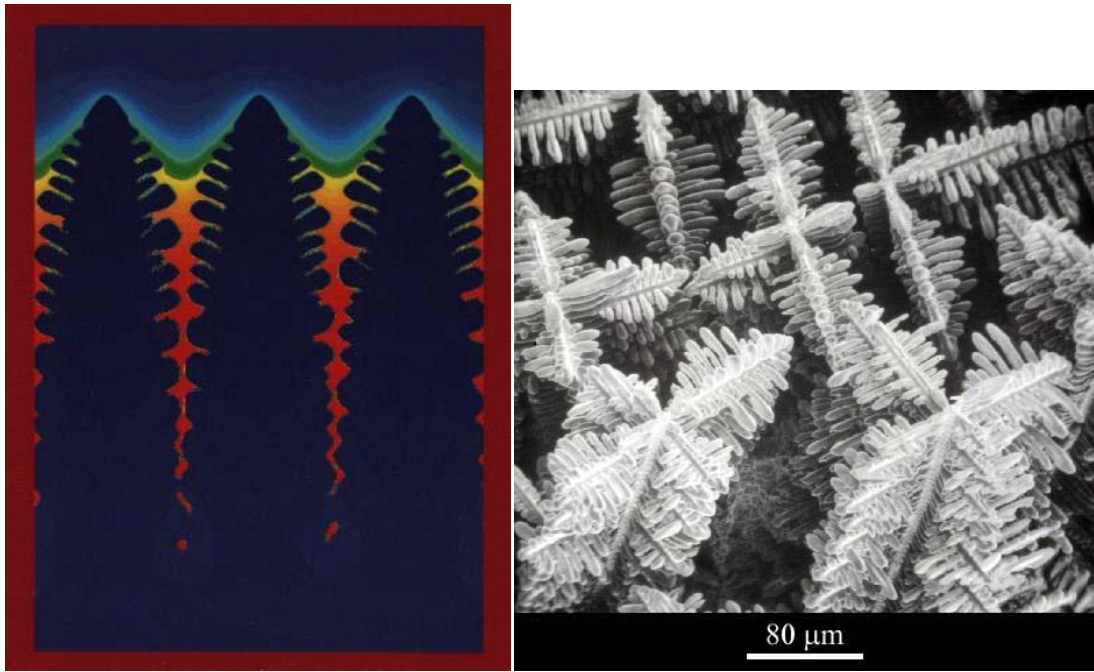
B.Μεταλλουργικά Φαινόμενα:

1. Ζώνες Συγκόλλησης:

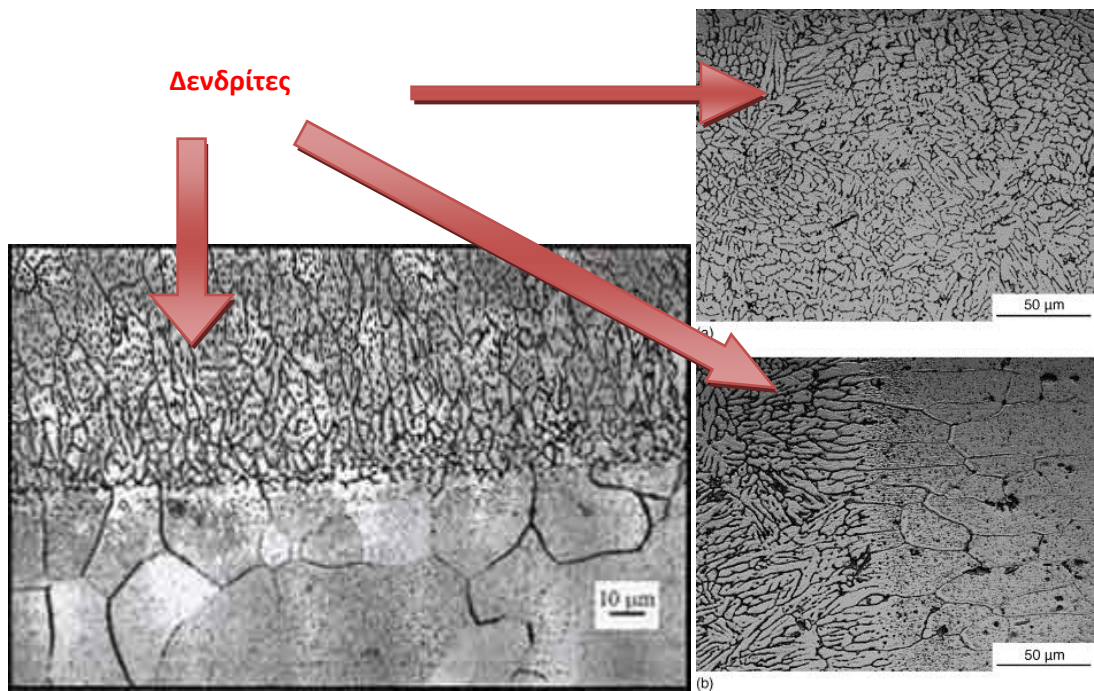
Το μέταλλο που συγκολλείται διαφοροποιείται από πλευράς δομής και ιδιοτήτων σε τρεις κύριες ζώνες: τη ζώνη του μετάλλου συγκόλλησης, τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και το ανεπηρέαστο μέταλλο βάσης. Η διαφοροποίηση αυτών των ζωνών εξαρτάται άμεσα από τη φύση του μετάλλου / κράματος (διάγραμμα φάσεων και τυχόν καταστάσεις εκτός ισορροπίας), την κατάστασή του (αν έχει υποστεί ανόπτηση ή ενδοτράχυνση), όπως και από την ένταση των θερμικών φαινομένων.

Η ζώνη τήξης ή αλλιώς ζώνη μετάλλου συγκόλλησης είναι εκείνη που προκύπτει από τη στερεοποίηση του τήγματος και η σύνθεσή της εξαρτάται από την αραιώση (που εξαρτάται με τη σειρά της από τη μέθοδο της συγκόλλησης), ένταση και πολικότητα ρεύματος, το πάχος των ελασμάτων, θερμικά χαρακτηριστικά του μετάλλου βάσης και αυτού της προσθήκης κλπ. Η στερεοποίηση της ζώνης αυτής χαρακτηρίζεται από γνωστά φαινόμενα: διακρυστάλλωση, χημικός διαφορισμός, διακενώσεις, πόροι, εσωτερικές τάσεις, ρωγματώσεις.

Αναλυτικότερα, η διακρυστάλλωση είναι η δημιουργία μικρογραφικού ιστού (ανομοιόμορφη ανάπτυξη κόκκων σε προνομιακές διευθύνσεις οφειλόμενη σε μικρο-ανισοθερμίες του τήγματος και της ροής της θερμότητας κατά τη στερεοποίηση). Οι κρύσταλλοι / κόκκοι που σχηματίζονται αναπτύσσονται προς το εσωτερικό της συγκόλλησης υπό μορφή δενδριτών, με φορά αντίθετη αυτής της ροής θερμότητας, και με την πλευρική ανάπτυξη αυτών να παρεμποδίζεται από τους γειτονικούς. Αυτή η μικρογραφική δομή είναι γνωστή ως βασαλτική και όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα απόψυξης τόσο λεπτότεροι οι δενδρίτες (Εικόνες 1.1 και 1.2).



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της μορφής των δεδριτών και της ανάπτυξης αυτών.



Εικόνα 1.2 Παράδειγμα βασικής μικροδομή σε συγκολλημένο τεμάχιο κράματος Ni-Ti.

Ο χημικός διαφορισμός οφείλεται στην σχετικά ταχεία απόψυξη που δεν επιτρέπει την πλήρη αποκατάσταση ισορροπίας μεταξύ υγρής και στερεάς φάσης, και εκδηλώνεται σε κλίμακα κόκκου σαν μικροδιαφορισμός, ενώ σε κλίμακα ολόκληρης ζώνης τήξης σαν μακροδιαφορισμός. Γενικά όταν ο χρόνος πιέζει και το φαινόμενο της διάχυσης δεν προλαβαίνει να λάβει πλήρως χώρα και να ακολουθηθούν διαγράμματα ισορροπίας, δεν υπάρχουν τα χρονικά περιθώρια δηλαδή να αποκατασταθούν οι συγκεντρώσεις ισορροπίας κατά την απόψυξη, ιδιαίτερα στη στερεά φάση, με την πρόοδο της στερεοποίησης το εσωτερικό του κρυστάλλου ακολουθεί σε διαγράμματα ισορροπίας τέτοιες καμπύλες που είναι όσο γίνεται πιο κοντά στην αρχική σύνθεση του τήγματος, και έτσι το τήγμα γίνεται υπερβολικά ακάθατο. Έτσι ένας δενδρίτης δεν έχει ομοιόμορφη χημική σύνθεση αλλά αποτελείται από αλληπάλληλα στρώματα συνεχώς αυξανόμενης περιεκτικότητας σε ακαθαρσίες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι το κέντρο της συγκόλλησης, καθώς στερεοποιείται τελευταίο, να είναι πλουσιότερο σε αυτές, από ότι το εξωτερικό, καθώς όσο προχωρά η στερεοποίηση το τήγμα εκθλίβεται και απομονώνεται προς το εσωτερικό (το κέντρο της συγκόλλησης). Ο διαφορισμός αποτελεί συχνά αιτία θερμής ρωγμάτωσης, καθώς από τις ακαθαρσίες (φώσφορος, θείο κλπ) σχηματίζονται εύτηκτες ενώσεις, όπου δρουν σαν λεπτοί υμένες περιβάλλοντας τους κόκκους και λύνοντας την συνοχή του όλου πολυκρυσταλλικού οικοδομήματος, όπου υπό την επίδραση εσωτερικών / εξωτερικών τάσεων ρωγματώνονται. Κάθε νέο πάσο βοηθά στην αναθέρμανση, μερική ανάτηξη ομογενοποίηση και εξομάλυνση, όμως στην περίπτωση μονού πάσου δεν έχουμε αυτήν την ευνόηση, όπως ούτε εκλέπτυνση του κόκκου και τάσεις εξαφάνισης της βασαλτικής δομής.

Μεταξύ ζώνης τήξης και θερμικά επηρεασμένης ζώνης υπάρχει και ζώνη σύνδεσης, αλλά είναι τόσο λεπτή που είναι συχνά απροσδιόριστη στο οπτικό μικροσκόπιο.

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη περιλαμβάνει το μέταλλο βάσης που γειτονεύει άμεσα με τη ζώνη τήξης και οι θερμοκρασίες έχουν ξεπεράσει τα χαρακτηριστικά σημεία διαφόρων μετασχηματισμών. Στην περίπτωση των χαλύβων αυτή εκτείνεται στην περιοχή όπου η θέρμανση προκάλεσε ωστενιτοποίηση, και για να γίνει αυτό απαιτείται ικανή χρονική παραμονή πάνω από την AC_3 ή AC_1 . Οι μετασχηματισμοί που θα προκληθούν στη συνέχεια κατά την απόψυξη εξαρτώνται από την ταχύτητα απόψυξης και από το είδος του χάλυβα. Εκτός, βέβαια, από τους κλασσικούς μετασχηματισμούς που προβλέπονται σε διαγράμματα TTT, μπορεί επίσης να προκύψει ανακρυστάλλωση, σφαιροποίηση του σεμεντίτη, γραφιτίαση, κατακρήμνιση καρβιδίων κλπ.

2. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη ενός ανθρακούχου χάλυβα:

Ένας ανθρακούχος χάλυβας με περιεκτικότητα 0,1-0,2% C είναι ένας κατ'εξοχήν συγκολλησίμος χάλυβας, καθώς όσο ταχεία και αν είναι η απόψυξή του, τα προϊόντα διάσπασης του ωστενίτη ανήκουν στην περιοχή του περλίτη.

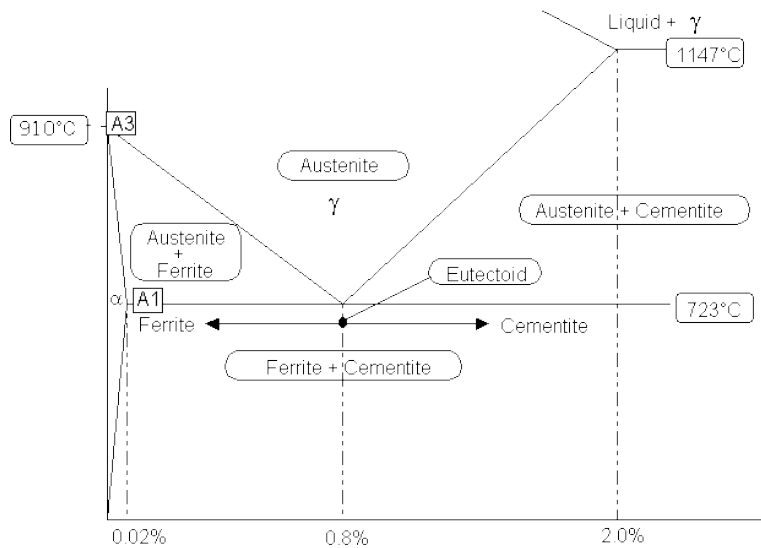
Στη γειτονιά της ζώνης τήξης σχηματίζεται η ζώνη σύνδεσης για θερμοκρασία $\theta_{\text{solidus}} < \Theta < \theta_{\text{liquidus}}$ και στη συνέχεια, χωρίς καμία τήξη, ακολουθούν οι εξής ζώνες: η ζώνη υπερθέρμανσης, για $\Theta > 1100^{\circ}\text{C}$, δηλαδή για θερμοκρασίες πολύ υψηλές μέσα στην ωστενιτική περιοχή, η ζώνη ολικής ανόπτησης, που ανήκει επίσης μέσα στην ωστενιτική περιοχή ($\Theta > A_{C3}$), ζώνη μερικής ανόπτησης, για θερμοκρασίες του διαστήματος $A_{C1} - A_{C3}$, όπου η ωστενιτοποίηση δεν είναι πλήρης.

Στη ζώνη υπερθέρμανσης έχουμε φαινόμενα μεγέθυνσης κόκκου του ωστενίτη. Στην πράξη των συγκολλήσεων, η μεγέθυνση αυτή εκδηλώνεται μόνο για θερμοκρασίες αρκετά ανώτερες των 1100°C . Επίσης για σχετικά μεγάλες ταχύτητες απόψυξης (πρακτικά πάνω από $100 - 200^{\circ}\text{C}/\text{min}$, η αύξηση των κόκκων του ωστενίτη οδηγεί στον σχηματισμό φερρίτη με βελονοειδή μορφή που μειώνει τη δυσθραυστότητα. Ο σχηματισμός αυτός είναι πρακτικά αναπόφευκτος στις συγκολλήσεις, συχνά περιβάλλεται από τροοσίτη (πολύ λεπτόκοκκο περλίτη) και συναντάται τόσο στη ζώνη υπερθέρμανσης όσο και μέσα στη ζώνη τήξης. Ευνεοείται ιδιαίτερα από την παρουσία καρβιδιογόνων στοιχείων, όπως το Mn, Cr και Mo.

Στη ζώνη πλήρους ανόπτησης, ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε φερρίτη και περλίτη κατά την απόψυξη, οδηγεί σε πολύ ομοιόμορφες δομές, καθώς γίνεται σε συνθήκες που αντιστοιχούν σε αυτές ολικής ανόπτησης / ανόπτησης εξομόλυνσης. Οι δομές αυτές χαρακτηρίζονται από καλές μηχανικές ιδιότητες.

Τέλος, στη ζώνη μερικής ανόπτησης ούτε η θερμοκρασία ούτε και ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να γίνει πλήρης ωστενιτοποίηση. Αρχικά διαλύεται ο περλίτης και με τη σταδιακή διάχυση του άνθρακα μετατρέπεται και ο φερρίτης σε ωστενίτη. Στις περιοχές που έχει γίνει ωστενιτοποίηση ο κόκκος εκλεπτύνεται με τη δημιουργία ευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτη κατά την απόψυξη. Έτσι, στη ζώνη μερικής ανόπτησης, εμφανίζονται φερριτοπερλιτικές δομές, κατά κανόνα πολύ λεπτές, αλλά και με κάποια ανομοιομορφία στο μέσο μέγεθος κόκκου.

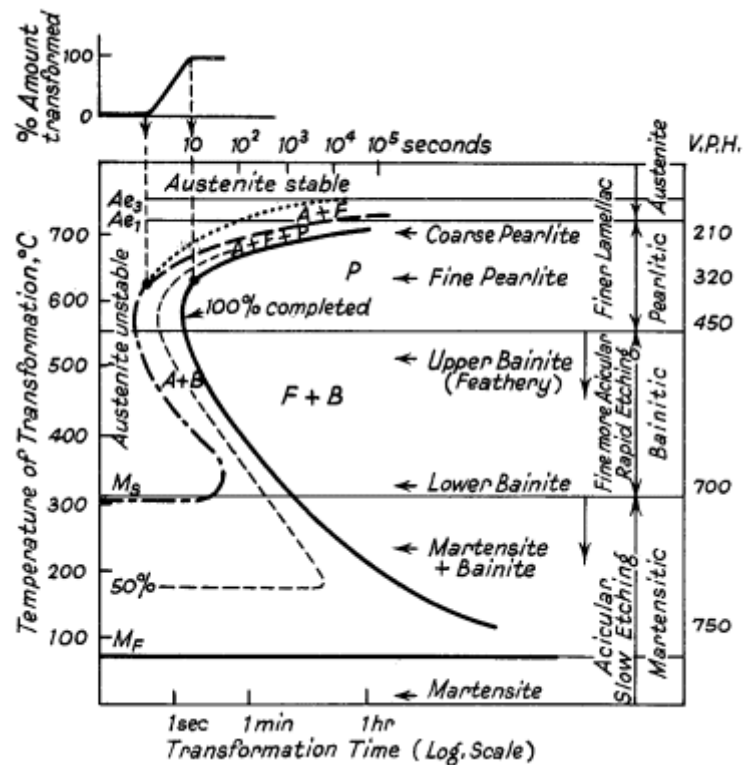
Εν περιλήψει και σε πολύ γενικές γραμμές, είμαστε σε θέση να πούμε ότι όταν μετακινούμαστε από τη ζώνη τήξης προς το εξωτερικό παρατηρούμε διαδοχικά πρώτα χονδρόκοκκες δομές με φερρίτη Widmanstätten, κατόπιν κόκκους μέσου μεγέθους που γίνονται διαρκώς όλο και λεπτότεροι και στο τέλος το μέταλλο βάσης χωρίς μεταβολή. Για χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα έχει αποδειχτεί ότι, εφόσον η θερμικά επηρεασμένη ζώνη δεν είναι εκτεταμένη, οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται ελαφρά, παρά το γεγονός εμφάνισης του φερρίτη Widmanstätten.



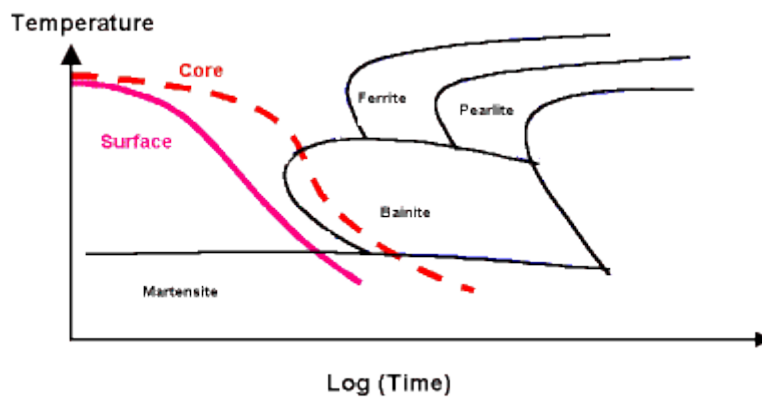
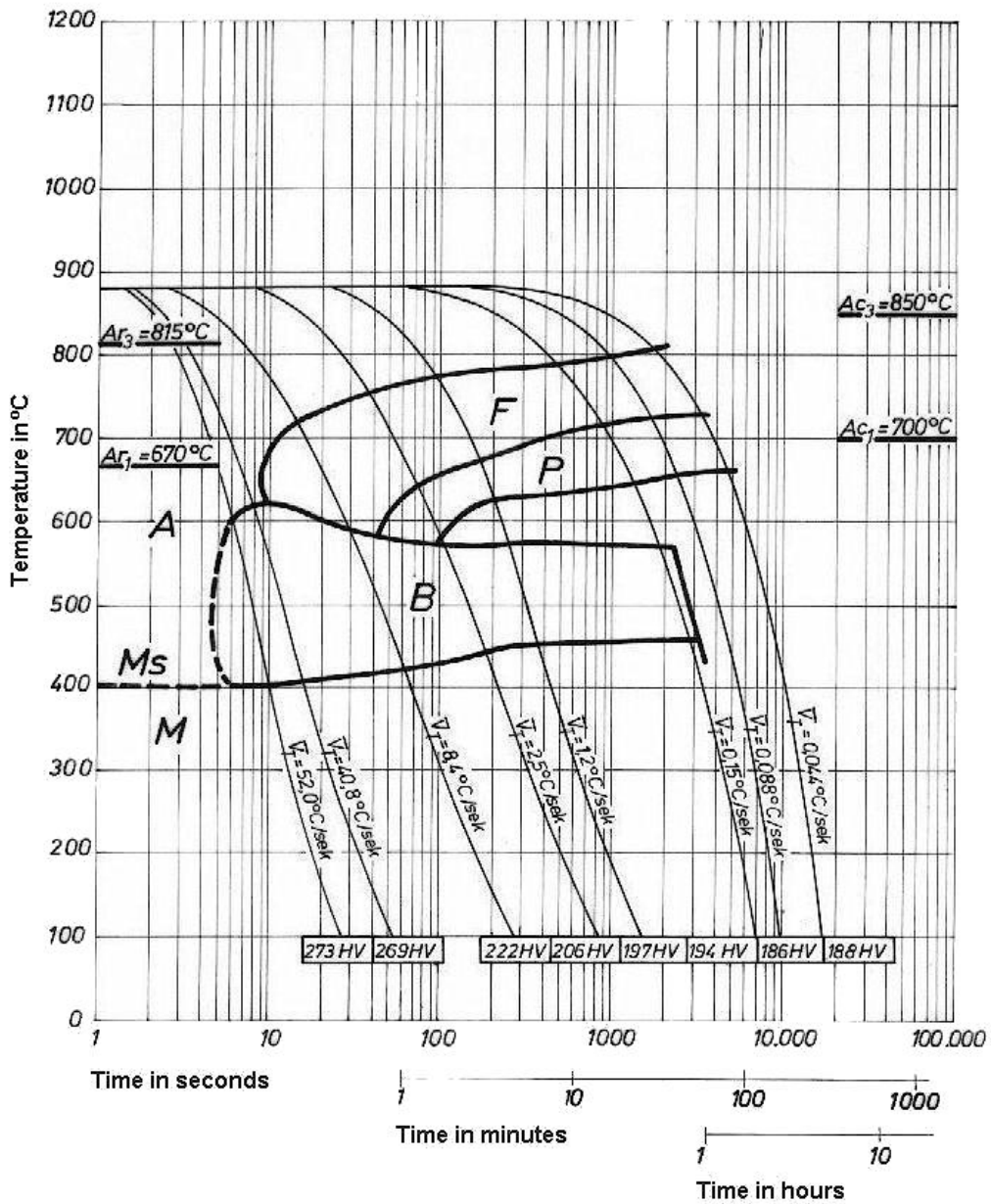
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα φάσεων ισορροπίας περιεκτικότητας σε άνθρακα – θερμοκρασίας.

3. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη ελαφρά κραματωμένου χάλυβα:

Για να αντιληφθούμε τους μετασχηματισμούς που συμβαίνουν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη ενός τέτοιου κραματωμένου χάλυβα, πρέπει να αναφερθούμε στα διαγράμματα TTT ή CCT (Time – Temperature transformations και Continuous Cooling Transformations, διαγράμματα ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού και διαγράμματα μετασχηματισμού με συνεχή ψύξη αντίστοιχα).



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού (TTT).



Εικόνα 3.2: Διαγράμματα μετασχηματισμού συνεχούς ψύξης (CCT).

Τα διαγράμματα TTT και CCT μετακινούνται δεξιότερα όσο οι διάφορες κραματικές προσθήκες (συμπεριλαμβανομένου και του άνθρακα) βρίσκονται σε μεγαλύτερη αναλογία. Συγχρόνως αλλάζει και η μορφή τους, ενώ κατεβαίνει και η θερμοκρασία αρχής του μαρτενσιτικού ή μπαινιτικού μετασχηματισμού. Αυξάνεται με λίγα λόγια η εμβापτότητα. Το διάγραμμα CCT δείχνει ότι για δοσμένη απόψυξη τα μικρογραφικά συστατικά δύναται να είναι περλιτικής, μπαινιτικής ή μαρτενσιτικής περιοχής, ανάλογα με τη σύνθεση του χάλυβα. Επιμένουμε ιδιαίτερα στο ότι ο μπαινίτης και μαρτενσίτης είναι ανεπιθύμητα μικρογραφικά συστατικά, όσο αφορά τις συγκολλήσεις, επειδή παρουσιάζουν μειωμένη δυσθραυστότητα.

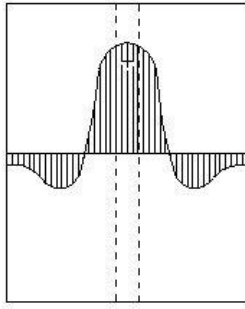
Αν συνδιάσουμε το θερμικό κύκλο διαφόρων σημείων της συγκόλλησης με το αντίστοιχο διάγραμμα CCT, διαπιστώνουμε ότι όσο το σημείο είναι πλησιέστερα στη συγκόλληση, τόσο η καμπύλη της απόψυξης του είναι εντονότερη, κι επομένως παρουσιάζει ιδιαίτερο κίνδυνο σχηματισμού μαρτενσίτη. Επίσης, όσο μικρότερη η ειδική θερμική παροχή και η μάζα του προς συγκόλληση τεμαχίου μεγαλώνει, τόσο ο κίνδυνος σχηματισμού μαρτενσίτη είναι μεγαλύτερος. Τέλος όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα απόψυξης, τόσο μεγαλύτερος ο κίνδυνος σχηματισμού μαρτενσίτη.

4. Παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις:

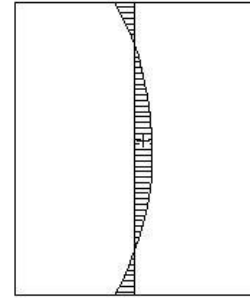
Στη δημιουργία του θερμικού κύκλου των συγκολλήσεων κάθε στοιχειώδης όγκος του μετάλλου παθαίνει στο στάδιο θέρμανσης μια διαστολή και στο στάδιο απόψυξης μια συστολή. Στην πράξη κάθε σημείο έχει τον δικό του θερμικό κύκλο, παρουσιάζεται δηλαδή ανισοθερμία, ενώ η συγκόλληση λαμβάνει χώρα συνήθως σε σύνθετες κατασκευές όπου αποκλείεται η ελεύθερη διαστολή και συστολή. Για τους λόγους αυτούς αναπτύσσονται στο εσωτερικό των τεμαχίων εσωτερικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές οφείλονται σε τοπικές ελαστικές παραμορφώσεις αλλά και στα ελαστικά πεδία των διαταραχών που δημιουργήθηκαν στις περιοχές αυτές, που ξεπερνώντας το όριο ελαστικότητας, παραμορφώθηκαν πλαστικά.

Οι εσωτερικές τάσεις που απομένουν στις συγκολλητές κατασκευές μετά το πέρας της όποιας συγκόλλησης έχουν πολλαπλές συνέπειες: επιδρούν στην στατική αντοχή των κατασκευών και πολύ περισσότερο στην αντοχή σε δυναμικές καταπονήσεις. Προκαλούν στρεβλώσεις και παραμορφώσεις είτε αμέσως μετά το τέλος της συγκόλλησης είτε αργότερα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της κατασκευής. Επίσης προκαλούν φαινόμενα εργοδιάβρωσης σε κατασκευές που λειτουργούν σε διαβρωτικό περιβάλλον και παρεμποδίζουν την εκτέλεση μηχανουργικών κατεργασιών ακρίβειας.

Σε γενικές γραμμές, καλό είναι να αναφέρουμε τα εξής: όταν εσωτερικά ενός συγκολλημένου τεμαχίου αναπτύσσεται ανισοθερμία, δηλαδή θερμική διαβάθμιση, οι ψυχρότερες ζώνες ενεργούν σαν πάκτωση για τις θερμότερες. Επίσης, εφόσον η θερμοκρασία παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, αναπτύσσονται αντιστρεπτές (ελαστικές) τάσεις στις θερμότερες περιοχές, έχουν θλιπτικό χαρακτήρα και εξαφανίζονται μετά την απόψυξη, ενώ όταν η θερμοκρασία υπερβεί κάποιο όριο, δηλαδή οι θλιπτικές αυτές τάσεις φτάνουν το όριο ελαστικότητας, έχουμε πρόκληση πλαστικής παραμόρφωσης.

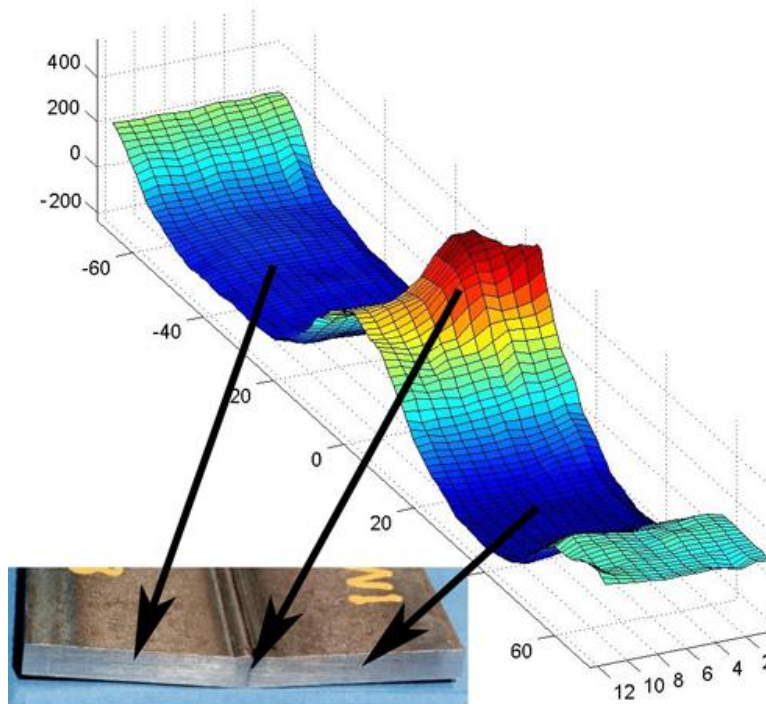


(a) Longitudinal residual stresses



(b) Transverse residual stresses

Εικόνα 4.1: (α) Γραφική αναπαράσταση διαμήκων και (β) εγκάρσιων τάσεων σε συγκόλληση.



Εικόνα 4.2: Διαμήκεις παραμένουσες τάσεις σε συγκολλημένα τεμάχια.

Οι παραμένουσες τάσεις, προκαλούμενες από την ανισοθερμία στο εσωτερικό του μετάλλου και που δημιουργία με τη σειρά της αυτοπακτώσεις και πλαστικές παραμορφώσεις των θερμότερων ζωνών, είναι είτε παράλληλες προς τη γραμμή συγκόλλησης (διαμήκεις) είτε είναι εγκάρσιες σε αυτήν.

Στη διάρκεια της συγκόλλησης οι ζώνες της τήξης και του θερμικού επηρεασμού αποχτούν τις υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά η διαστολή τους παρεμποδίζεται από τις μεγάλες μάζες του ψυχρού μετάλλου που περιβάλλουν τις ζώνες. Αυτό ισοδυναμεί με πάκτωση. Επακολουθεί πλαστική σύνθλιψη των ζωνών πλησίον της συγκόλλησης, κατά την έννοια του μήκους, ενώ κατά την απόψυξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος προκύπτει πάλι παρεμπόδιση των προαναφερθέντων ζωνών, αυτή τη φορά στο να συσταλούν και έτσι στις θερμότερες ζώνες έχουμε παρουσία εφελκυστικών (tensile stress), ενώ στις

ψυχρότερες θλιπτικών τάσεων (compressive stress). Οι διαμήκεις τάσεις είναι εντονότερες από την άνω πλευρά της συγκόλλησης παρά από την πλευρά της ρίζας. Όταν μια συγκόλληση εκτελείται με πολλά κορδόνια, τα προηγούμενα αποτελούν πρόσθετη πάκτωση για τα επόμενα, έτσι έχουμε μετριασμό των εφελκυστικών τάσεων στα πρώτα κορδόνια ενώ στα νεότερα πιο έντονες τάσεις. Τέλος, οι διαμήκεις τάσεις είναι τόσο εντονότερες, όσο η θερμή ζώνη είναι στενότερη, για αυτό άλλωστε οι στενές συγκολλήσεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε ρωγμάτωση εγκάρσια στη ραφή. Η αύξηση του πλάτους της θερμής ζώνης δύναται να επιφέρει πτωτική τάση στην ένταση των τάσεων, εντούτοις η ολική συνισταμένη είναι μεγαλύτερη, γεγονός δυσμενές για κατασκευές με έντονες στατιστικές φορτίσεις εφελκυσμού / θλίψης.

Στην περίπτωση των εγκάρσιων τάσεων, αυτές αναπτύσσονται λόγω ανισοθερμίας μέσα στην ίδια τη ζώνη τήξης. Οι πλευρικές περιοχές ενός κορδονιού, εφόσον γειτονεύουν με τις παρειές των τεμαχίων, ψύχονται γρηγορότερα από το εσωτερικό, με αποτέλεσμα το εσωτερικό του κορδονιού να υποβάλλεται σε εφελκυστικές εγκάρσιες τάσεις. Αυτές μηδενίζονται κοντά στα άκρα της συγκόλλησης, ενώ μάλιστα μπορεί να διαφοροποιηθούν και σε θλιπτικές. Σε μια περίπτωση μεγάλου μήκους συγκόλλησης, οι περιοχές εφελκυσμού και θλίψης δύναται να παρουσιάζονται και να εναλλάσσονται με απρόβλεπτο τρόπο. Οι εγκάρσιες τάσεις είναι εντονότερες όσο το πάχος των τεμαχίων μεγαλύτερο, ενώ και το πλάτος της συγκόλλησης ενεργεί παρόμοια.

Όπως καταλαβαίνουμε, ως φυσικά απόρροια των παραπάνω τάσεων, έχουμε και την εμφάνιση των αντίστοιχων παραμορφώσεων, συνήθως μόνιμων, οι οποίες αντίστοιχα διακρίνονται σε διαμήκεις, εγκάρσιες και –πιο ασήμαντες – κατά το πάχος συγκόλλησης. Δύναται να παρουσιάζονται και στρεβλώσεις και μεταβολές γωνιακών στοιχείων, όπου αναφέρονται ως γωνιακές παραμορφώσεις.

Όσο αφορά τις σημαντικότερες δύο πρώτες κατηγορίες παραμορφώσεων, οι διαμήκεις παραμορφώσεις είναι ουσιαστικά συστολή κατά το μήκος της συγκόλλησης και οφείλεται κυρίως στη συστολή του τήγματος κατά τη στερεοποίηση, ενώ οι εγκάρσιες προέρχονται από τη συστολή στο επίπεδο της συγκόλλησης και κάθετα στο κορδόνι και σε αυτήν προστίθεται η συστολή από τη στερεοποίηση του τήγματος, η πλευρική σύνθλιψη των θερμών ζωνών και η σύγκλιση των προς συγκόλληση ελασμάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

A. Δείγματα και μεταλλογραφική προετοιμασία:

1. Δοκίμια: Υλικό, filler, μέθοδος συγκόλλησης και οι πειραματικές διαδικασίες συνοπτικά:

Τα δοκίμια μας, σύνολο 8 στον αριθμό, είναι ελάσματα τελικών διαστάσεων (μετά το πέρας της συγκόλλησης) 12cm x 6cm περίπου και πάχους >1mm, ηλεκτρικού χάλυβα με περιεκτικότητες: 0,08% άνθρακα, περίπου 0,75% πυρίτιο, 1,3% μαγγάνιο, φώσφορο και θείο κάτω από 0,01% και χαλκό γύρω στο 0,25%, τα οποία παράχθηκαν αρχικά, πριν την πραγματοποίηση συγκόλλησης, όπως η πλειοψηφία παρόμοιων βιομηχανικών προϊόντων, με έλαση. Δεν χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο προσανατολισμό κόκκων και η κρυσταλλογραφική του δομή αναμένεται να είναι σχετικά λεπτόκοκκη, αποτελούμενη κυρίως από στερεό διάλυμα φερρίτη, με τα κραματικά στοιχεία να εμπεριέχονται σε αυτό.

Υπέστησαν συγκόλληση με τη μέθοδο TIG, με την ένταση του ρεύματος να ανεβαίνει κατά 10A ανά δύο δοκίμια, ενώ για κάθε ένταση ρεύματος, το ένα με χρήση μετάλλου προσθήκης (filler) τύπου A5.18, ενώ το δεύτερο ως έχει, χωρίς χρήση filler. Η συγκόλληση ήταν μονού πάσου, λόγω του πολύ μικρού πάχους. Έτσι τα δοκίμια ήταν τα εξής:

- i. Δύο δοκίμια συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 20A: ένα με και ένα χωρίς filler. Για χάρη απλούστευσης και συντόμευσης ονομάστηκαν αντίστοιχα 20AF και 20A.
- ii. Δύο δοκίμια με ένταση ρεύματος κατά τη συγκόλληση 30A, 30A (χωρίς filler) και 30AF (με filler).
- iii. Παρόμοια, δύο δοκίμια συγκολλημένα με ένταση 40A (40A και 40AF).
- iv. Τέλος, άλλα δύο δοκίμια συγκολλημένα στα 50A, με ονομασίες 50A και 50AF.

Το είδος του filler, A5.18 είναι ουσιαστικά ράβδος επικαλυμμένη με λεπτό στρώμα χαλκού, με πυρήνα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χάλυβα, με σύνθεση: μέγιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,25%, μαγγάνιο να κυμαίνεται από 0,4 ως 0,7%, πυρίτιο 0,1% ως 0,5% και ίχνη φωσφόρου και θείου. Πρόκειται για υλικό τριπλά αποξειδωμένο για εξασφάλιση ασφάλειας ενάντια στην εμφάνιση πόρων, χαρακτηρίζεται από πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, σκληρότητα, δυσθραυστότητα και αποδεικνύεται ιδανικό είδος filler για συγκόλληση χαλύβων είτε κοινών ανθρακούχων είτε ελαφρά κραματωμένων. Το υψηλό σχετικά εμπεριεχόμενο ποσοστό πυριτίου εξασφαλίζει ικανοποιητική ρευστότητα του τήγματος, δημιουργώντας συγκόλληση, τόσο όσο αφορά την εξωτερική εμφάνιση όσο και την ποιότητα του εσωτερικού της ζώνης τήξης, ομαλή και ομοιόμορφη [17][18].

Σε πρώτη φάση, μετά το πέρας της συγκόλλησης, ανά δοκίμιο πάρθηκαν 3 σειρές μετρήσεων Barkhausen Noise από άκρο σε άκρο του τεμαχίου, κάθετα στη

ραφή της συγκόλλησης. Δεν προηγήθηκε κάποια προετοιμασία ή καθαρισμός των δειγμάτων, οι μετρήσεις πάρθηκαν με τα δείγματα ως είχαν. Οι μετρήσεις πάρθηκαν ανά 5mm στις ακριανές περιοχές, καθώς ήταν περιοχές εκτός της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, όσο όμως προχωράγαμε πήραμε ακόμα πιο πυκνές μετρήσεις, ανά 2mm και στην στενή γειτονία του πάσου, καθώς και πάνω ακριβώς από την συγκόλληση, ανά 1mm.

Μετά το πέρας των μετρήσεων αυτών, προχωρήσαμε σε κοπή αυτών των λωρίδων, καθώς και περαιτέρω περικοπή στα άκρα αυτών, προκειμένου να μειώσουμε το μέγεθος των δοκιμίων ώστε να είναι δυνατή η μελέτη αργότερα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM και για εστίαση των μετρήσεων μόνο στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη και τη συγκόλληση, καθώς και σε μια μικρή μη επηρεασμένη ζώνη του αρχικού μετάλλου, για χάρη μετέπειτα σύγκρισης τιμών και μικροδομής. Το αποτέλεσμα, από κάθε δοκίμιο προέκυψαν τρία επιμέρους δοκίμια μικρότερων διαστάσεων (κατά προσέγγιση 5,5cm x 2cm) και για κάθε ένα από αυτά ακολούθησε εγκιβωτισμός σε ρητίνη, λείανση με χρήση χαρτιών πυριτίου μέχρι κοκκομετρίας 1200, και επανάληψη μετρήσεων Barkhausen με την ίδια περίπου μεθοδολογία όπως παραπάνω, προκειμένου να επιβεβαιώσουμε τα πρώτα αποτελέσματα.

Σε τρίτη και τελευταία φάση ακολούθησε λείανση με πιο μικρόκοκκα χαρτιά λείανσης, στίλβωση, απεγκιβωτισμός, χημική προσβολή (σταδιακή, με ενδιάμεσες σύντομες παρατηρήσεις στο οπτικό μικροσκόπιο, προκειμένου να αποφευχθεί καταστροφή των δειγμάτων) και τέλος, παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για το κατά πόσο συσχετίζονται μικροδομή και μαγνητικές ιδιότητες σε μια τόσο συγκεκριμένη περίπτωση, όπως τον συγκολλημένο με TIG ηλεκτρικό χάλυβα.

2. Εγκιβωτισμός:

Ο εγκιβωτισμός συνίσταται στην επιλεκτική επικάλυψη του μεταλλικού δοκιμίου μας με πολυμερές υλικό, προκειμένου να αυξήσουμε το μέγεθός του και να το χειριζόμαστε ευκολότερα στις περαιτέρω διεργασίες. Γίνεται σε πρότυπους κυλίνδρους, με το δοκίμιο τοποθετημένο στο κέντρο. Χρησιμοποιήθηκε ρητίνη 2-Hydroxypropyl methacrylate, με αναλογία 2 μέρη σκόνη και 1 μέρος υγρό κατ' όγκο, με ισχυρή ανάδευση για 30 δευτερόλεπτα και έπειτα αφού μοιράστηκε το μίγμα ομοιόμορφα σε 12 καλούπια των 20-25mL, με τα δοκίμια ήδη στον πάτο, αφέθηκε για 15 - 20 λεπτά προκειμένου να στερεοποιηθεί.

Η χημική αντίδραση του πολυμερισμού συνίσταται στην εξουδετέρωση των ελεύθερων ριζών των ακόρεστων μονομερών, χωρίς καμία αποβολή προϊόντων αντίδρασης. Το σχηματιζόμενο υλικό έχει την ίδια χημική σύσταση με την πρώτη ύλη και ένα πολλαπλάσιο μοριακό βάρος του αρχικού. Κατά τη χημική αντίδραση διασπώνται οι διπλοί και οι τριπλοί δεσμοί και έτσι μπορούν πολλά μονομερή μόρια να συνδεθούν μεταξύ τους και να σχηματίσουν μόρια μεγάλου μοριακού βάρους. Η συγκολλητική ύλη που προκύπτει έχει μεγαλύτερη συγκολλητική ικανότητα και προσφύεται ισχυρότατα επάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Είναι στεγανή στο νερό και δεν επηρεάζεται από ελαφρά οξέα, λίπη, έλαια και άλλες χημικές ουσίες.

3. Λείανση:

Η λείανση πραγματοποιήθηκε σε οριζόντιο, υδρόψυκτο, μονοαξονικά περιστρεφόμενο τροχό, πάνω στην οποία τοποθετήσαμε λειαντικά χαρτιά σταδιακά αυξανόμενης κοκκομετρίας, καθώς προχωρούσε η λείανση των δοκιμίων. Ξεκινήσαμε με χαρτί των 80 κόκκων ανά τετραγωνική ίντσα και προχωρήσαμε στα 1200 και προς το τέλος, μόνο όταν τα δοκίμιά μας προορίζονταν για SEM και μέτρηση μικροσκληρότητας, στους 2400 κόκκους/inch² (ονομαστική πυκνότητα κόκκων). Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόκκων ανά μονάδα επιφάνειας, τόσο μικραίνει το μέγεθος των κόκκων και λεπταίνει το λειαντικό χαρτί. Άρα στην πρώτη λείανση χρησιμοποιήσαμε το χονδρότερο χαρτί και το λεπτότερο προς το τέλος, όσο τα δοκίμιά μας αποκτούσαν όλο και πιο λεία επιφάνεια. Το υλικό των λειαντικών χαρτιών μας ήταν καρβίδιο του πυριτίου (Silicon Carbide), ένα κρυσταλλικό υλικό σχεδόν το ίδιο σκληρό με το διαμάντι και ιδιαίτερα πυρίμαχο. Χρόνος παραμονής σε κάθε χαρτί ήταν, για το χαρτί των 80 κόκκων ανά τετραγωνική ίντσα, 5 λεπτά ενώ για τα μεγαλύτερα 10 λεπτά, χειροκίνητα, με στροφές 100rpm.

Το χαρτί μας κόπηκε σε σχήμα κυκλικό, στο μέγεθος της κεφαλής του λειαντικού μηχανήματος, προκειμένου να έχουμε τη βέλτιστη εφαρμογή και επιπεδότητα του χαρτιού και το στερεώσαμε με στεφάνι. Επίσης δεν παραλείψαμε να παρέχουμε συνεχώς στην επιφάνεια λείανσης νερό. Η ελεγχόμενη παροχή νερού βοηθά στην απαγωγή θερμότητας από το δοκίμιο και την απομάκρυνση γρεζιών. Κατά τη διάρκεια της όλης διαδικασίας δεν υπάρχει γενικά κίνδυνος οξείδωσης του μεταλλικού δοκιμίου. Όμως μετά το πέρας της λείανσης, επειδή η λειασμένη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα, επιβάλλεται απομάκρυνση του νερού και καθαρισμός αλλιώς κινδυνεύει να αλλοιωθεί. Άρα λοιπόν, μετά τη λείανση, το δοκίμιο ξεπλύθηκε με νερό, καθαρίστηκε με αιθανόλη και στεγνώθηκε με παροχή κρύου αέρα (όχι θερμό αέρα για να αποφύγουμε οποιαδήποτε θερμική επεξεργασία) με το δοκίμιο υπό γωνία ώστε να φεύγει ελεύθερα το νερό, με τη βοήθεια της βαρύτητας.

Η λείανση, μαζί με το στάδιο της στίλβωσης και σε περιπτώσεις με υψηλότερες απαιτήσεις ως προς την καθαρότητα της εικόνας της επιφάνειας των δοκιμίων, ήταν παρεμβαλλόμενα στάδια, πριν σχεδόν από κάθε διαδικασία, δηλαδή πραγματοποιήθηκαν πριν και την μακρο-σκληρομέτρηση Vickers, και την μέτρηση Barkhausen noise, τη μικροσκληρομέτρηση, τη μελέτη στο SEM και πριν την φωτογράφιση των δειγμάτων στο οπτικό μικροσκόπιο.

4. Στίλβωση:

Πρόκειται ουσιαστικά για λείανση αλλά σε επίπεδο μm. Πραγματοποιήσαμε στίλβωση με στόχο την εξαφάνιση όλων των λειαντικών γραμμών και να καταστήσουμε την επιφάνεια του δοκιμίου όσο γίνεται πιο επίπεδη και ομαλή, σαν καθρέφτη. Η διάταξη είναι πάλι οριζόντιος μονοαξονικά περιστρεφόμενος τροχός, χωρίς να είναι υδρόψυκτος.

Ξεκινήσαμε με αδαμαντόπαστα με μέγεθος διαμαντόκοκκων 3μm (κίτρινου χρώματος διαμαντόπαστα). Διασπείραμε ομοιόμορφα τη πάστα πάνω σε ειδικό ύφασμα, το οποίο είναι πολύ απαλό, με υφή παραπλήσια της τσόχας, το οποίο

τοποθετήσαμε σε περιστρεφόμενη κεφαλή. Ταυτόχρονα παρείχαμε πάνω στο πανί στίλβωσης υγρό στίλβωσης, ούτως ώστε να έχουμε καλή διασπορά των κόκκων και διατήρηση της επιφάνειας του πανιού όσο πιο λεία γινόταν. Αν η επιφάνεια του πανιού δεν είναι λεία υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ανεπιθύμητων γραμμών στο δοκίμιο και καταστροφή του. Περιστρέψαμε λοιπόν την κεφαλή με ταχύτητα περίπου 100rpm (στροφές/min) για 30 λεπτά για κάθε δοκίμιο, στο αυτόματο, και κρατήσαμε σε σταθερή επαφή το δοκίμιο με το περιστρεφόμενο πανί στίλβωσης, χωρίς άσκηση πίεσης και με περιστασιακή παροχή ποσότητας υγρού, όποτε στεγνώνει η επιφάνεια του πανιού, γίνεται πιο τραχιά και καθιστά τη στίλβωση δυσχερή. Αφού στίλβώσαμε με αδαμαντόπαστα 3μm επαναλάβαμε την όλη διαδικασία και με αδαμαντόπαστα με μέγεθος διαμαντοκόκκων 1μm. Τέλος ξεπλύναμε και καθαρίσαμε απαλά την επιφάνεια του δοκιμίου μετά το πέρας της στίλβωσης.

5. Χημική προσβολή:

Το τελευταίο στάδιο της μεταλλογραφικής προετοιμασίας. Είναι η επιλεκτική κατανάλωση/αντίδραση και «φάγωμα» των ορίων των κόκκων του μεταλλικού δοκιμίου μας. Επειδή τα όρια των κόκκων είναι άτομα που δεν κατάφεραν να μπουν σε κατάλληλες πλεγματικές θέσεις, λόγω της ανάπτυξης και σύγκρουσης των κόκκων μεταξύ τους κατά την κρυστάλλωση, είναι ενεργειακά αναβαθμισμένα και έτσι αντιδρούν πιο έντονα με χημικές ουσίες. Έτσι με την εμβάπτιση ενός μεταλλικού δοκιμίου σε ένα κατάλληλο αντιδραστήριο (κάποιο οξύ λόγω χάρη), με παροχή ρεύματος (ηλεκτροχημική προσβολή) ή χωρίς (απλή χημική προσβολή) τα όρια των κόκκων αντιδρούν και καταναλώνονται πιο γρήγορα από τους κρυστάλλους του υλικού. Έχουμε δηλαδή διαφορετική επιδεκτικότητα/ανεκτικότητα σε προσβολή, λόγω της διαφορετικής χημικής σύστασης και κρυσταλλογραφίας. Έτσι παρουσιάζεται μια ανομοιογένεια στο ανάγλυφο της επιφάνειας του δοκιμίου, καθώς εκεί που είναι τα όρια (οι διεπιφάνειες) των κόκκων έχουμε «σκάψιμο» της επιφάνειας. Έτσι έμμεσα καθιστούμε ορατούς τους κόκκους στο οπτικό μικροσκόπιο. Η ηλεκτρολυτική προσβολή επιλέγεται όταν το δοκίμιο μας είναι υλικό που δεν προσβάλλεται εύκολα, π.χ. ανοξειδωτος χάλυβας, και προϋποθέτει κατάλληλη εγκιβώτιση δοκιμίου, ώστε να εξέχει το ένα άκρο του, προκειμένου να μπορούμε να το συνδέσουμε με ηλεκτρόδιο και πηγή ρεύματος. Γενικά πάντα ξεκινάμε με το πιο δραστικό αντιδραστήριο και το λιγότερο χρόνο εμβάπτισης, προκειμένου να μην προσβληθεί υπερβολικά το δοκίμιο, χωρίς δηλαδή να «καεί».

Για τα δοκίμιά μας χρησιμοποιήσαμε διάλυμα Nital 2% κατ' όγκο, δηλαδή νιτρικό οξύ αραιωμένο σε αιθανόλη σε αναλογία 2mL – 98mL αιθανόλη . Εμβάπτισαμε τα δοκίμιά μας και τα κρατήσαμε μέσα στο αντιδραστήριο για περίπου 15sec (κατά μέσο όρο, καθώς κάθε δείγμα είχα διαφορετικό βαθμό παραμόρφωσης, άρα διαφορετική διαβάθμιση των κόκκων, άρα κατ' επέκταση και διαφορετική ταχύτητα και ένταση αντίδρασης με το Nital, διότι ως γνωστόν, όσο μεγαλύτερη η πλαστική παραμόρφωση, τόσο γρηγορότερη η αντίδραση). Έπειτα τα καθαρίσαμε και στεγνώσαμε για να θέσουμε τέλος στη χημική προσβολή. Η

επιφάνεια που προσβάλλαμε θάμπωσε και σκούρυνε ελαφρώς, ένδειξη του ότι πετύχαμε ικανοποιητική προσβολή.

B. Πειραματικές διατάξεις:

Παρακάτω περιγράφω συνοπτικά γενικά τις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν με τη σειρά που πραγματοποιήθηκαν. Η μέθοδο συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε ήδη στο κεφάλαιο του Θεωρητικού Μέρους της παρούσας εργασίας.

1. Διάταξη μέτρησης Barkhausen noise:

Χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη σημειακής μέτρησης, η οποία αποτελείτο από:

1. έναν ηλεκτρομαγνήτη που τροφοδοτείται με ρεύμα διέγερσης σταθερής συχνότητας 10 Hz και διεγείρει με πεδίο το υπό εξέταση υλικό
2. πηνίο τυλιγμένο στον πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη μέσω του οποίου ελέγχεται η σωστή ηλεκτρομαγνητική σύζευξη του αισθητήρα με το δοκίμιο (μεγιστοποιείται η ένδειξη του) και ταυτόχρονα παρέχει μια επιπλέον ποιοτική πληροφορία σχετικά με τη μαγνητική διαπερατότητα του υπό εξέταση υλικού, το οποίο εφεξής θα ονομάζεται πηνίο διαπερατότητας και η αντίστοιχη μέτρηση «ενδεικτική μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας» και
3. ένα πηνίο λήψης τοποθετημένο στο ενδιάμεσο μεταξύ των δύο πόδων του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη στο οποίο είναι ενσωματωμένος ραβδόμορφος φερρίτης, ο οποίος αφενός έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την απόστασή του καθ' ύψος και να προσαρμόζεται στην επιφάνεια του δείγματος όταν αυτό έχει μικρές επιφανειακές ανωμαλίες και αφετέρου ενισχύει το σήμα από το πηνίο λήψης (η όλη διάταξη θα ονομάζεται εφεξής διάταξη BHN)
4. μια γεννήτρια παραγωγής τριγωνικού εναλλασσόμενου ρεύματος 10 Hz και δυνατότητα ρύθμισης της ενίσχυσης του (dB) ώστε να βελτιστοποιείται η απόκριση του σήματος ανάλογα με το υπό εξέταση υλικό (σκληρό ή μαλακό μαγνητικό υλικό) και
5. μια κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) που λαμβάνει, και ενισχύει το σήμα της διάταξης BHN και στην συνέχεια δίνει ως εξόδους τρεις ενδείξεις, τον αριθμό των σημείων τομής ενός κατωφλίου τάσης με τον BHN ο οποίος δείχνει τον αριθμό των παλμών Barkhausen πάνω από αυτό το κατώφλι (counts), την ενεργό τιμή του σήματος Barkhausen (rms) και την ενδεικτική μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας. Η διάταξη έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει το κατώφλι τάσης σε 6 διαφορετικά επίπεδα.[5][6]



Εικόνα 1.1: Πειραματική διάταξη Barkhausen Noise.

3. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM) Αρχή λειτουργίας:

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία (electron microscopy) κάνει χρήση των ιδιοτήτων των ηλεκτρονίων καθώς αυτά οπισθοσκεδάζονται από ένα σώμα ή διέρχονται μέσα από αυτό. Η υπεροχή ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου εν συγκρίσει με ένα οπτικό στηρίζεται στα εξής. Ένα οπτικό μικροσκόπιο μας επιτρέπει μεγέθυνση εκατοντάδων φορών. Ωστόσο η ελάχιστη λεπτομέρεια που μπορεί να διακριθεί είναι περίπου 200 nm , όριο το οποίο το θέτει η κυματική φύση του ορατού φωτός και το ελάχιστο μήκος κύματος του. Αντιθέτως, ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο εκμεταλλεύεται τη κυματική φύση των ηλεκτρονίων σε μήκη κύματος πολύ μικρότερα. Η τελική μέγιστη ανάλυση είναι της τάξεως του 0,1 nm καθώς υπεισέρχονται περιορισμοί από τη κατασκευή του οργάνου. Σε ένα SEM μικροσκόπιο καθώς το δείγμα σαρώνεται το παραγόμενο σήμα μετατρέπεται σε εικόνα με τη βοήθεια μίας φθορίζουσας οθόνης καθοδικού σωλήνα (cathode ray tube , CRT) καθώς αυτή σαρώνεται με τον ίδιο ρυθμό με το δείγμα. Η μεγέθυνση ορίζεται ως το εμβαδό της οθόνης προς το εμβαδό της περιοχής όπου σαρώνεται. Ένα τυπικό SEM μικροσκόπιο αποτελείται από τα εξής:

1. Ένα πολυβόλο ηλεκτρονίων
2. Ένα σύστημα ανίχνευσης ηλεκτρονίων καθώς και μια μονάδα απεικόνισης
3. Ένα σύστημα κενού

Το πολυβόλο ηλεκτρονίων (electron gun) παράγει μια έντονη δέσμη ηλεκτρονίων η οποία εστιάζεται πάνω σε ένα μικρό σημείο στο εξεταζόμενο δείγμα - στόχο (target). Η αρχή λειτουργίας του σύντομα έχει ως ακολούθως. Ένα νήμα

βολφραμίου (tungsten filament) στο ρόλο της καθόδου θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 2500 και 2700 K με αποτέλεσμα να εκπέμπονται από αυτό ηλεκτρόνια καθώς τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να υπερνικήσουν το έργο εξόδου. Αυτό ο τύπος πολυβόλου ονομάζεται θερμιονικός εκπομπός (thermionic emitter). Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται προς ένα διάφραγμα το οποίο διατηρεί υψηλά θετικό δυναμικό. Σπανιότερα χρησιμοποιείται εκπομπός πεδίου (field emitter) όπου τα ηλεκτρόνια αναγκάζονται να διαφύγουν από πολύ λεπτή ακίδα καθώς αυτή βρίσκεται σε διαφορά δυναμικού αρκετά μεγάλη ώστε να ηλεκτρονία να διαφύγουν του υλικού μέσω του φαινομένου σήραγγας. Επιστρέφοντας στον πρώτο τύπο, το νήμα βρίσκεται στο εσωτερικό ενός συγκλίνοντα ηλεκτροστατικού φακού όπου αναλαμβάνει να εστιάσει τα παραγόμενα ηλεκτρόνια και με τη βοήθεια του διαφράγματος παράγεται τελικά μία αποκλίνουσα δέσμη ηλεκτρονίων περιορισμένης διαμέτρου. Ο φακός αυτός ονομάζεται Wehnelt cap και διατηρεί αρνητικό δυναμικό. Το μήκος κύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων καθορίζεται από τη διαφορά δυναμικού V μεταξύ καθόδου και ανόδου. Τα ηλεκτρόνια σε τέτοιο δυναμικό αποκτούν κινητική ενέργεια eV. Η ποιότητα της εικόνας εξαρτάται κυρίως από

1. Το μέγεθος της διατομής της ακτίνας (όσο πιο μικρό τόσο το καλύτερο)
2. Το σχήμα της διατομής της ακτίνας (υπό ιδανικές συνθήκες πρέπει να είναι κυκλικό)
3. Η μέγιστη ένταση της δέσμης ηλεκτρονίων (όσο πιο έντονη τόσο το καλύτερο).

Σύστημα κενού είναι απαραίτητο προκειμένου να παραχθούν, ανιχνευτούν και να μετρηθούν τα ηλεκτρόνια. Τυπικές τιμές για το κενό είναι τα 10^{-6} mmHg. Καθώς η εξερχόμενη από το πολυβόλο δέσμη δεν είναι παράλληλη ένα μαγνητικό πεδίο αναλαμβάνει να εστιάσει τη δέσμη αυτή ακριβώς πάνω στο τελικό διάφραγμα. Το μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται από κυλινδρική συμμετρία και δημιουργείται από δύο κατάλληλα διατεταγμένα ζεύγη μαγνητικών πόλων. Τότε έχουμε έναν φακό συμπύκνωσης (condensation lens). Καθώς τα ηλεκτρόνια της δέσμης διέρχονται από το μαγνητικό φακό αναγκάζονται να διαγράψουν ελικοειδή τροχιά. Η σύγκλιση, θα πρέπει ωστόσο να τονιστεί εδώ, ότι δεν είναι τέλεια καθώς τέτοιου είδους φακοί ηλεκτρονίων χαρακτηρίζονται από σφάλματα, όπως εξάλλου και οι οπτικοί φακοί. Διασπορά της ενέργειας των ηλεκτρονίων έχει ως αποτέλεσμα και διαφορετικό σημείο εστίασης αυτών των ηλεκτρονίων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται χρωματική εκτροπή (chromatic aberration). Επιπλέον, καθώς το μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρότερο σε μεγάλες αποστάσεις από τον κεντρικό άξονα τα ηλεκτρόνια δέχονται μεγαλύτερη δύναμη από αυτό με αποτέλεσμα να εστιάζονται σε μικρότερες αποστάσεις. Τότε έχουμε σφάλμα σφαιρικής εκτροπής (spherical aberration). Η μονάδα ανίχνευσης μετράει τον αριθμό των ηλεκτρονίων τα οποία προσπίπτουν σε αυτή και έχει τέτοια θέση έτσι ώστε μόνο ηλεκτρόνια από το δείγμα να ανιχνεύονται. Επιπλέον, η ποιότητα της τελικής εικόνας εξαρτάται και από τον ανιχνευτή κατά τους εξής τρόπους:

1. Την ευαισθησία του (υψηλότερη τόσο το καλύτερο)
2. Το επίπεδο θορύβου του (είναι επιθυμητό να βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα)

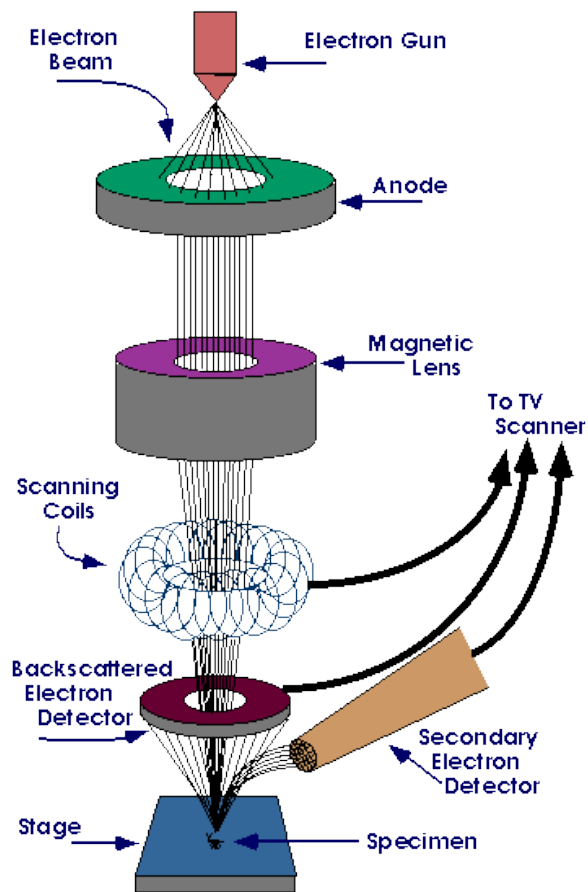
Η σάρωση του δείγματος και η σάρωση της οθόνης γίνονται συγχρονισμένα καθώς χρησιμοποιούν το ίδιο σήμα, σήμα το οποίο παράγεται από κοινή πηγή, τη γεννήτρια σάρωσης (scan generator). Δύο ζεύγη πλακών δημιουργούν δύο μεταβαλλόμενα κάθετα μεταξύ τους και παράλληλα στην επιφάνεια ηλεκτρικά πεδία, με τρόπο που ορίζει η γεννήτρια σάρωσης. Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η εστίαση της δέσμης σε κάθε σημείο του δείγματος. Κατά τη διάρκεια της ο ανιχνευτής αναλαμβάνει τη μετάδοση του σε καθοδικού σωλήνα όπου εκεί τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από τη διαφορά δυναμικού η οποία επικρατεί μεταξύ καθόδου και ανόδου και διεγείρουν κάθε σημείο της φθορίζουσας οθόνης τόσο περισσότερο όσο περισσότερα είναι στον αριθμό. Καθώς το δείγμα δεν είναι ανάγκη να βρίσκεται κοντά στο τελικό διάφραγμα μπορούμε να επιτύχουμε ευρύ βάθος εστίασης (depth of focus) αν η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγάλη. Όπως είδαμε καθώς η δέσμη των ηλεκτρονίων προσπίπτει στο δείγμα ένα πλήθος διαφορετικής φύσης αλληλεπιδράσεων λαμβάνει χώρα. Τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια όπου παράγονται είναι σχετικά λίγα σε αριθμό κι επομένως χρειάζεται ενίσχυση του ανάλογου σήματος.

Επιπλέον, επειδή οι διευθύνσεις όπου παράγονται είναι τυχαίες πρέπει με κάποιο τρόπο να συλλεχθούν. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται μια πλάκα (η πλάκα p του σχήματος αριστερά) υψηλού θετικού δυναμικού όπου έλκει τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Κατά την πρόσπτωση τους σε αυτή επιπλέον παράγονται φωτόνια. Τα φωτόνια αυτά προσπίπτουν στην πλάκα E του σχήματος και παράγονται ηλεκτρόνια. Με διαδοχικά τέτοια βήματα επιτυγχάνεται ενίσχυση του σήματος. Τα ηλεκτρόνια αυτά παραγόμενα από ένα μικρό βάθος της επιφάνειας του δείγματος, το πολύ 10 nm , φέρουν πληροφορίες για αυτήν αλλά χάνουν την πληροφορία της κατεύθυνσης από όπου προήλθαν καθώς συλλέγονται από διάφορες κατευθύνσεις και οδεύουν προς μία.

Λιγότερα είναι τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια τα οποία έχουν ενέργεια όση αυτή της αρχικής δέσμης. Σε αντίθεση με τα δευτερεύοντα μπορούν να δώσουν πληροφορία για τη δομή της επιφάνειας καθώς περιέχουν την πληροφορία της διεύθυνσης από όπου προήλθαν. Επίσης δεν υπάρχει ανάγκη για ενίσχυση του ήδη ισχυρού σήματος ενώ πριν από την πλάκα βρίσκεται πλέγμα αρνητικού δυναμικού το οποίο εμποδίζει τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια να εισέλθουν στον ανιχνευτή. Οι ακτίνες X τέλος, έχοντας ενέργειες χαρακτηριστικές των ατομικών ειδών, ανιχνεύονται δίνοντας πληροφορίες για τη χημική σύσταση του δείγματος. Ένας τρόπος ανίχνευσης στηρίζεται στη μέτρηση της έντασης των παλμών όπου δημιουργούνται καθώς τα εκπεμπόμενα φωτόνια προσπίπτουν σε επαφή p - n δημιουργώντας έτσι ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται φασματομετρία διασποράς ενέργειας ακτινών X (energy dispersive x - ray spectrometry EDX). [7]



Εικόνα 3.1: Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο SEM.

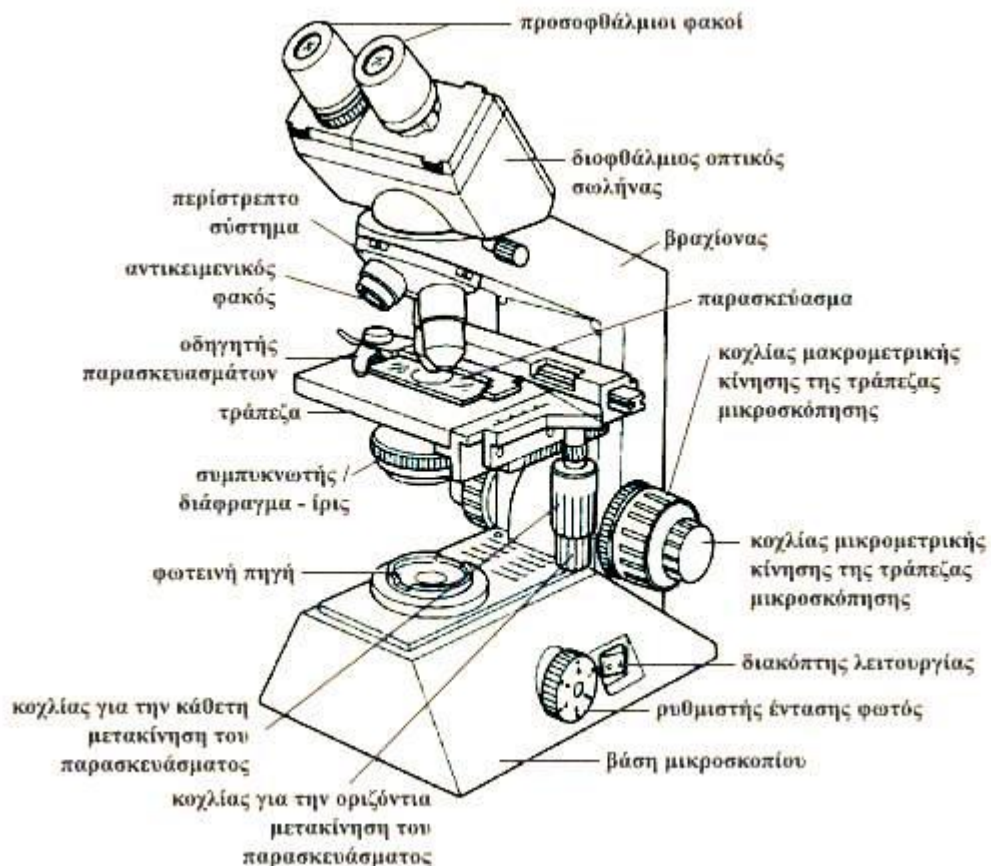


Εικόνα 3.2: Αρχή λειτουργίας μικροσκοπίου SEM.

4. Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο:

Το οπτικό μικροσκόπιο λέγεται και σύνθετο γιατί το ουσιαστικό στοιχείο του είναι ένα σύστημα φακών. Επειδή το πιο σημαντικό τμήμα του είναι το οπτικό σύστημα, δηλαδή ένα σύστημα από φακούς κατάλληλα διευθετημένους, οι ιδιότητες του οργάνου ταυτίζονται κατά κύριο λόγο με τις ιδιότητες των φακών που σχετίζονται με το φαινόμενο της διάθλασης του φωτός. Το οπτικό τμήμα αποτελείται από δύο συγκλίνοντα ομοαξονικά συστήματα φακών που αποτελούν τον αντικειμενικό και τον προσοφθάλμιο φακό. Ο πρώτος έχει μικρή εστιακή απόσταση. Το αντικείμενο τοποθετείται λίγο πέρα από την εστία του φακού και έτσι σχηματίζεται είδωλο πραγματικό και ανεστραμμένο. Ο δεύτερος είναι ο φακός με τον οποίο ο παρατηρητής βλέπει το αντικείμενο και χρησιμεύει για να μεγεθύνει την πραγματική εικόνα που δίνει ο αντικειμενικός. Η απόσταση μεταξύ των 2 φακών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των εστιακών τους αποστάσεων, ώστε το είδωλο του αντικείμενου να σχηματίζεται ανάμεσα στο οπτικό κέντρο και στην κύρια εστία του προσοφθάλμιου. Κατά συνέπεια προκύπτει φανταστικό είδωλο, μεγεθυμένο, του πρώτου ειδώλου.

Αξιοποιήθηκε για την παρατήρηση των δειγμάτων μετά το πέρας των μεταλλογραφικών διεργασιών (λείανση, στίλβωση, χημική προσβολή), προκειμένου να διαπιστωθεί η επιτυχημένη ή όχι διεκπεραίωσή τους, καθώς και για λήψης μερικών ενδεικτικών εικόνων της μικροδομής αυτών.



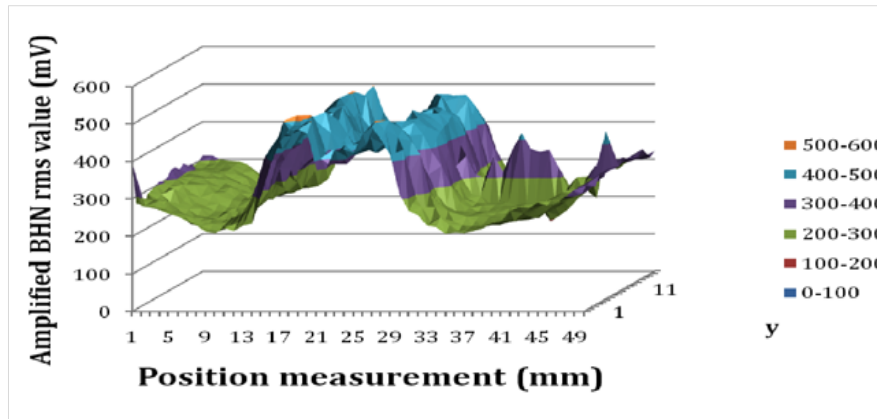
Εικόνα 4.1: Οπτικό μικροσκόπιο.

Γ. Αποτελέσματα πειραματικών διαδικασιών - Σχολιασμός:

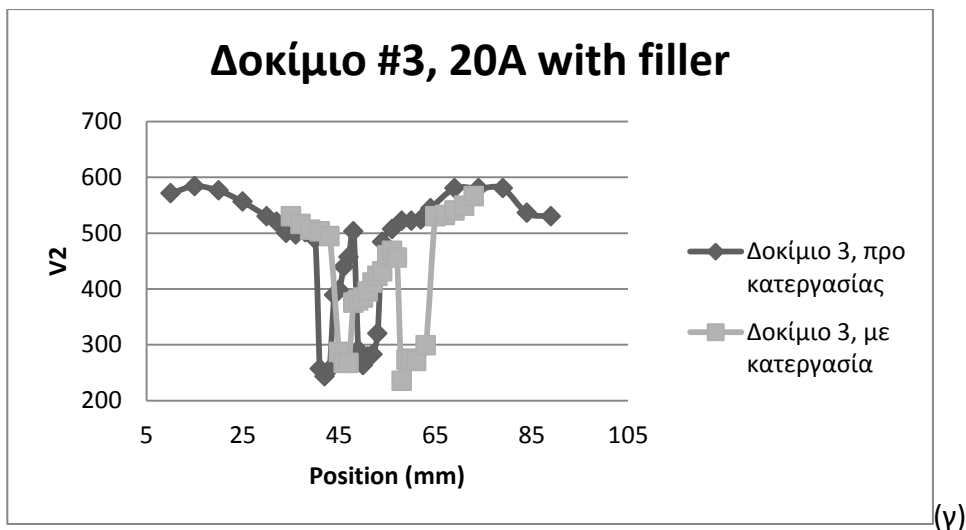
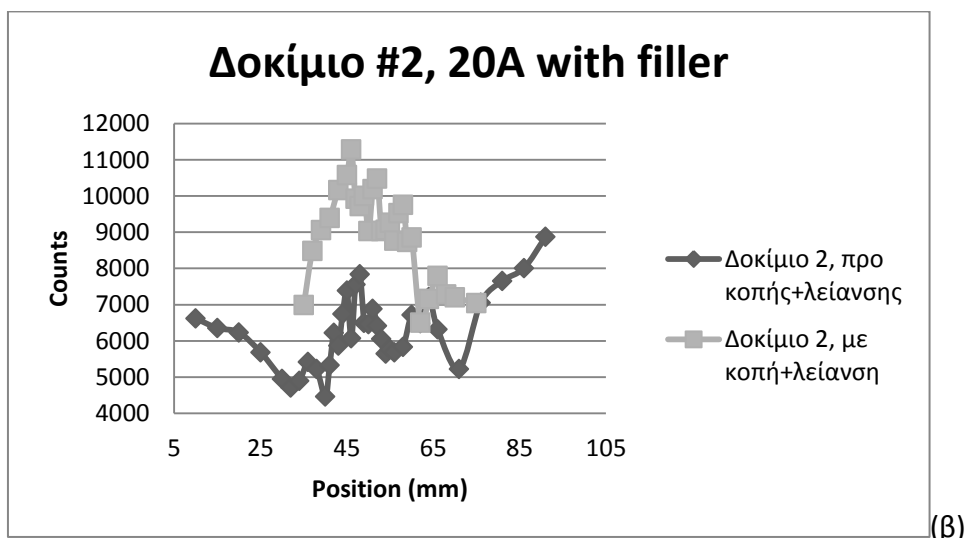
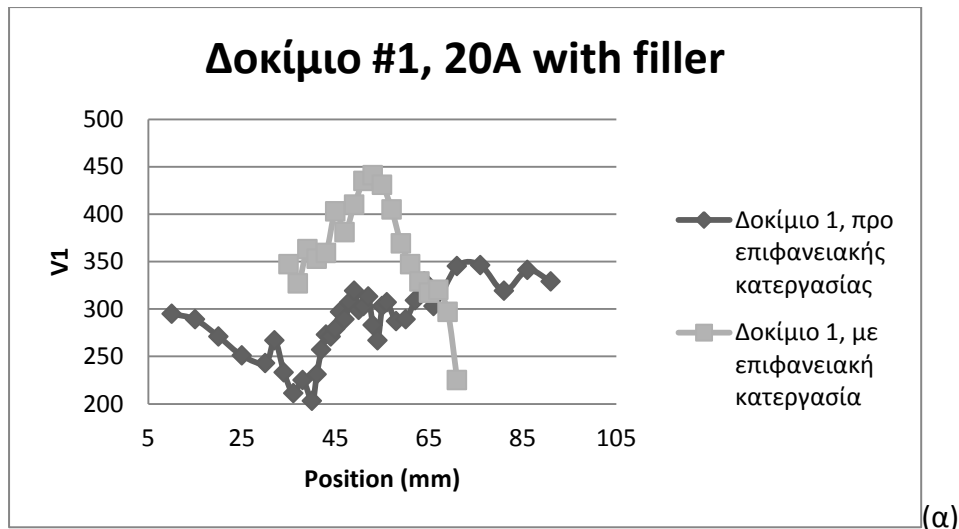
1. Αποτελέσματα μέτρησης Barkhausen noise:

Η παράμετρος V1 απεικονίζει την πραγματική ένταση του BE (the effective intensity of the Barkhausen Effect) ή αλλιώς την ενεργό τιμή στου σήματος Barkhausen, τα counts είναι τα peaks του παλμογράφου (οι ηλεκτρικοί παλμοί που σημειώνονται στο πηνίο λήψης που αντιστοιχούν σε μετακινήσεις μαγνητικών τοιχωμάτων), ενώ η παράμετρος V2 αντικατοπτρίζει ουσιαστικά τις συνθήκες μαγνήτισης. Το επίτεδό της εξαρτάται από τη θέση του αισθητήρα, την ποιότητα της επαφής καθώς και από τη μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του υπό εξέταση υλικού. Επίσης εξαρτάται και από την κατάσταση του υλικού, την καταπόνησή του και τις παραμένουσες τάσεις: μειώνεται όταν υπάρχουν θλιπτικές τάσεις (compressive stress) και αυξάνεται στην περίπτωση εφελκυστικών (tensile stress). Το γεγονός αυτό καθιστά τη παράμετρο V2 χρήσιμη για την σωστή τοποθέτηση του αισθητήρα και την ποιοτική εκτίμηση του δοκιμίου. Πρακτικά πάντως ουσιαστικά αναπαριστά τη μαγνητική διαπερατότητα. Τέλος τα thresholds είναι οι προκαθορισμένες τιμές τάσης κατωφλιού, μια συγκεκριμένη τιμή τάσης, πάνω από την οποία πρέπει να είναι το σήμα του Barkhausen effect για να καταμετρηθεί και να έχουμε αριθμό συμβάντων (περιστροφές μαγνητικών περιοχών) [15][16]. Αυτό τέθηκε σταθερό στο 1, το χαμηλότερο και πιο ευαίσθητο δηλαδή δυνατό.

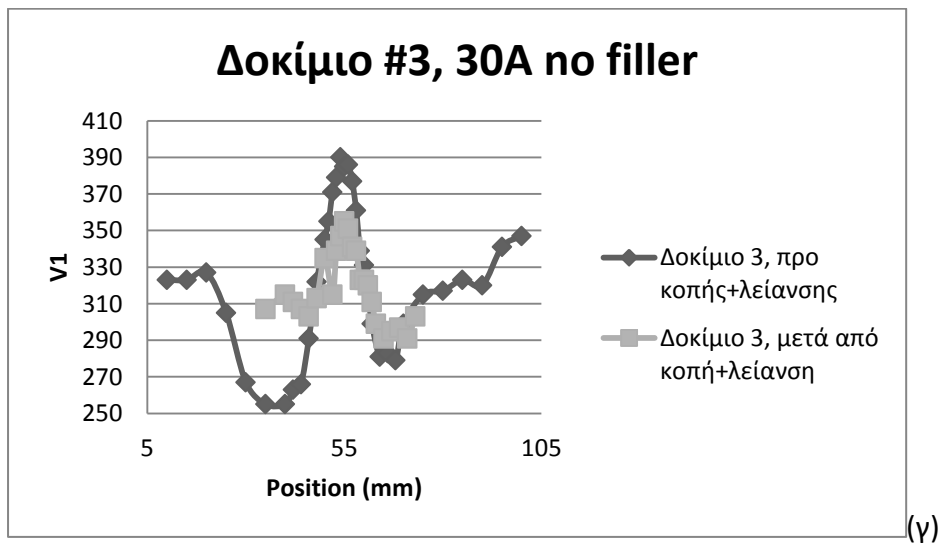
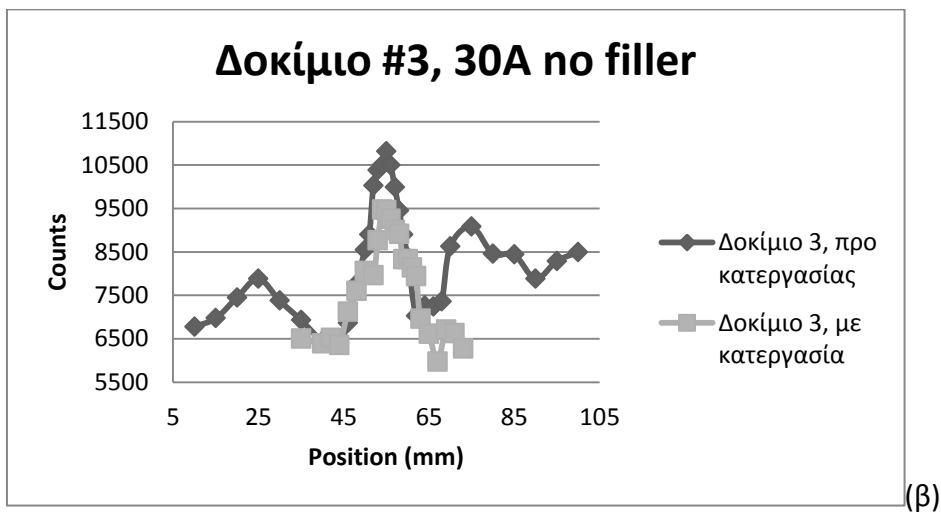
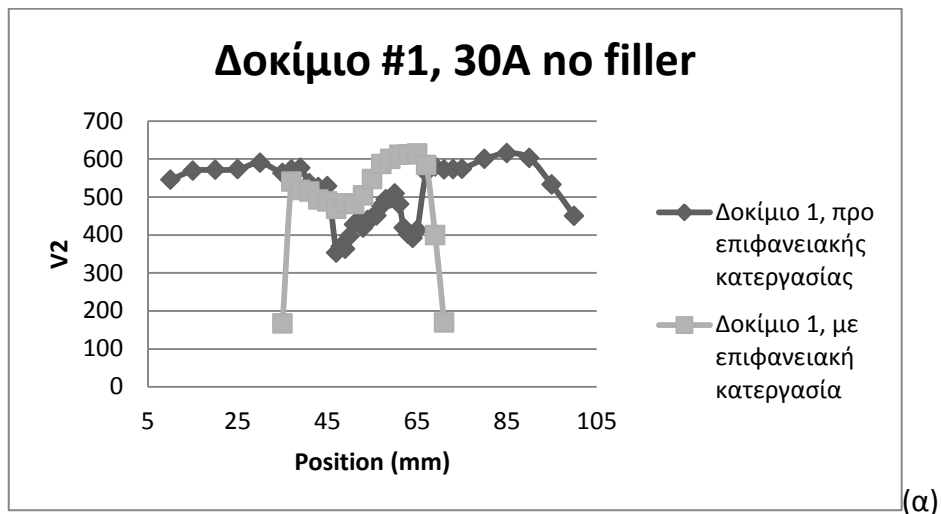
Οι μετρήσεις παραθέτονται στο τέλος της παρούσας εργασίας, στο παράρτημα, μαζί με όλα τα διαγράμματα που χαράχθηκαν με βάση αυτών. Ανά δοκίμιο χαράχθηκαν 3 διαγράμματα, κάθε παράμετρος του Barkhausen Noise συναρτήσε της θέσης πάνω στο δοκίμιο, όπου τοποθετήθηκε ο αισθητήρας, με 2 καμπύλες, μία για το αντίστοιχο δοκίμιο / λωρίδα, που αντιστοιχεί στις μετρήσεις της πρώτης φάσης (πριν την οποιαδήποτε μεταλλουργική κατεργασία, με την συγκόλληση ως είχε μετά το πέρας της) και τη δεύτερη να αντιστοιχεί στις μετρήσεις της δεύτερης φάσης που αποσκοπούσε στην επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, αφού δηλαδή προηγήθηκε κοπή και μεταλλουργική κατεργασία καθαρισμού της επιφάνειας των συγκολλημένων δοκιμίων (εγκιβωτισμός, λείανση). Ακολουθεί και μια γενικευμένη αναπαράσταση των αποκρίσεων των δοκιμίων (εικόνα 1.1). Παρακάτω παραθέτονται μερικά ενδεικτικά διαγράμματα ορισμένων δοκιμίων.



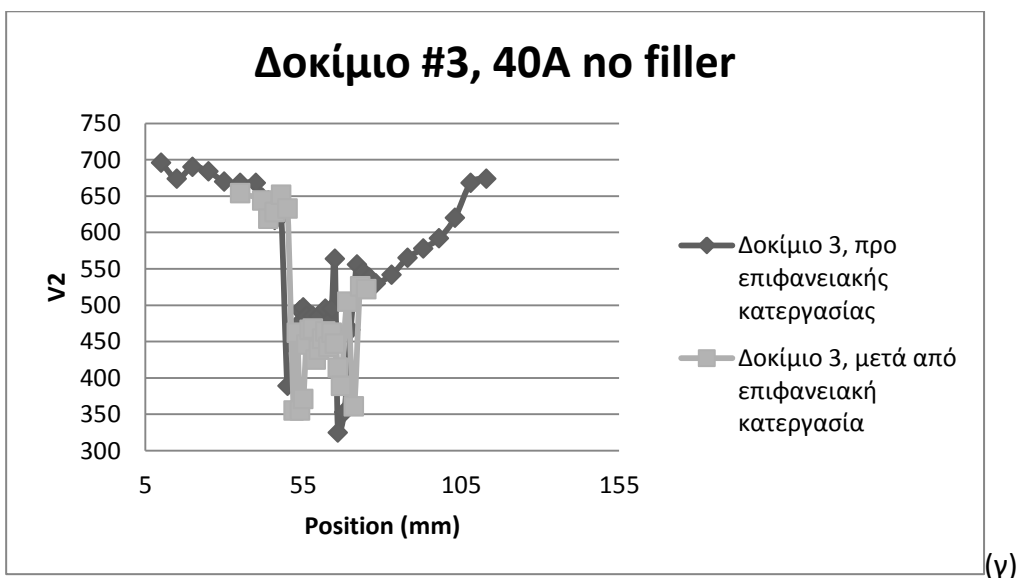
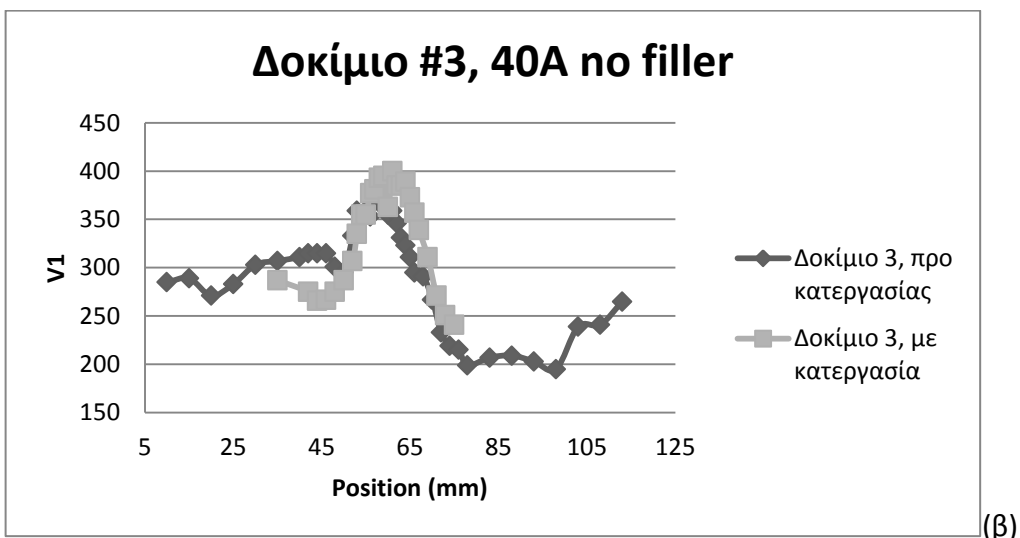
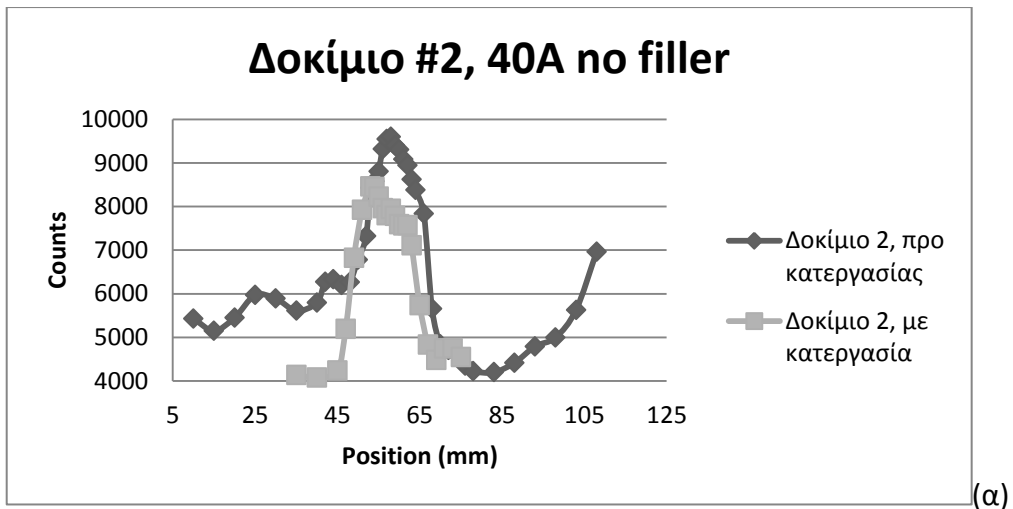
Εικόνα 1.1: Μια γενική διαγραμματική αναπαράσταση των αποκρίσεων Barkhausen Noise (BHN) των συγκολλημένων δοκιμίων. Παρατηρούμε πως η απόκριση συμφωνεί με το πεδίο τάσεων που προέκυψε από τη συγκόλληση.



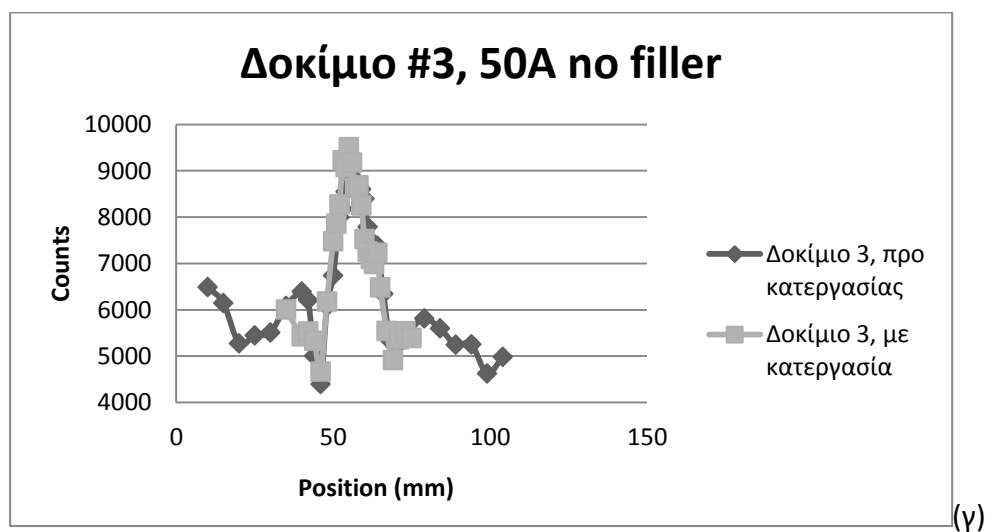
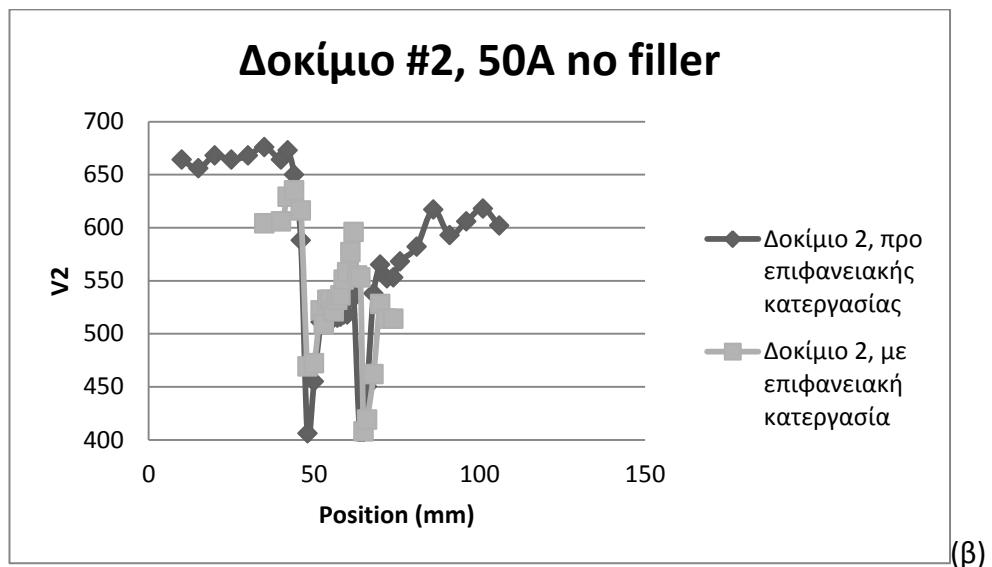
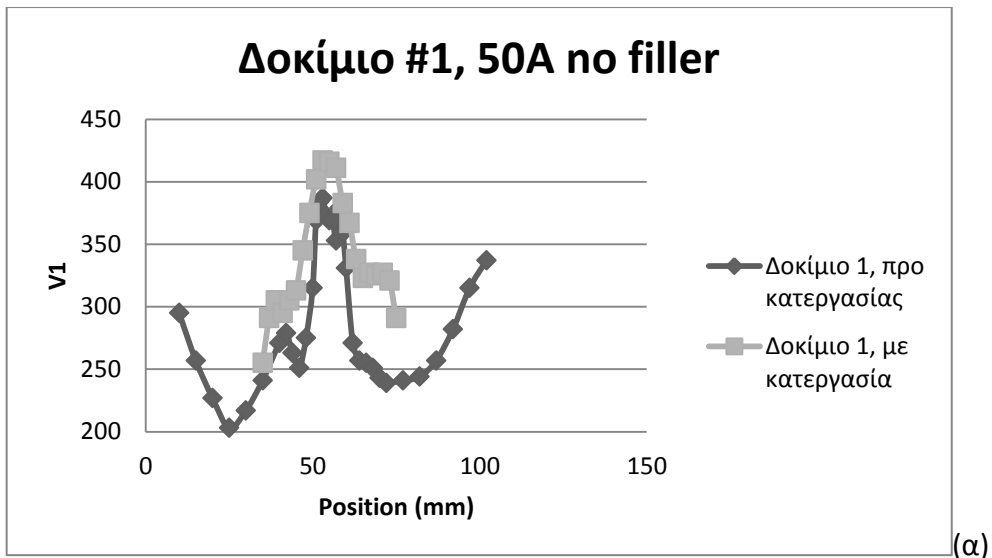
Εικόνα 1.2: Δοκίμια 20AF: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 20A, με χρήση μετάλλου προσθήκης. (α) Διάγραμμα θέσης-αλμάτων Barkhausen, (β) θέσης-ενεργού τιμής σήματος Barkhausen, (γ) θέσης-ποιοτικής ένδειξης μαγνητικής διαπερατότητας.



Εικόνα 1.3: Δοκίμια 30A: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 30A, χωρίς μέταλλο προσθήκης. (α) Διάγραμμα θέσης-αλμάτων Barkhausen, (β) θέσης-ενεργού τιμής σήματος Barkhausen, (γ) θέσης-ποιοτικής ένδειξης μαγνητικής διαπερατότητας.



Εικόνα 1.4: Δοκίμια 40A: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 40A, χωρίς μέταλλο προσθήκης. (α) Διάγραμμα θέσης-αλμάτων Barkhausen, (β) θέσης-ενεργού τιμής σήματος Barkhausen, (γ) θέσης-ποιοτικής ένδειξης μαγνητικής διαπερατότητας.



Εικόνα 1.5: Δοκίμια 50Α: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 50Α χωρίς μέταλλο προσθήκης.
 (α) Διάγραμμα θέσης-αλμάτων Barkhausen, (β) θέσης-ενεργού τιμής σήματος Barkhausen,
 (γ) θέσης-ποιοτικής ένδειξης μαγνητικής διαπερατότητας.

2. Παρατηρήσεις:

Σε γενικές γραμμές, με βάση την εικόνα 1.1, αλλά και τις υπόλοιπες εικόνες (1.2 – 1.5), παρατηρούμε πως, ανεξάρτητα από την ένταση του ρεύματος με την οποία πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση ή την χρήση ή μη μετάλλου προσθήκης (filler), όσο οι μετρήσεις που πάρθηκαν πλησίαζαν και σάρωναν, τόσο την περιοχή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης όσο και την ίδια τη ραφή της συγκόλλησης, παρουσιάστηκε μια ανοδική τάση, τόσο στα counts, τον αριθμό δηλαδή των αλμάτων των μαγνητικών τοιχωμάτων παρουσία μαγνητικού πεδίου (εικόνα 1.2 – 1.5, διαγράμματα (α)), όσο και στο V1, της έντασης δηλαδή του φαινομένου Barkhausen (ενεργό τιμή του BHN), όπως φαίνεται στα διαγράμματα (β) των εικόνων 1.2, 1.3, 1.4 και 1.5, ενώ στα διαγράμματα του V2 (διαγράμματα (γ) των εικόνων 1.2 – 1.5), χωρίς να ξεχνάμε τόσο τα όσα περιγράψαμε παραπάνω για τις παραμένουσες τάσεις και τη φύση αυτών όσο και το ότι η παράμετρος V2 εξαρτάται και από την κατάσταση του υλικού, την καταπόνησή του και τις παραμένουσες τάσεις (μειώνεται όταν υπάρχουν θλιπτικές τάσεις (compressive stress) και αυξάνεται στην περίπτωση εφελκυστικών (tensile stress)) παρατηρήθηκε μια έντονη πτωτική τάση, γεγονός που μαρτυρά ότι τόσο στην ίδια τη συγκόλληση όσο και στην γειτονική περιοχή που τοποθετείται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη η αρχική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (πριν πραγματοποιηθεί η συγκόλληση) διαταράχθηκε και παρουσιάζεται μειωμένη, ειδικά στις θέσεις μέτρησης πολύ κοντά ή και ακριβώς από πάνω από τη ραφή, με τις μικρότερες ενδείξεις να παρουσιάζονται στις ίδιες θέσεις που παρουσιάζονται οι αντίστοιχες υψηλότερες στις δύο παραπάνω παραμέτρους. Τόσο και πριν την μεταλλουργική κατεργασία / καθαρισμό της επιφάνειας των συγκολλημένων τεμαχίων, όσο και μεταγενέστερα, αφού πραγματοποιήθηκε η λείανση και καθαρισμός της επιφάνειας από οξειδία και τυχόν ανωμαλίες αυτής, οι ανοδικές και πτωτικές αυτές τάσεις των αντίστοιχων παραμέτρων δείχνουν να επαναλαμβάνονται. Γενικά παρατηρούμε πως οι μαγνητικές αποκρίσεις συμφωνούν με το πεδίο τάσεων που δημιουργήθηκε από τη συγκόλληση, με μικρές αποκλίσεις και αυξομειώσεις σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω τόσο των ήδη υπαρχόντων τάσεων των δοκιμίων, προερχόμενες από την διαδικασία παραγωγής τους.

Το γεγονός αυτό μαρτυρά αύξηση των περιστροφών των μαγνητικών περιοχών και των μαγνητικών τοιχωμάτων, άρα αυτό σημαίνει πως σημειώθηκε αύξηση των τοιχωμάτων 180° σε βάρος των 90° , τα οποία είναι λιγότερο ευκίνητα (λόγω των συγκεκριμένων εύκολων αξόνων περιστροφής). Έτσι λοιπόν είχαμε ενίσχυση του θορύβου Barkhausen αλλά και αύξηση της μέσης ελεύθερης απόστασης που τα τοιχώματα μπορούν να διανύσουν. Γενικά πάντως, ένα από τα δύο σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός υλικού που επηρεάζουν την ένταση του σήματος του Barkhausen noise είναι η πιθανή ύπαρξη διαταραχής λόγω τάσεων παραμόρφωσης, όπου μπορεί με τη σειρά της να διαφοροποιήσει την κατεύθυνση που θα επιλέξουν οι μαγνητικές περιοχές (ή σωστότερα, τα τοιχώματά τους) για να μετακινηθούν κατά τη μαγνήτιση υπό την επίδραση πεδίου. Το φαινόμενο επίδρασης των ελαστικών ιδιοτήτων με την δομή των μαγνητικών περιοχών και των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού λέγεται μαγνητοελαστική αλληλεπίδραση (magneto elastic interaction). Ως αποτέλεσμα αυτής, σε υλικό με θετική μαγνητοανισοτροπία, όπως ο σίδηρος, κοβάλτιο κλπ, (positive magnetic anisotropy),

θλιπτικές τάσεις θα μειώσουν την ισχύ του Barkhausen noise ενώ εφελκυστικές την ενισχύουν. Αυτό το γεγονός μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε προκειμένου, μετρώντας την ισχύ του σήματος (intensity of Barkhausen noise) να διαπιστώσουμε την ύπαρξη ή όχι παραμενουσών τάσεων (residual stresses) και ακολούθως την ύπαρξη ή όχι παραμόρφωσης, το είδος της, το βαθμό της και να ορίσουμε την κατεύθυνση των κύριων τάσεων (principal stresses).

Φυσικά, ας μην ξεχνάμε πως, όπως σε όλες τις μεθόδους συγκόλλησης, όποιο και αν είναι το προς συγκόλληση υλικό, πάντα υπάρχει ο κίνδυνος, ειδικά στις χειρωνακτικές μεθόδους, να προκύψει είτε κάποιο σφάλμα κατά τη συγκόλληση, η ύπαρξη κάποιου πόρου ή ρωγμάτωσης στο εσωτερικό της ραφής, εγκλωβισμός κάποιας ακαθαρσίας ή κάποια ασυνέχεια στην απόθεση του filler, για την περίπτωση όπου προστέθηκε. Όλα τα παραπάνω είναι δυνατόν να δράσουν ως εμπόδια στις περιστροφές των μαγνητικών περιοχών και, κατ' επέκταση, να επηρεάσουν τις μαγνητικές ιδιότητες και τις αντίστοιχες αποκρίσεις στη μέτρηση του θορύβου Barkhausen, προκαλώντας μείωση στην ποιοτική ένδειξη της μαγνητικής διαπερατότητας, αυξάνοντας κατά πολύ τα σημειωθέντα άλματα των μαγνητικών τοιχωμάτων κλπ.

Βέβαια, σε κάποια διαγράμματα, πλησίον των άκρων των τεμαχίων, παρατηρούμε κάποιες έντονες διαφοροποιήσεις, εάν συγκρίνουμε τις εξαχθέντες τιμές τόσο των τεμαχίων πριν και μετά την κοπή και λείανση. Αυτό το φαινόμενο πιθανολογούμε να οφείλεται σε τυχόν παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις που ενδέχεται να παρουσιάστηκαν κατά την κοπή. Η κοπή πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα, δίχως πάκτωση των άκρων, με υδρόψυκτο τροχό και με πολύ αργές ταχύτητες προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι παραμορφώσεις και τάσεις, όμως όπως καταλαβαίνουμε στην πράξη αυτές είναι δύσκολο έως αδύνατο να εξαλειφθούν εντελώς. Για αυτόν το λόγο, παραδείγματος χάριν, παρατηρούμε πολύ χαμηλές τιμές στο V2, που αντιπροσωπεύει μια ποιοτική μαγνητική διαπερατότητα, όπως στην περίπτωση του 1^{ου} δοκιμίου (#1) 20A, που συγκολλήθηκε χωρίς filler να παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο προς συγκόλληση άκρων των τεμαχίων.

Επίσης, να αναφέρουμε πως σε ορισμένα δοκίμια, στα διαγράμματα των αλμάτων, έντασης φαινομένου και σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας συναρτήσει της θέσης μέτρησης δεν παρατηρούμε ακριβώς ταυτόσημες μετρήσεις (αλληλοεπικάλυψη ως ένα βαθμό δηλαδή των νούμερων και των αντίστοιχων καμπυλών), όπως στο χαρακτηριστικό παράδειγμα των καμπυλών για το δοκίμιο νούμερο 3 που υπέστη συγκόλληση, δίχως παρουσία filler, με ένταση ρεύματος 50A, όπου τόσο στο διάγραμμα Position (mm) – counts όσο και στο διάγραμμα Position (mm) – V1 οι καμπύλες τόσο της προ-κατεργασίας όσο και της κατεργασμένης επιφάνειας δείχνουν σχεδόν να επικαλύπτουν η μία την άλλη, δίνοντας σχεδόν πανομοιότυπο προφίλ των μαγνητικών ιδιοτήτων του. Σε αυτό το παράδειγμα το αποτέλεσμα είναι παραπάνω από ικανοποιητικό, καθώς μαρτυρά ότι υφίσταται δυνατότητα επιβεβαίωσης των αρχικών αποτελεσμάτων, καθώς και προσδίδει αξιοπιστία και επαναληψιμότητα στη μέθοδο. Όμως σε κάποια άλλα, με ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα το δοκίμιο υπ αριθμόν 3 που συγκολλήθηκε στα 50A με χρήση filler, παρατηρούμε στα διαγράμματα position (mm) – counts και position (mm) – V1 μεγάλες διαφορές στην απόκριση του δοκιμίου πριν την

επιφανειακή κατεργασία και στην απόκριση μετά από αυτή, με αποτέλεσμα στα ίδια σημεία (πλησίον και επί της ραφής, εκεί δηλαδή που οι καμπύλες παρουσιάζουν 'καμπάνα') τόσο ο αριθμός των σημειωθέντων αλμάτων μαγνητικών τοιχωμάτων, όσο και η ένταση του φαινομένου, μετά την κατεργασία, να παρουσιάζονται κατά πολύ περισσότερο αυξημένα. Κατά πάσα πιθανότητα αυτό οφείλεται στο ότι, μετά την κατεργασία η επιφάνεια απαλλάχτηκε από τυχόν οξειδία και λοιπές ακαθαρσίες που προέκυψαν κατά τη συγκόλληση και την απόψυξη μετά το πέρας της, τα οποία πιθανότατα παρεμπόδιζαν την προσπάθεια εξαγωγής και καταγραφής μιας ορθής απόκρισης των αλμάτων και της έντασης. Επίσης δύναται να υπεισέρχεται και ο ίδιος ο παράγοντας των παραμενουσών τάσεων που ενδέχεται να προκλήθηκαν από την ίδια τη διαδικασία του καθαρισμού της επιφάνειας. Όπως προαναφέραμε, όσο και αν μειώσουμε την ταχύτητα περιστροφής του λειαντικού δίσκου, όσο νερό και αν παρέχουμε κατά τη διάρκεια της λείανσης, γενικά όσο και αν προσέξουμε και φερθούμε ευγενικά στα δοκίμιά μας, ειδικά όσο αφορά υλικά όπως οι χάλυβες και τα αντίστοιχα –και παρόμοια σε τύπο υλικού και σύνθεση- μέταλλα προσθήκης, ποτέ δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθούν τελείως οι όποιες πιθανότητες να ασκήσουμε τάσεις στα δοκίμιά μας, με φυσικό επακόλουθο να επηρεάσουν δυσμενώς και παραπλανητικά στις πειραματικές διεργασίες μας και στα αποτελέσματα αυτών. Έτσι πιθανότατα αιτιολογούνται οι αυξημένες αποκρίσεις, όσο αφορά των αριθμό συμβάντων (σημειωθέντα άλματα τοιχωμάτων) και έντασης του φαινομένου Barkhausen, χωρίς απαραίτητα να ανταποκρίνονται 100% στην πραγματικότητα.

Πάντως, οφείλουμε να τονίσουμε την σημαντικότερη εξάρτηση μεταξύ βάθους των μετρήσεων και των αποκρίσεων Barkhausen Noise. Όταν πραγματοποιήθηκε η πρώτη φάση των μετρήσεων, με τα δοκίμια δηλαδή ως είχαν, οι μετρήσεις ήταν καθαρά επιφανειακές και ανταποκρίνονταν μόνο όσο αφορά την επιφάνεια της εκάστοτε συγκόλλησης, καθώς και σε πολύ μικρό βάθος στις ζώνες τήξης, τις θερμικά επηρεασμένες και στο μέταλλο βάσης. Μετά την λείανση, οι νέες μετρήσεις της δεύτερης βάσης ανταποκρίνονταν σε μεγαλύτερο βάθος από τις αρχικές, λόγω απομάκρυνσης υλικού. Έτσι μπορούμε, συγκρίνοντας τις αποκρίσεις και των δύο φάσεων, να συμπεράνουμε πως όσο μεγαλώνει το βάθος από όπου λαμβάνουμε τις μετρήσεις BHN, τόσο το προφίλ των μαγνητικών ιδιοτήτων και του πεδίου τάσεων τείνει να διαφοροποιείται ως ένα βαθμό. Αλλιώς δηλαδή αποκρίνεται στην επιφάνεια το συγκολλημένο δοκίμιο ηλεκτρικού χάλυβα, υπό την επιβολή πεδίου και αλλιώς βαθύτερα.

Γενικά, γνωρίζουμε ότι πριν την πραγματοποίηση της συγκόλλησης, το υλικό μας ήταν φερριτικό, στερεό διάλυμα δηλαδή σιδήρου – άνθρακα με κάποιες προσμίξεις εντός αυτού, και σίγουρα με κάποιες τυχόν μικροπαραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις εξαιτίας της διαδικασίας παραγωγής του.

Μετά το πέρας της συγκόλλησης, στο κορδόνι της συγκόλλησης, ή αλλιώς στη ζώνη τήξης, έχουμε δημιουργία βασαλτικής δομής, δομή δηλαδή λεπτόκοκκη και φυσικά με παρουσία παραμενουσών τάσεων. Με το σχηματισμό αυτής της δομής έχουμε ως φυσικό επακόλουθο την ύπαρξη περισσότερων ορίων κόκκων, άρα περισσότερων φυσικών εμποδίων που παρεμποδίζουν την κίνηση των

μαγνητικών τοιχωμάτων, περισσότερο τουλάχιστον συγκριτικά με το μέταλλο βάσης.

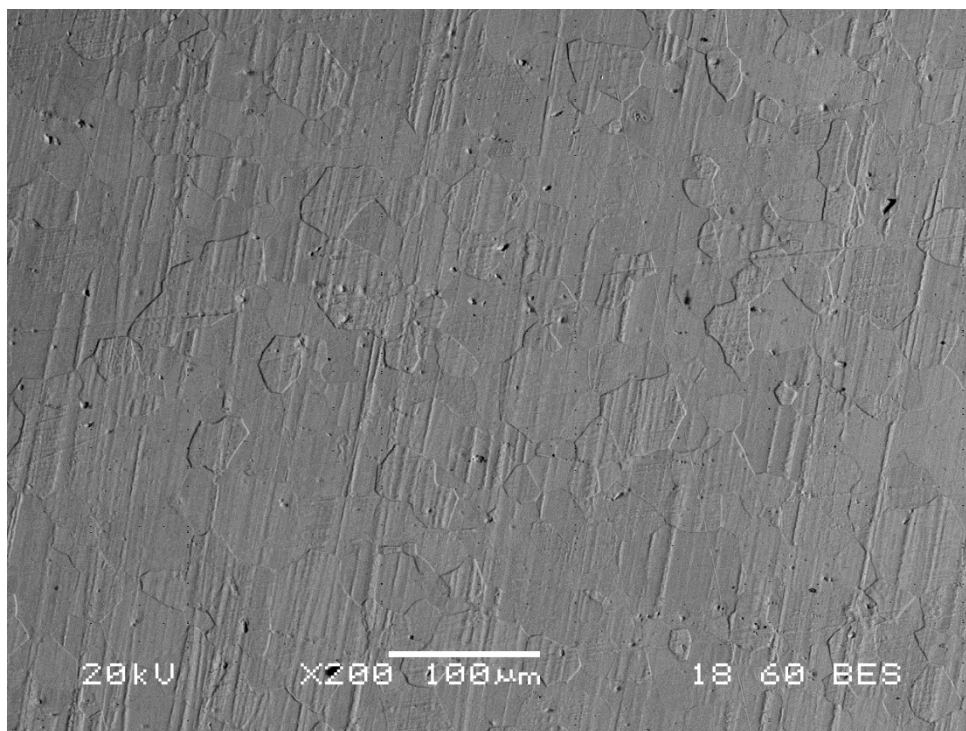
Όσο αφορά τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ως γνωστόν εκεί αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (900°C και άνω) με αποτέλεσμα να έχουμε μεν μια σημαντική και μη αμελητέα μεγέθυνση των κόκκων, όμως ας μην ξεχνάμε ότι η απόψυξη είναι ταχεία, με αποτέλεσμα να έχουμε πιθανή δημιουργία μπαινίτη, καθώς και κατακρημνίσεις ορισμένων ενώσεων στα όρια των κόκκων, καθώς ο χρόνος απόψυξης είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που απαιτείται ώστε να ακολουθηθεί διάγραμμα ισορροπίας και να λάβει χώρα η διάχυση των ατόμων κατά το σχηματισμό. Το ποσοστό του άνθρακα είναι χαμηλό (0,08%), και έτσι η ύπαρξη μαρτενσίτη αποκλείεται ως ενδεχόμενο, όμως οι φάσεις που προκύπτουν κατά την απόψυξη απέχουν από τις φάσεις ισορροπίας. Επίσης, και εδώ, έχουμε παρουσία παραμενουσών τάσεων και πλαστικών παραμορφώσεων εξαιτίας των φαινομένων που περιγράψαμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους. Εν συντομία, τα ψυχρότερα μέρη της ζώνης (μακρύτερα από τη ζώνη τήξης) δρουν ως πακτώσεις που εμποδίζουν τη διαστολή και συστολή αυτών που βρίσκονται πλησιέστερα στη συγκόλληση. Έτσι έχουμε δράση εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων που επιδρούν στη μικροδομή και, κατ' επέκταση, πέρα από τις μηχανικές, στις μαγνητικές ιδιότητες. Άρα, παρότι έχουμε πιο χονδρόκοκκη δομή, λόγω των παραπάνω παραγόντων, στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη παρουσιάζονται σε γενικές γραμμές αυξημένες αριθμητικά οι περιστροφές των μαγνητικών περιοχών και μειωμένη η μαγνητική διαπερατότητα (ή τουλάχιστον η ποιοτική ένδειξή της). Δεν παρουσιάζονται αυτά τα φαινόμενα τόσο έντονα όσο στη ζώνη τήξης, εντούτοις υφίστανται σε –μικρό με- σεβαστό βαθμό. Οι όποιες μικροδιακυμάνσεις που παρουσιάζονται στα νούμερα, και κατ' επέκταση στις αντίστοιχες καμπύλες, αυτό οφείλεται στο ότι λόγω της ανισοθερμίας, όλα τα συνεπαγόμενα φαινόμενα δεν δύναται να παρουσιάζουν πλήρη ομαλότητα ή συμμετρία, ενώ όπως προαναφέραμε, οι όποιες εφελκυστικές ή θλιπτικές παραμένουσες τάσεις εναλλάσσονται σχετικά απρόβλεπτα.

Τέλος, πιο κοντά στα άκρα των τεμαχίων, όπου το μέταλλο βάσης έχει μείνει ανεπηρέαστο, έχει διατηρηθεί η αρχική φερριτική δομή, όπως και το μέσο μέγεθος των κόκκων, ενώ δεν υφίστανται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις, οπότε όσο απομακρυνόμαστε από την συγκόλληση επανερχόμαστε στις αποκρίσεις του ηλεκτρικού χάλυβα που παρουσιάζει πριν τη συγκόλληση. Όσο απομακρυνόμαστε από τα άκρα, πλησιάζουμε και εισερχόμαστε στη ζώνη τήξη / κορδόνι συγκόλλησης, εναλλάσσονται το μέγεθος κόκκου και οι παραμένουσες τάσεις ως εξής: λεπτόκοκκο (συγκριτικά πάντα με τις εσωτερικές ζώνες), χονδρόκοκκο και τέλος λεπτόκοκκο (περισσότερο από ότι και το μητρικό υλικό), ενώ οι τάσεις παρουσιάζουν μειωμένα, αυξημένα, και ακόμα πιο αυξημένη ένταση.

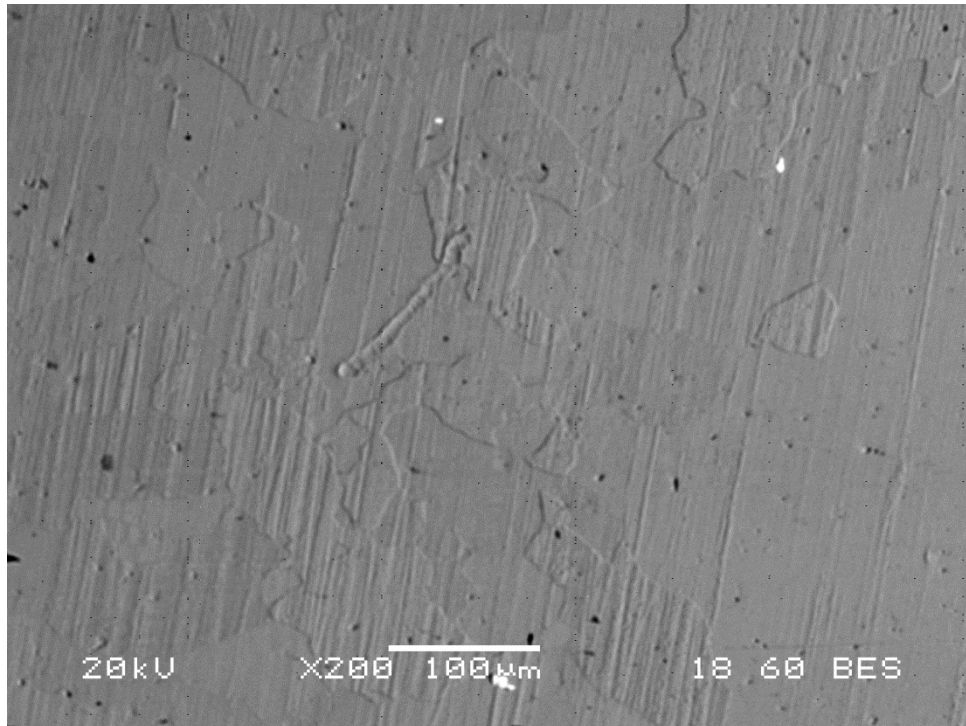
3. Αποτελέσματα παρατήρησης ενδεικτικών δοκιμίων στο SEM – Στοιχειακές αναλύσεις - Σχολιασμός:

Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρατηρήθηκαν ενδεικτικά 4 δοκίμια, 20A, 30AF, 40A και 50A, δηλαδή ένα δοκίμιο που συγκολλήθηκε άνευ μετάλλου προσθήκης στα 20A, συγκολλημένο δοκίμιο με μέταλλο προσθήκης στα 30A, ένα δοκίμιο συγκολλημένο στα 40A άνευ μετάλλου προσθήκης και ένα συγκολλημένο στα 50A, επίσης άνευ μετάλλου προσθήκης, αντίστοιχα. Πάρθηκαν φωτογραφίες πισωσκεδαζομένων ηλεκτρονίων (back-scattered electrons), προκειμένου να εμφανίζονται καθαρότερα οι κόκκοι και τα όριά τους, τόσο στο μέταλλο βάσης όσο και στις ζώνες τήξης και θερμικά επηρεασμένες ζώνες, από όλα τα παραπάνω δείγματα. Στη συνέχεια πάρθηκαν στοιχειακές αναλύσεις τόσο στα όρια των κόκκων όσο και στο εσωτερικό αυτών, ενώ επιπροσθετα μετρήθηκαν ενδεικτικά και κόκκοι ως προς το μέγεθός τους, προκειμένου να διαπιστωθούν διαφοροποιήσεις στη μέση διάμετρο κόκκου μεταξύ των ζωνών. Παρακάτω παραθέτονται ορισμένες μόνο αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των ζωνών των δοκιμίων. Για πλήρη εικόνα παρακαλώ όπως ανατρέξατε στο παράρτημα για όλο το πλήθος των φωτογραφιών και των στοιχειακών αναλύσεων.

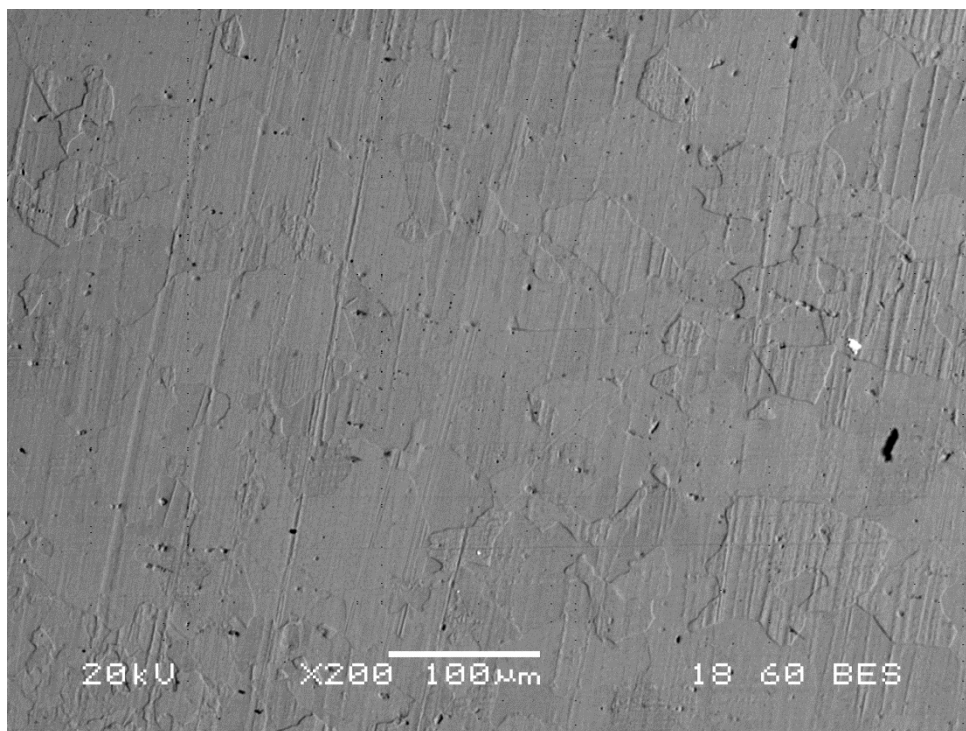
ΔΟΚΙΜΙΟ 20A:



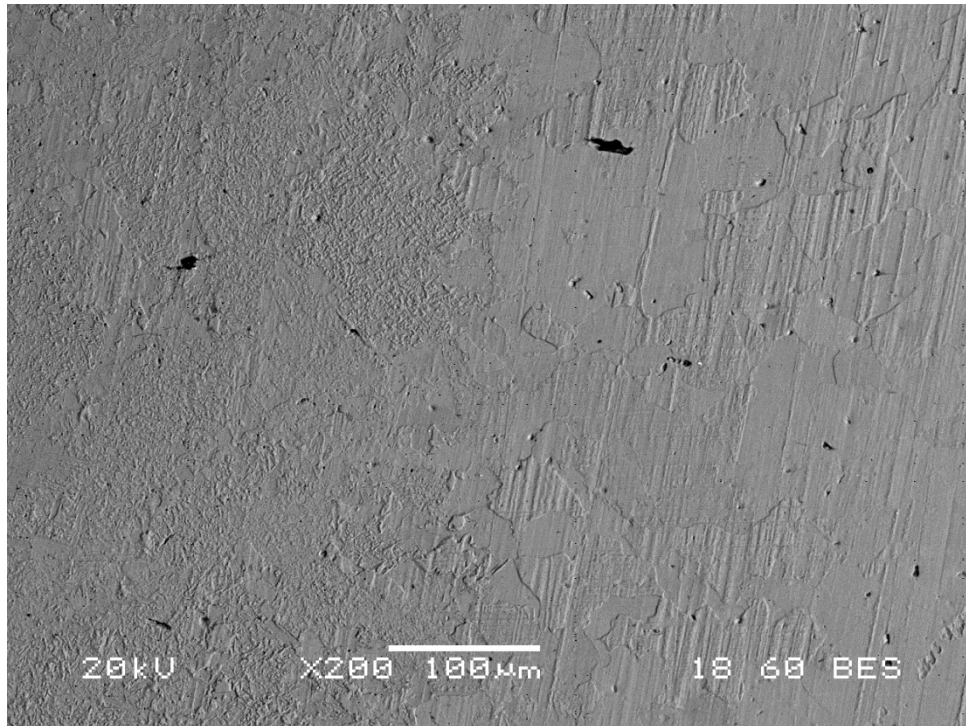
Εικόνα 3.1: Μέταλλο βάσης (base metal) δοκιμίου 20A, με πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (BES), μεγέθυνση x200.



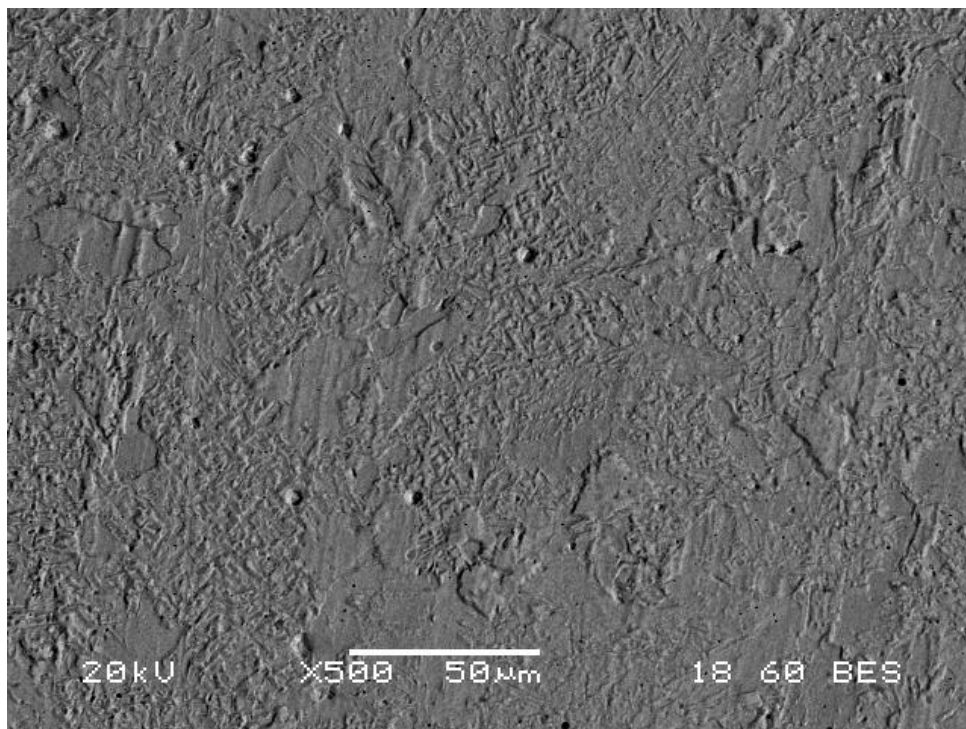
Εικόνα 3.2: Διεπιφάνεια μετάλλου βάσης (αριστερά) – ΟΕΖ (δεξιά), BES, μεγέθυνση x200.



Εικόνα 3.3: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη δοκιμίου 20Α, BES, x200.

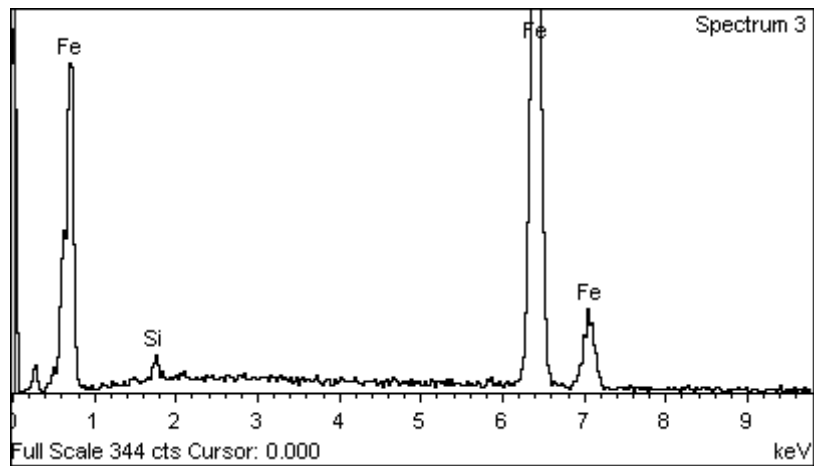
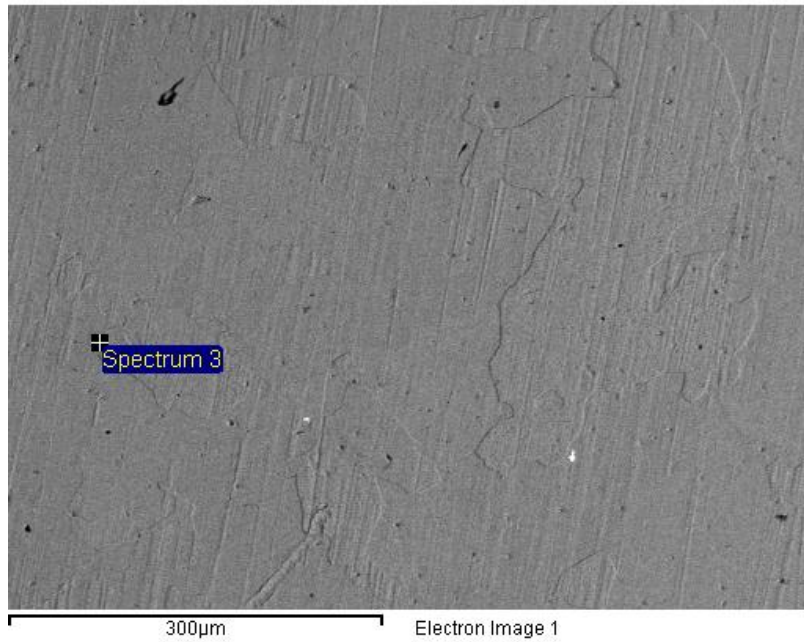


Εικόνα 3.4: Διεπιφάνεια ΘΕΖ (δεξιά περιοχή της φωτογραφίας με τους εμφανώς μεγεθυμένους κόκκους) – ΖΤ (ζώνη τήξης, fusion zone, αριστερή περιοχή της φωτογραφίας, με τους δενδρίτες να εμφανίζονται επαρκώς καθαρά), δοκιμίου 20Α, ΒΕΣ, x200.



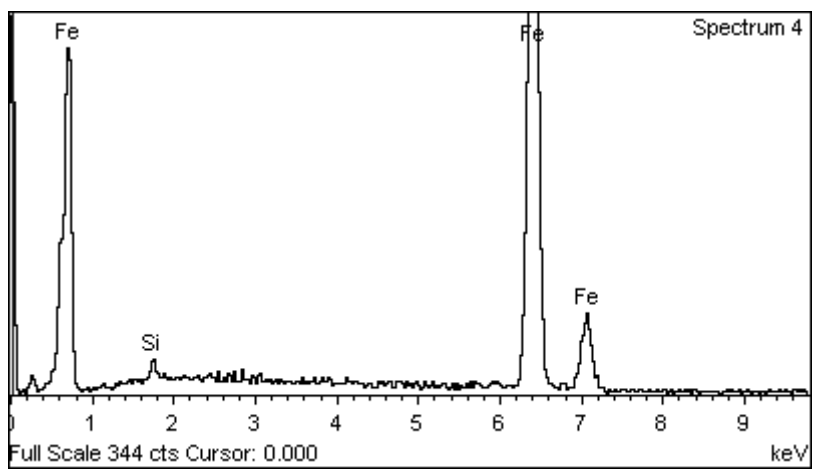
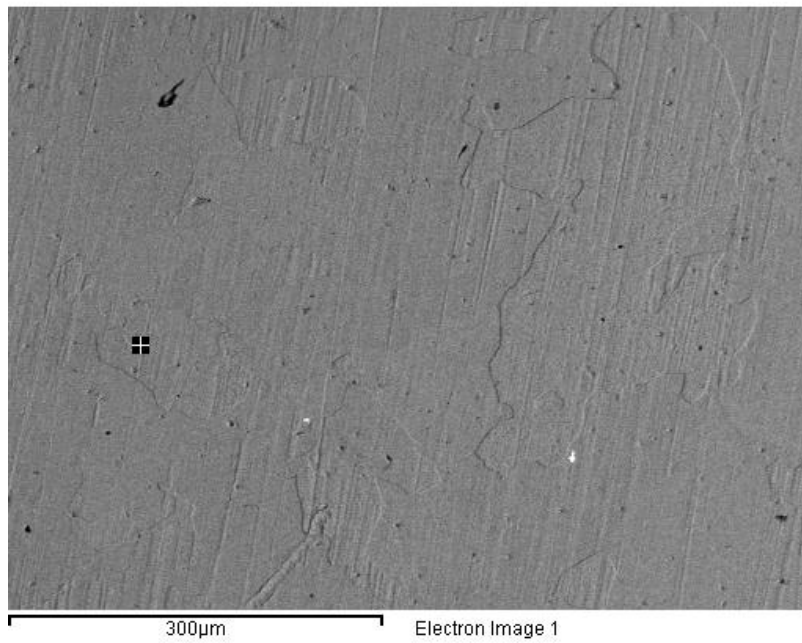
Εικόνες 3.5: Περιοχή της ΖΤ δοκιμίου 20Α, ΒΕΣ, σε μεγέθυνση x500.

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



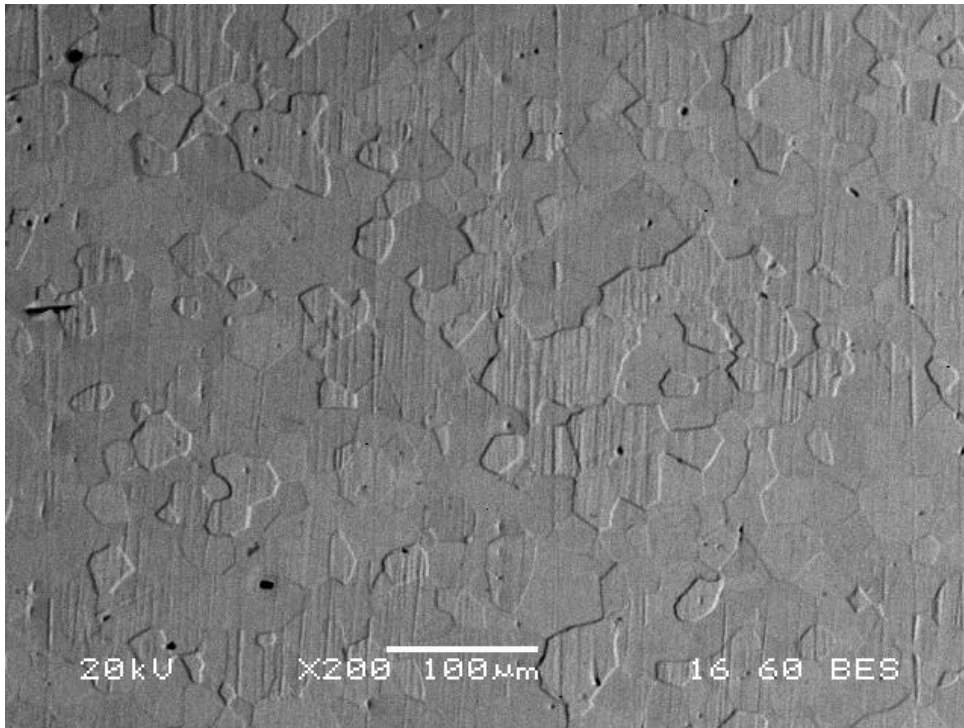
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.32	2.60
Fe K	98.68	97.40
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο στο εσωτερικό κόκκου:

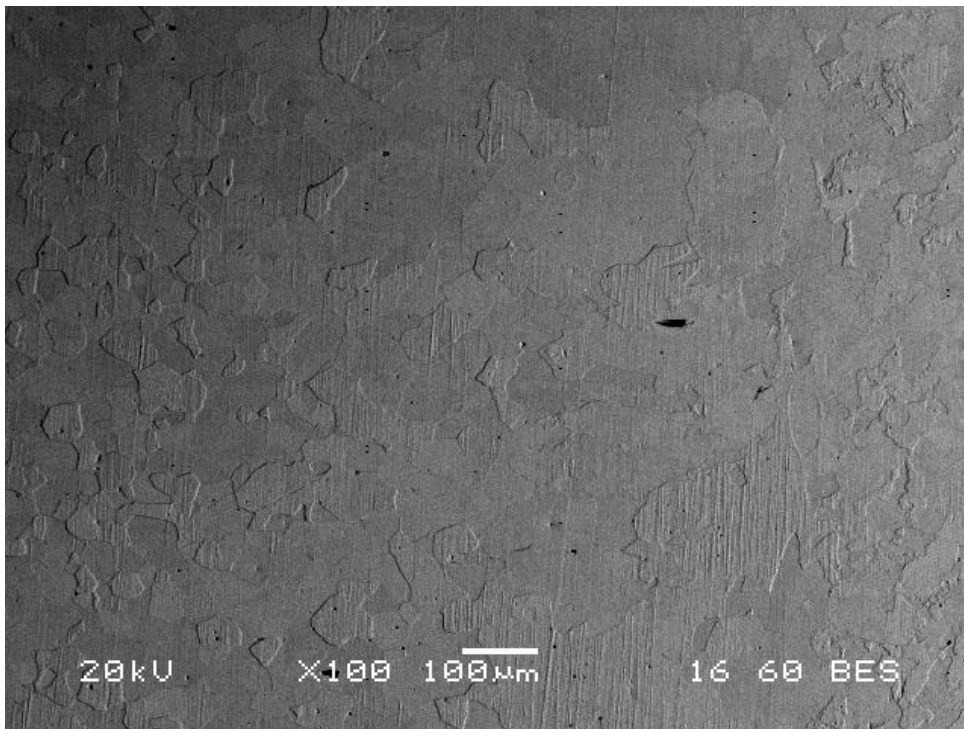


Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.06	2.08
Fe K	98.94	97.92
Totals	100.00	

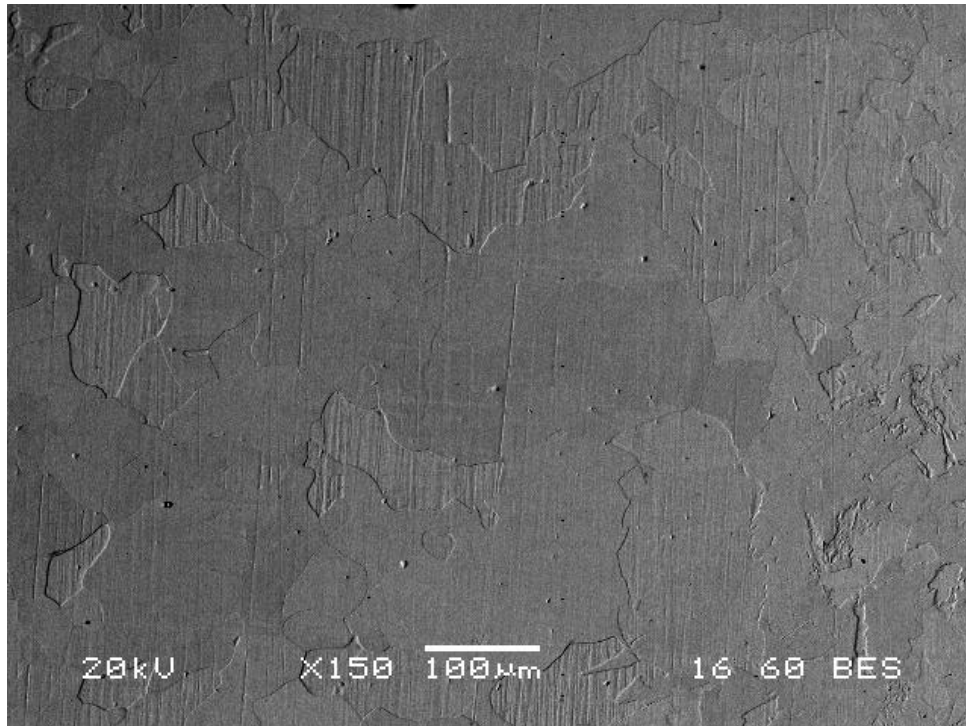
ΔΟΚΙΜΙΟ 30AF:



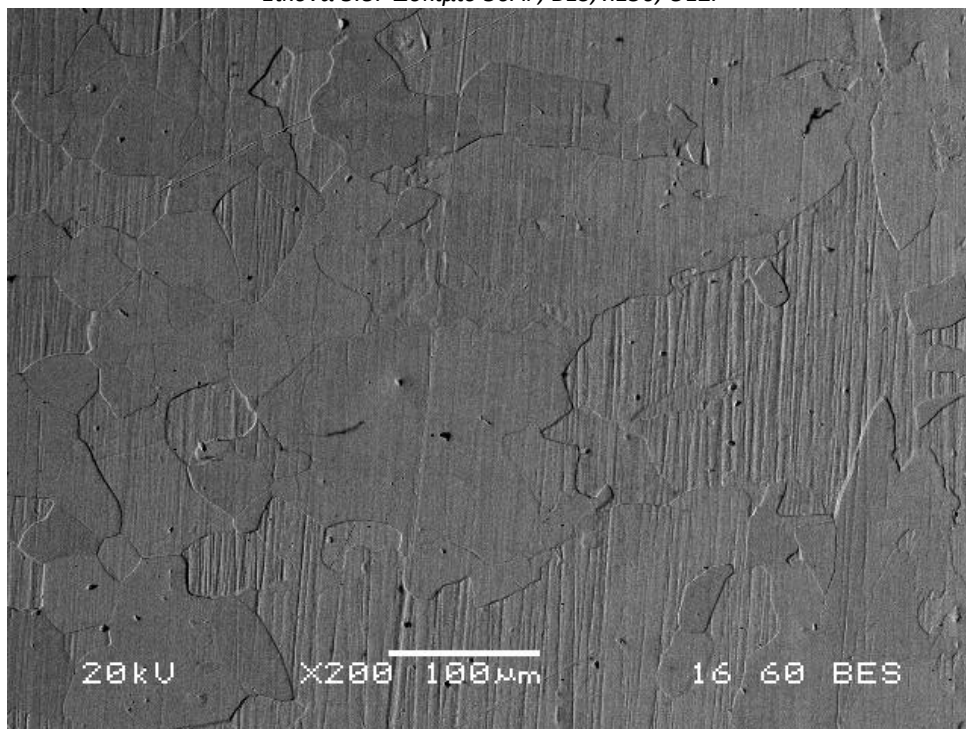
Εικόνα 3.6: Δοκίμιο 30AF, x200, BES, μέταλλο βάσης.



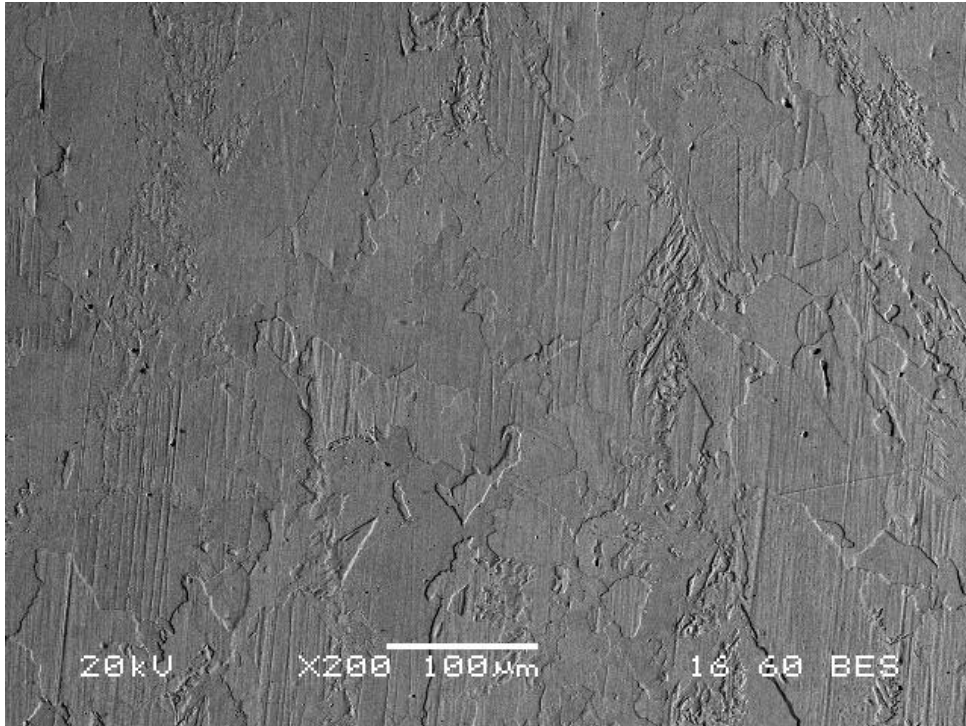
Εικόνα 3.7: Δοκίμιο 30AF, x100, BES, διεπιφάνεια μετάλλου βάσης (αριστερά, με τους εμφανώς μικρότερους κόκκους σε σχέση με τη ΘΕΖ) – Θερμικά επηρεασμένης ζώνης.



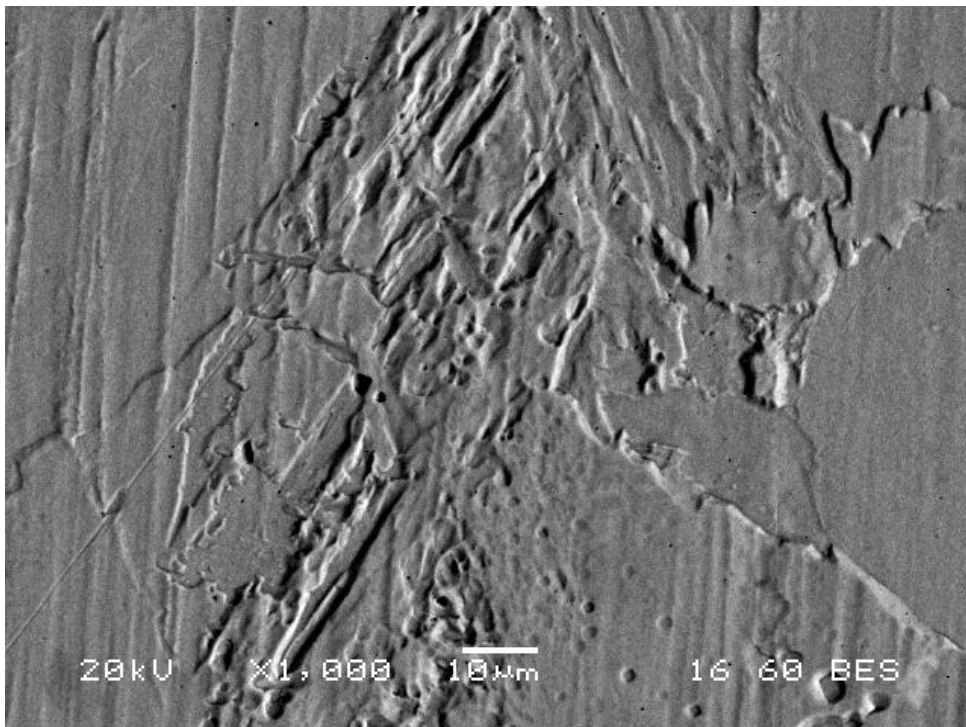
Εικόνα 3.8: Δοκίμιο 30AF, BES, x150, ΘΕΖ.



Εικόνα 3.9: Ίδιο δοκίμιο, ΘΕΖ, σε μεγαλύτερη μεγέθυνση (x200), BES.

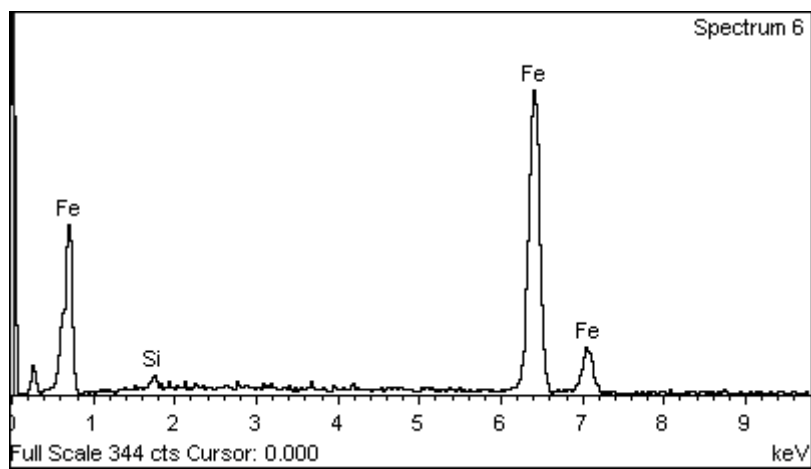
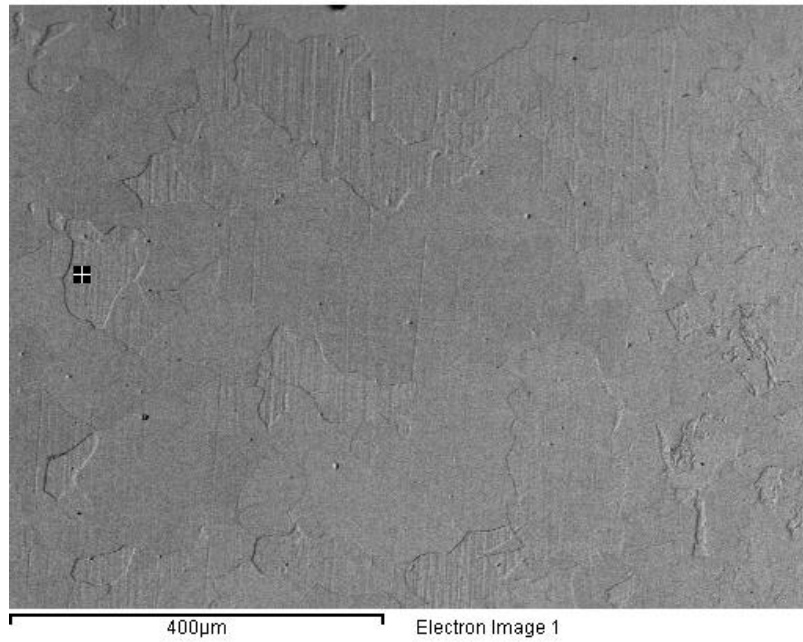


Εικόνα 3.10 Δοκίμιο 30AF, x200, BES, διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ (αριστερό τμήμα, με τους εμφανώς μεγεθυμένους κόκκους) – ζώνη τήξης (δεξιό τμήμα, όπου ξεχωρίζουν οι μη-ομογενώς προσανατολισμένοι δενδρίτες).



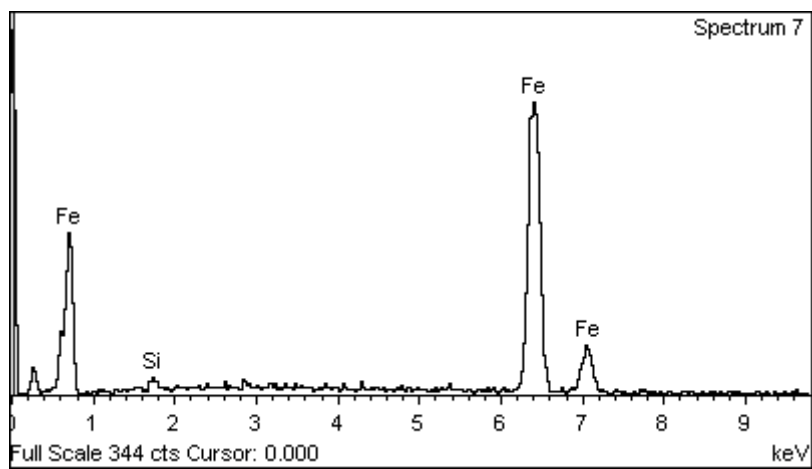
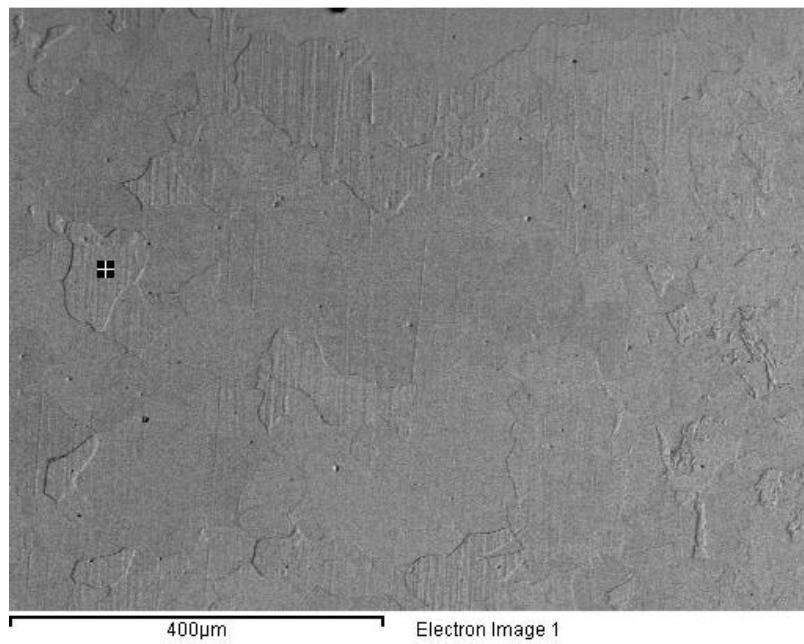
Εικόνα 3.11: Δοκίμιο 30AF, BES, ζώνη τήξης σε μεγέθυνση x1000.

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



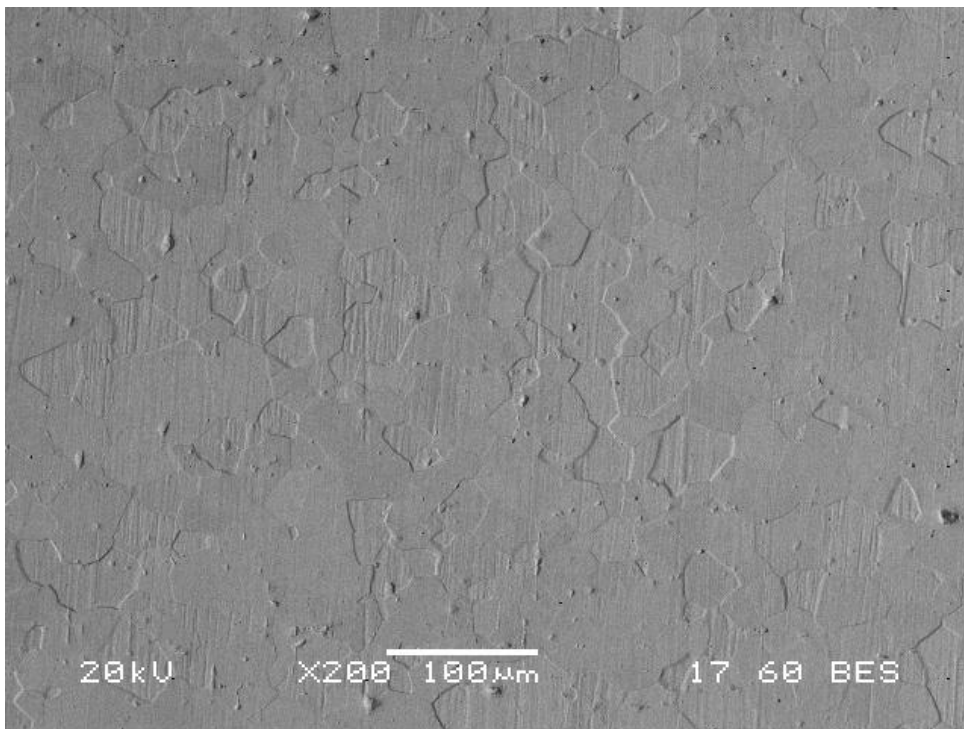
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.38	2.71
Fe K	98.62	97.29
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο του εσωτερικού του κόκκου:

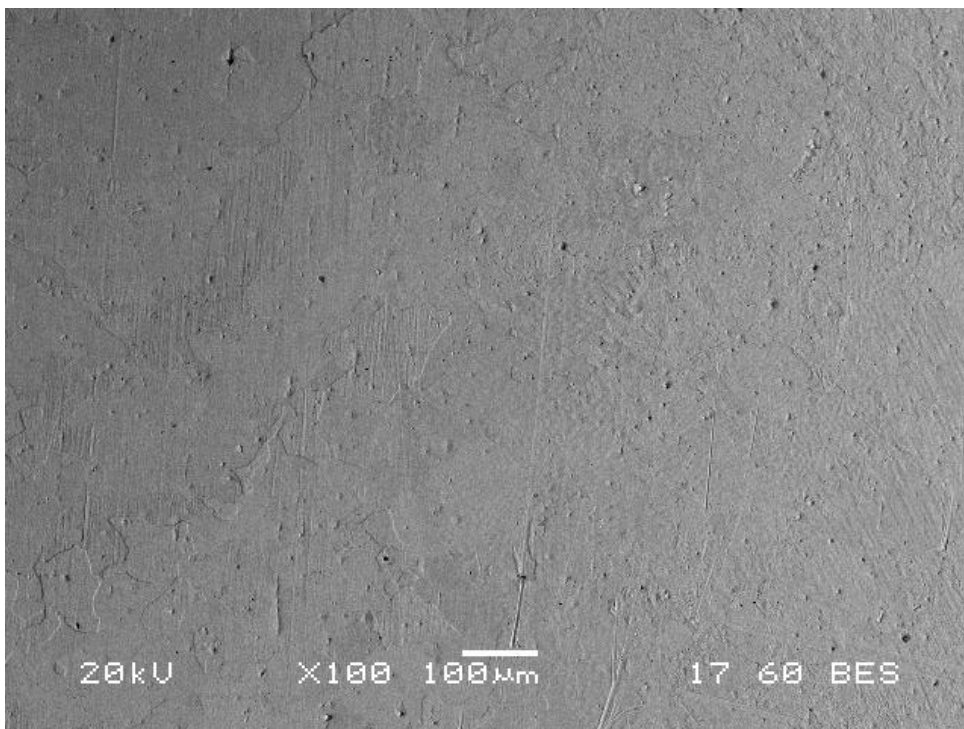


Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.12	2.20
Fe K	98.88	97.80
Totals	100.00	

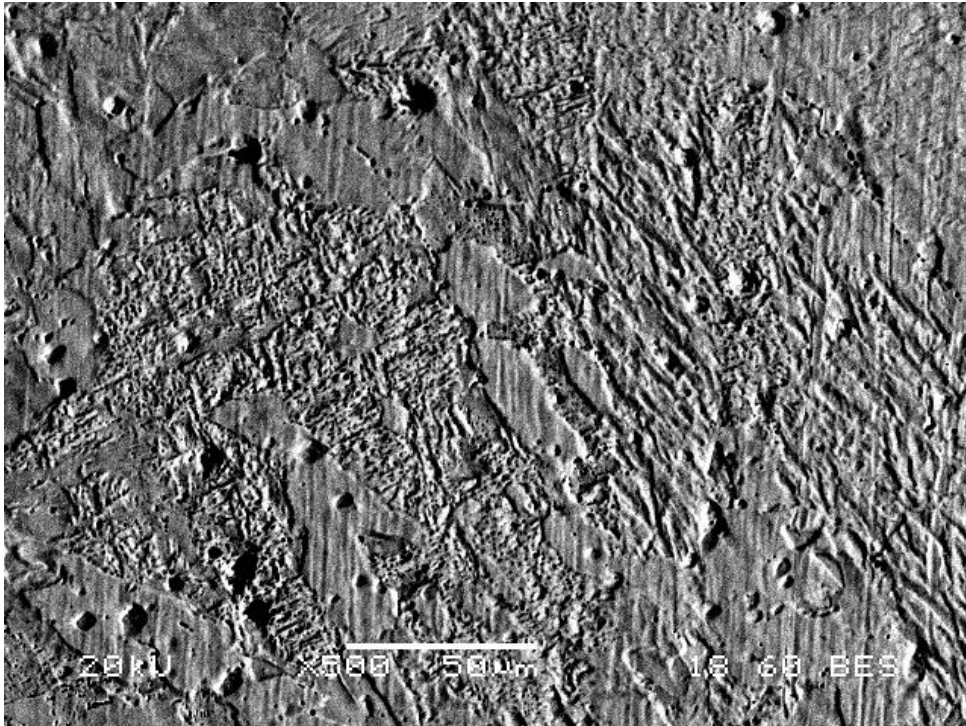
ΔΟΚΙΜΙΟ 20Α:



Εικόνα 3.12: Φωτογραφία σε BES δοκιμίου 40Α, σε μεγέθυνση x200 σε περιοχή του μετάλλου βάσης.

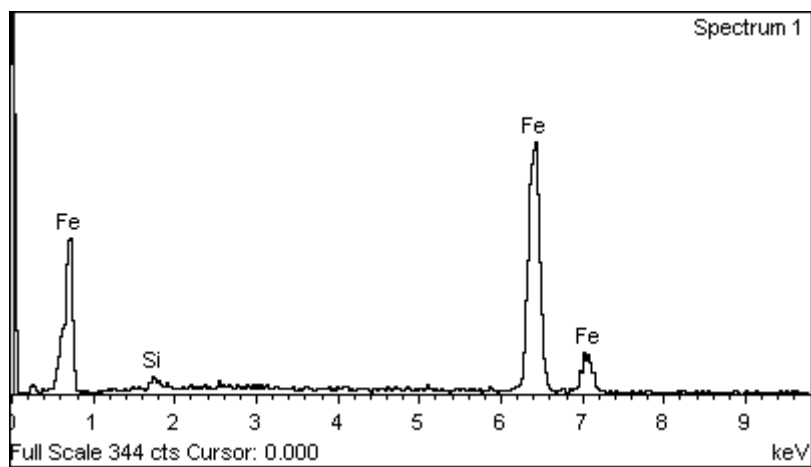
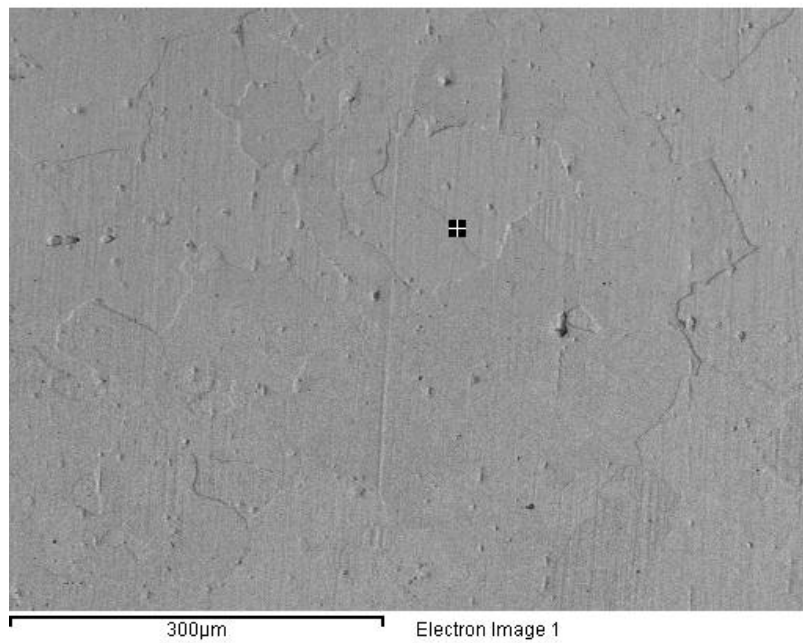


Εικόνα 3.13: BES, x100 της διεπιφάνειας του μετάλλου βάσης – ΘΕΖ (δεξιά και αριστερά αντίστοιχα στη φωτογραφία) του δοκιμίου 40Α.



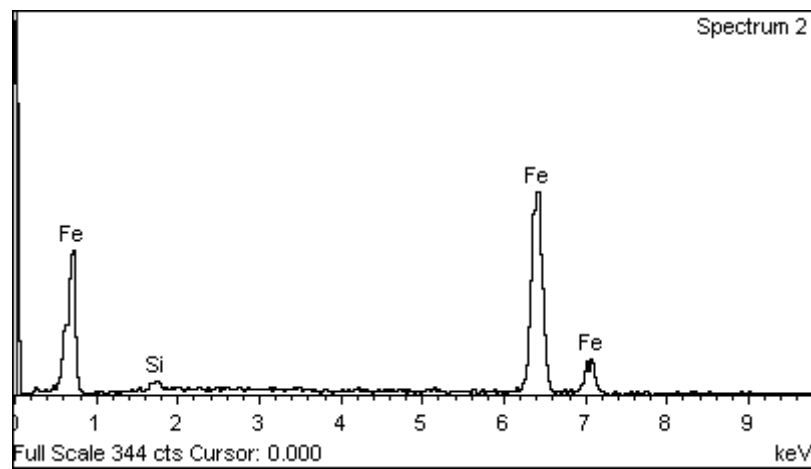
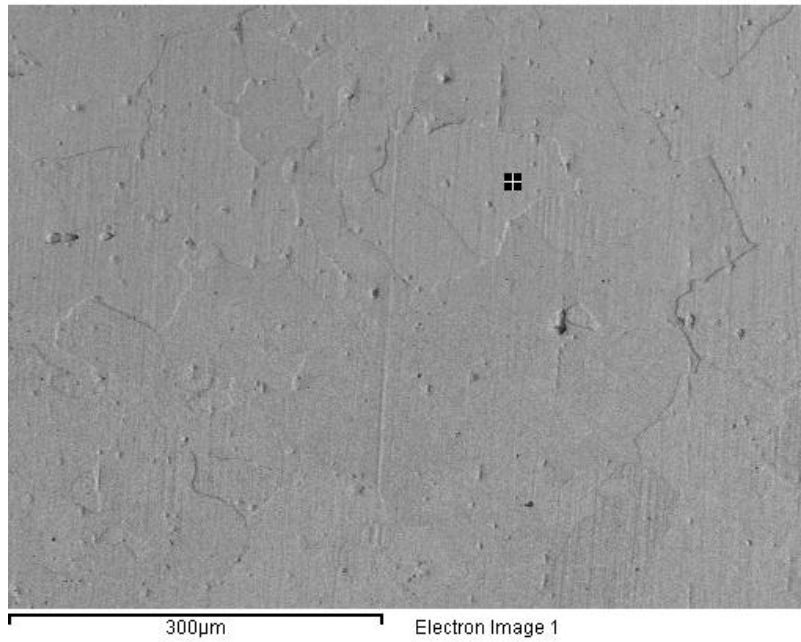
Εικόνα 3.14: Δενδριτικές ετερογενώς προσανατολισμένες οικογένειες στη ζώνη τήξης του δοκιμίου 40A, BES, σε x500 μεγέθυνση.

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



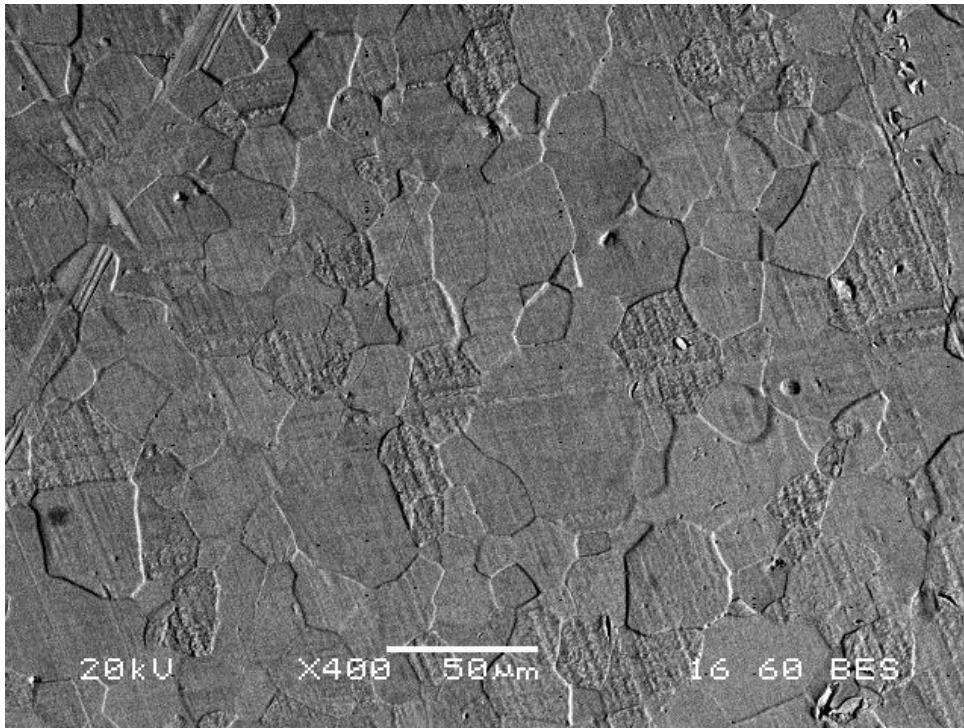
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.38	2.70
Fe K	98.62	97.30
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε εσωτερικό κόκκου:

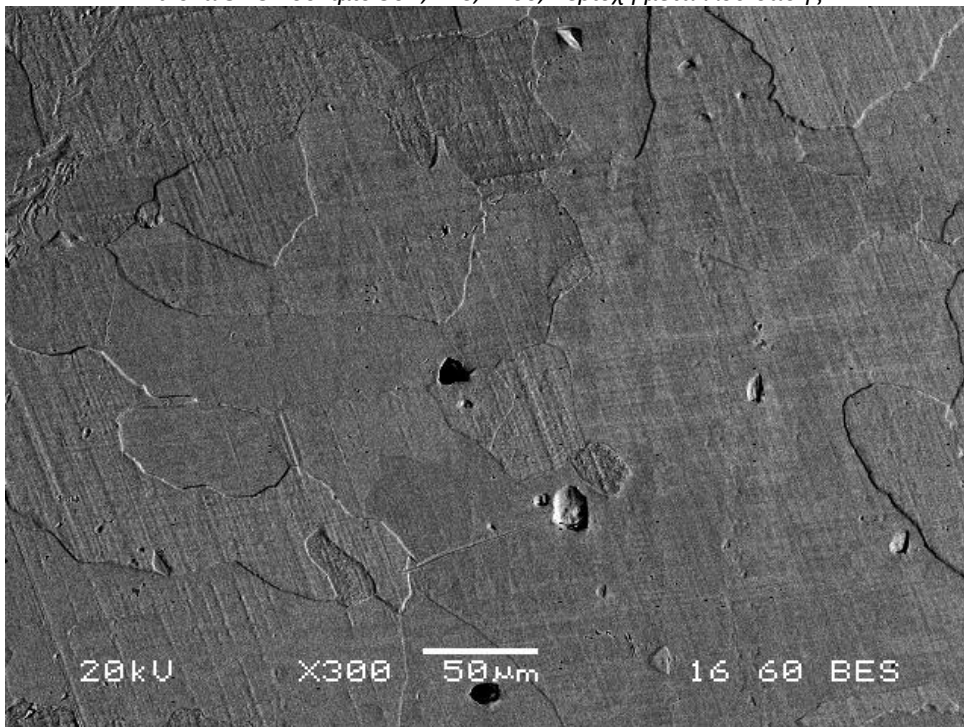


Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.38	2.71
Fe K	98.62	97.29
Totals	100.00	

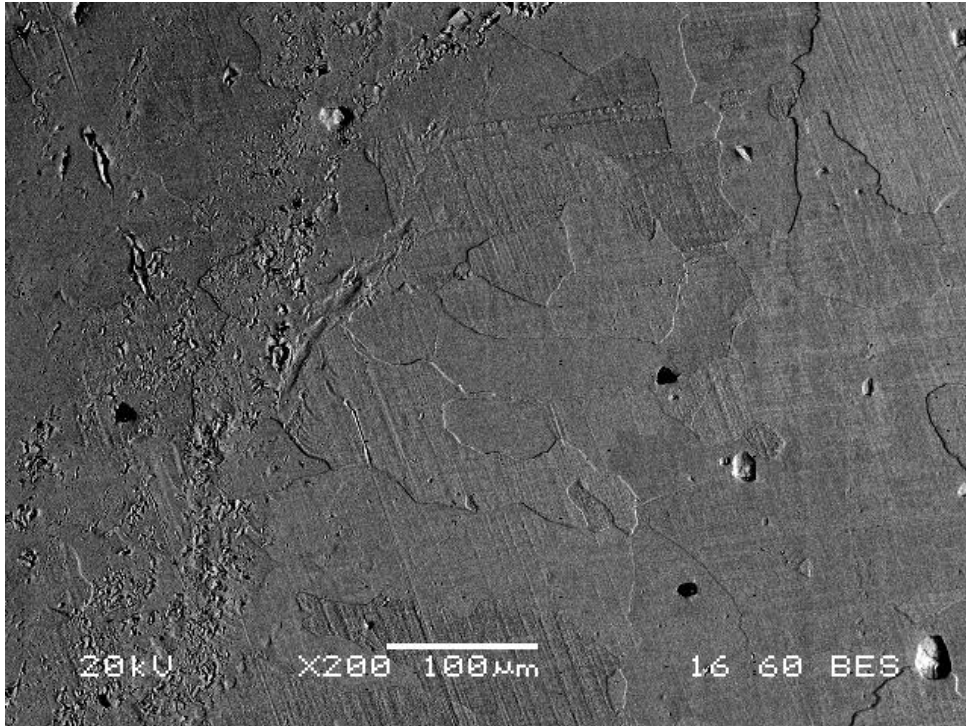
ΔΟΚΙΜΙΟ 50Α:



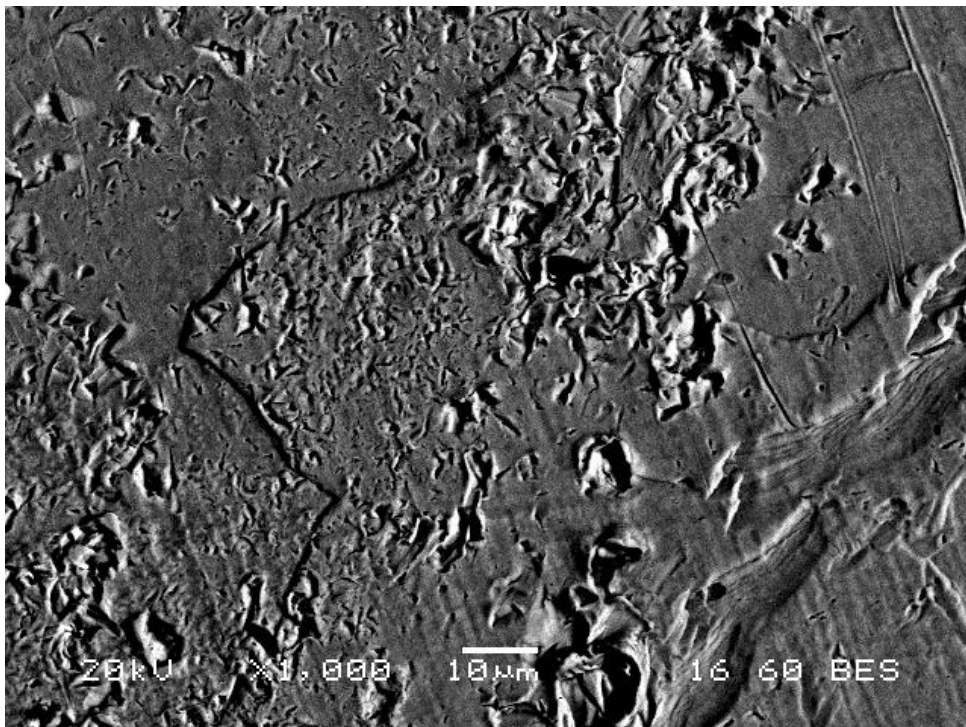
Εικόνα 3.15: δοκίμιο 50Α, BES, x400, περιοχή μετάλλου βάσης.



Εικόνα 3.16: ΘΕΖ του δοκιμίου 50Α, BES, μεγέθυνση x300.

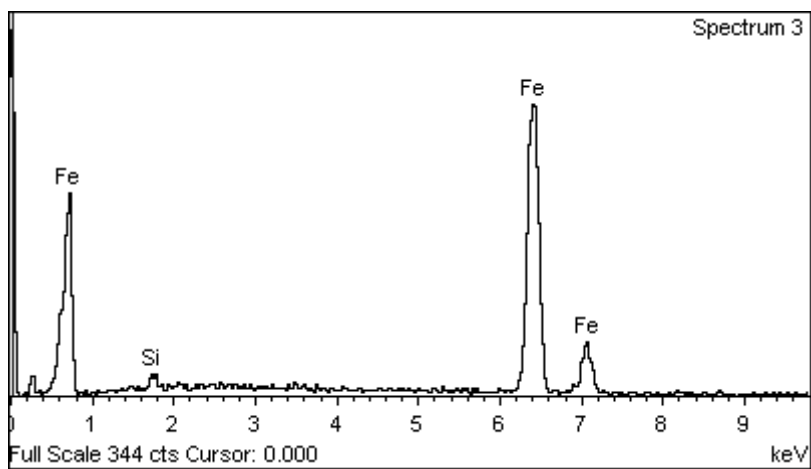
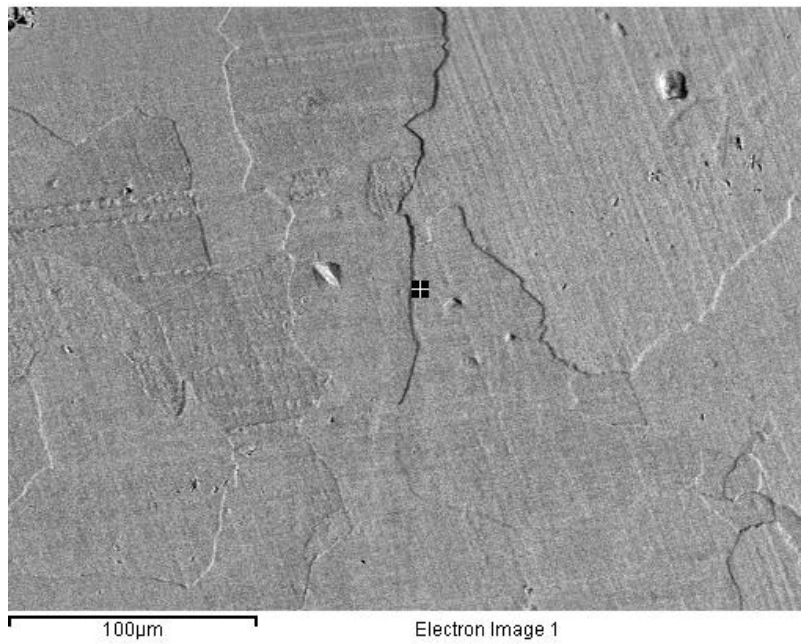


Εικόνα 3.17: Διεπιφάνεια ΘΕΖ και ζώνη τήξης στο δοκίμιο 50Α, ΒΕΣ, x200. Οι δενδρίτες που μαρτυρούν την ζώνη τήξης ξεχωρίζουν, σε σχέση με τους ευμεγέθεις κόκκους της ΘΕΖ στο αριστερό τμήμα της φωτογραφίας.



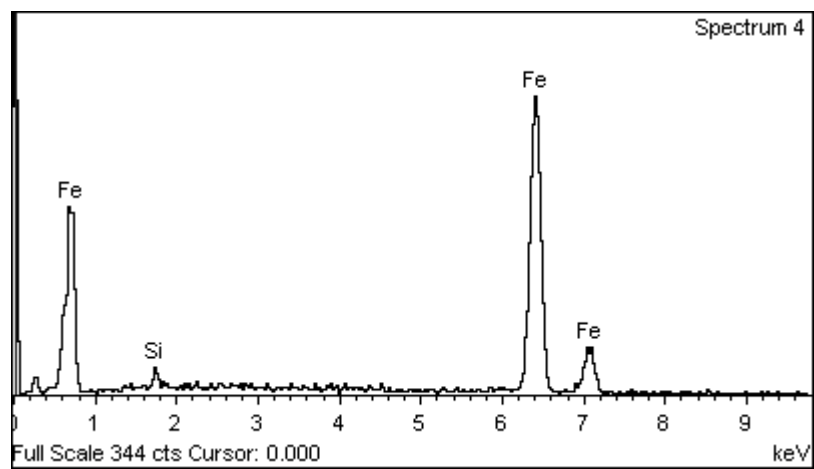
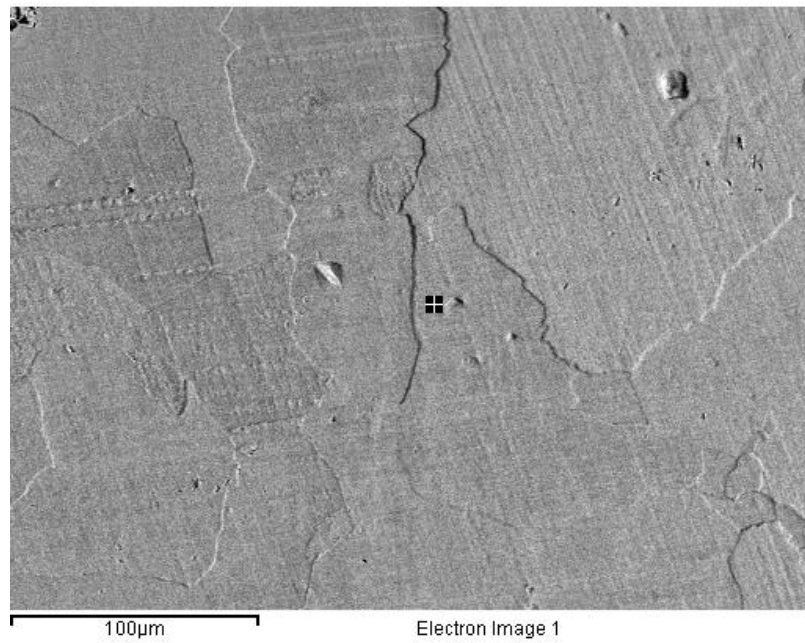
Εικόνα 3.128: Δοκίμιο 50Α, ΒΕΣ, x1000, ζώνη τήξης.

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.66	3.26
Fe K	98.34	96.74
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε εσωτερικό σημείο του κόκκου:



Element	Weight%	Atomic%
Si K	2.10	4.10
Fe K	97.90	95.90
Totals	100.00	

4. Παρατηρήσεις:

Καταρχάς παρατηρούμε και στα τέσσερα δοκίμια συγκολλημένου ηλεκτρικού χάλυβα την ύπαρξη μονοφασικότητας, τόσο στο μέταλλο βάσης όσο και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Και στις δύο ζώνες όλοι οι κόκκοι είναι φερριτικοί, με την διαφορά ότι στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη ο φερρίτης είναι αλλοτροπικός. Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της συγκόλλησης, οι κόκκοι εντός αυτής της ζώνης δεν υπέστησαν τήξη αλλά θερμάνθηκαν σε ύψος ίσο ή και ανώτερο της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης. Μετά το πέρας της συγκόλλησης ακολούθησε ψύξη, όμως λόγω του πολύ χαμηλού ποσοστού άνθρακα και σύμφωνα με τα διαγράμματα ισορροπίας σιδήρου – άνθρακα δεν μετασχηματίστηκε. Όμως η ψύξη ήταν σχετικά ταχεία, με αποτέλεσμα να προκύψει μεν φερρίτης, εκτός ισορροπίας δε, καθώς το φαινόμενο της διάχυσης να μην προλάβει να λάβει χώρα πλήρως (πλήρης δηλαδή αναδιάταξη των ατόμων στο πλέγμα) και έτσι να παραμένει ενεργειακά αναβαθμισμένος, περισσότερο τουλάχιστον από το υπόλοιπο ανεπηρέαστο μέταλλο βάσης.

Δεύτερη παρατήρηση είναι οι εμφανείς διαφοροποιήσεις του μέσου μεγέθους των κόκκων μεταξύ των ζωνών. Παραδείγματος χάριν, για το μέταλλο βάσης του δοκιμίου 20A υπολογίστηκε στα 37, 8μm ενώ για το ίδιο δοκίμιο, η μέση διάμετρος κόκκου στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη υπολογίστηκε στα 68,1μm περίπου. Για το δοκίμιο 30AF η μέση διάμετρος του μετάλλου βάσης, πολύ χονδρικά, υπολογίστηκε (βάση των δειγματοληπτικών μετρήσεων που πάρθηκαν από τυχαίους κόκκους) στα 27,6μm, ενώ η μέση διάμετρος για τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη στα 83μm περίπου. Παρόμοιες διαφοροποιήσεις παρατηρήσαμε και στα άλλα δύο δοκίμια. Οι υπολογισμοί δεν διακρίνονται ιδιαίτερα για την ακρίβειά τους, καθώς οι κόκκοι δεν διακρίνονται για την πλήρη ομοιομορφία τους από άποψη σχήματος, σε κάθε ζώνη, ούτε μετρήθηκαν τόσοι πολλοί ώστε να μπορεί να εξαχθεί ένα ακριβές στατιστικό συμπέρασμα, δίνουν όμως μια καλή ποιοτική γενική εικόνα για την κατάσταση τη κρυσταλλικής δομής της εκάστοτε ζώνης και το μέγεθος των διαφορών μεταξύ των ζωνών. Όπως άλλωστε αναμέναμε, το μέταλλο βάσης αποτελείτο από φερριτική μήτρα, σχετικά ομοιόμορφης κοκκομετρίας, δίχως κάποιο προσανατολισμό, με λίγες διαφοροποιήσεις στα μεγέθη, πιθανότατα από τις παραμορφώσεις που έλαβαν χώρα κατά την κατεργασία των ελασμάτων, κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους. Όμως, όσο πλησιάζουμε προς τη ραφή συγκόλλησης, περνώντας από την θερμικά επηρεασμένη ζώνη παρατηρούμε σημαντική μεγέθυνση των κόκκων, σε σχέση με αυτούς του μετάλλου βάσης. Τέλος, στη σχετικά στενότερη ζώνη τήξης παρατηρούμε καθαρά δενδριτική δομή, οικογένειες δηλαδή δενδριτών ετερογενώς προσανατολισμένες μεταξύ τους, με τους δενδρίτες να χαρακτηρίζονται από το μικρό μέγεθος και το στενό και επίμηκες σχήμα τους.

Τέλος, παρατηρούμε, ιδιαίτερα στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και συγκριτικά πάντα με το μέταλλο βάσης, στις στοιχειακές αναλύσεις μια μικρή αλλά μη αμελητέα αύξηση της συγκέντρωσης του πυριτίου πλησίον και πάνω στα όρια των κόκκων, ενώ το εσωτερικό αυτών δείχνει να είναι ελαφρώς «φτωχότερο» στο συγκεκριμένο στοιχείο. Λογικό, αν αναλογιστούμε ότι κατά τη θέρμανση αλλά και κατά την ψύξη η διάχυση δεν είχε το χρονικό περιθώριο να λάβει χώρα πλήρως, και

με τη σειρά τους δεν υπήρξε πλήρης ομογενοποίηση. Υπάρχουν δηλαδή στη μήτρα μικροδιαφορισμοί όσο αφορά το εμπιερχόμενο πυρίτιο.

Να προσθέσουμε πως τόσο στα δοκίμια άνευ, όσο και σε αυτό το οποίο συγκολλήθηκε με μέταλλο προσθήκης, υπάρχει μια ομοιογένεια όσο αφορά τις εμφανιζόμενες (στην προκειμένη, εμφανιζόμενη, μιας και ο φερρίτης επικρατεί σε όλες τις περιπτώσεις) φάσεις, οι διεπιφάνειες μεταξύ των ζωνών, με εξαίρεση το δοκίμιο 50A που συγκολλήθηκε με την ισχυρότερη ένταση από όλα τα δοκίμια, είναι δυσδιάκριτες, καθώς μόνο μέσω προσεκτικής παρατήρησης των διαφοροποιήσεων του μεγέθους των κόκκων από ζώνη σε ζώνη δύναται κάποιος να αποφανθεί που ακριβώς βρίσκονται, ενώ τα όρια που διαχωρίζουν τις ζώνες είναι πολύ λεπτά. Επίσης να αναφέρουμε ότι όσο αυξάνονται τα Amper του ρεύματος συγκόλλησης, τόσο η ζώνη τήξης δείχνει να γίνεται όλο και πιο έντονη και ευδιάκριτη, τόσο όσο αφορά την έκταση της δενδριτικής δομής, όσο και το πόσο έντονο είναι το ανάγλυφο. Γεγονός επίσης λογικό, αν αναλογιστεί κανείς πόσο πιο έντονη είναι η θέρμανση με υψηλή ένταση ρεύματος, πόσο πιο γρήγορα και ψηλά ενδέχεται να ανεβαίνουν οι θερμοκρασίες κατά τη συγκόλληση και πόσο περισσότερο αναβαθμίζεται ενεργειακά η συγκεκριμένη ζώνη. Και η υψηλή ενεργειακή αναβάθμιση έχει ως γνωστό φυσικό επακόλουθο την πιο έντονη και ταχεία προσβολή («φάγωμα») των κόκκων κατά τον εμποτισμό των δοκιμίων στο χημικό αντιδραστήριο Nital, πριν την εισαγωγή τους στο μικροσκόπιο για παρατήρηση.

Δ. Σχόλια – Συμπεράσματα:

Είναι αλήθεια πως τα αποτελέσματα σε συγκεκριμένα σημεία δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, όπως στις επαναληπτικές του Θορύβου Barkhausen, που έλαβαν χώρα μετά την επιφανειακή μεταλλουργική κατεργασία / καθαρισμός των δοκιμίων όπου παρουσίαζαν, σε περιορισμένο αριθμό σημείων ορισμένων δοκιμίων, σημαντικές αποκλίσεις από τις αρχικές μετρήσεις, γεγονός αυτό μαρτυρά κακή λείανση. Δεν μας ξαφνιάζει, καθώς τα συγκολλημένα ελάσματα από τη φύση τους είναι δύσκολο να τα κατεργαστείς με ακρίβεια, λόγω του ανώμαλου ανάγλυφου και των λυγισμών, ενώ το ανθρώπινο λάθος πάντα θα υφίσταται ως πιθανότητα σε διεργασίες χειρωνακτικού μη αυτοματοποιημένου χαρακτήρα.

Παρόλα αυτά, η πλειοψηφία των δοκιμίων, τόσο στις μετρήσεις πρώτης και δεύτερης φάσης, όσο και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, μας έδωσαν μια πολλή καλή εικόνα για το πόσο είναι δυνατόν να μεταβληθούν οι τόσο σημαντικές μαγνητικές ιδιότητες του συγκεκριμένου κράματος ηλεκτρικού χάλυβα (και πιθανότατα και οι μηχανικές, λόγω των παραμενουσών τάσεων, παραμορφώσεων και μεγέθυνσης των κόκκων σε μια ζώνη γύρω από το κορδόνι της συγκόλλησης) μετά από μια συγκόλληση με τη μέθοδο TIG, όπου στη βιομηχανία μπορεί ακόμα και να αποτελεί διαδικασία ρουτίνας, κατά την παραγωγή εξαρτημάτων μετασχηματιστών και ηλεκτρικών κινητήρων. Επιπλέον διαπιστώθηκαν διαφοροποιήσεις των αποκρίσεων μεταξύ επιφάνειας συγκόλλησης και σε ορισμένο βάθος αυτής, τόσο στη ζώνη τήξης όσο και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Παρατηρήσαμε όντως μια άμεση και στενή σχέση μεταξύ μεταβολή της μικροδομής και των μαγνητικών ιδιοτήτων συγκολλημένου ηλεκτρικού χάλυβα. Κατά τη συγκόλληση γνωρίζουμε παρέχονται μεγάλα ποσά θερμότητας, ίσο και (ιδίως στη ραφή συγκόλλησης) κατά πολύ υψηλότερη των 900°C, θερμοκρασία που για πολλά είδη χαλύβων σηματοδοτεί την έναρξη μετασχηματισμών, ενώ αμέσως μετά το τέλος της συγκόλλησης ακολουθεί ψύξη αρκετά γρήγορη ώστε και αυτή με τη σειρά της να επηρεάζει σημαντικά φαινόμενα όπως τη διάχυση ή εκτόνωση των παραμενουσών τάσεων. Ακολουθως λοιπόν, όπως η θεωρία υπαγορεύει, τόσο στη στενή ζώνη τήξης, όσο και σε μια πιο εκτενή ζώνη γύρω από αυτήν την τήξης, την θερμικά επηρεασμένη ζώνη, αναπτύσσονται τάσεις που λόγω της ταχείας ψύξης και έλλειψη μετέπειτα αποτατικής ανόπτωσης δεν εκτονώνονται και παραμένουν εντός του υλικού, επηρεάζοντας τις μαγνητικές περιοχές και τα τοιχώματά τους (δρώντας ως εμπόδια στην κίνηση αυτών), καθώς και τις μηχανικές ιδιότητες και αντοχές. Καμιά φορά μάλιστα, ειδικά σε λεπτά συγκολλημένα ελάσματα όπως τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην δική μας περίπτωση, είναι εμφανές ότι τέτοια φαινόμενα υφίστανται, λόγω των οφθαλμοφανών λυγισμών που παρουσιάζουν τα -πρότινος- εντελώς επίπεδα ελάσματα. Επίσης, λόγω της ταχείας και έντονης θέρμανσης πάνω από το σημείο τήξης (για τη ζώνη τήξης) ή ίσης / πάνω από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (για τη ΘΕΖ) παρουσιάζονται φαινόμενα σχηματισμού δενδριτικής δομής στη ζώνη τήξης, ενώ στην ΘΕΖ παρατηρούνται μεγεθύνσεις κόκκων, με μέση διάμετρο ακόμα και πάνω από το διπλάσιο της μέσης διαμέτρου των αρχικών κόκκων, αλλοτροπικός μετασχηματισμός του φερρίτη σε φερρίτη εκτός ισορροπίας και με υποδεέστερες μαγνητικές ιδιότητες από αυτές της αρχικής φάσης, προκύπτουν ακόμα και μικροδιαφορισμοί, όσο αφορά τις περιεκτικότητες σε διάφορα κραματικά στοιχεία, με σημαντικότερο το πυρίτιο (διαφορές στην περιεκτικότητα μεταξύ εσωτερικό πυρήνα του κόκκου και επί των ορίων του).

Να τονίσουμε το σημαντικότερο συμπέρασμα όλων, ότι σε γενικές γραμμές οι μαγνητικές αποκρίσεις ανταποκρίνονταν και συμφωνούσαν με το πεδίο τάσεων, προερχόμενων από τη συγκόλληση, με αποτέλεσμα να παρατηρούμε το μεγαλύτερο peak του σήματος Barkhausen στη ζώνη τήξης, επίσης αυξητική τάση (μικρότερη μεν, αλλά σε σχέση με την απόκριση του μετάλλου βάσης αρκετά ενισχυμένο) στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ αποκρίσεων πριν και μετά της επιφανειακής κατεργασίας και απομάκρυνσης υλικού, γεγονός που μαρτυρά την ύπαρξη διαφορών στις μαγνητικές αποκρίσεις, ανάλογα με το βάθος μέτρησης.

Όλα τα παραπάνω τα υπαγορεύει μεν η θεωρία, επιβεβαιώθηκαν όμως όταν μετά το πέρας το συγκολλήσεων μετρήθηκαν (εις διπλούν) ο αριθμός περιστροφών μαγνητικών περιοχών, ένταση του φαινομένου Barkhausen και η ποιοτική ένδειξη της μαγνητικής διαπερατότητας σε σημεία τόσο στο μέταλλο βάσης, όσο και στη ζώνη τήξης και την ΘΕΖ και αντιστοιχήθηκαν με αντίστοιχες για την κάθε ζώνη φωτογραφίες παρμένες από το SEM.

Έτσι, μετά από την παραπάνω συσχέτιση δίνονται πολλές προοπτικές στην μέθοδο μέτρησης θορύβου Barkhausen προκειμένου να αξιοποιηθεί ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου, προκειμένου να διαπιστώνονται αλλαγές στην

κρυσταλλική δομή και να ανιχνεύονται τα όρια των ζωνών σε συγκολλημένα χαλύβδινα μόνο με τη χρήση της μεθόδου αυτή, χωρίς απαραίτητα να υποστούν μεταλλουργικές κατεργασίες για να παρατηρηθούν στο μικροσκόπιο. Το αποτέλεσμα είναι, πέρα από την σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος, έχουμε και την αποφυγή καταστροφών των ελασμάτων, καθώς όπως διαπιστώσαμε και στις μετρήσεις Barkhausen Noise της δεύτερης (επιβεβαιωτικού χαρακτήρα) φάσης, όσο προσεκτική και να γίνεται αυτή η μεταλλουργική επεξεργασία της επιφάνειας, πάντα υπάρχει η πιθανότητα σφάλματος και άσκησης περισσότερων ανεπιθύμητων τάσεων, που στη συνέχεια με τη σειρά τους αθροίζονται με τις ήδη υπάρχουσες και αλλοιώνουν το τελικό αποτέλεσμα. Επίσης, ας μην ξεχνάμε πως και μόνο το γεγονός ότι η μέθοδος μέτρησης θορύβου Barkhausen δίνει κατευθείαν, και *in situ* αν χρειαστεί, ποιοτικές ενδείξεις των μαγνητικών ιδιοτήτων που μας ενδιαφέρουν σε έναν ηλεκτρικό χάλυβα, αυτό μας παρέχει τη δυνατότητα γρήγορης αξιολόγησης της ποιότητας του χάλυβα, όσο αφορά τις ιδιότητες αυτές και σε τι βαθμό τις πληρεί, όπως και μια καλή αξιολόγηση, όσο αφορά την έκταση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και της ζώνης τήξης, και πόσο εκτός ή εντός των αποδεκτών ορίων εμπίπτουν οι αλλαγές των μαγνητικών ιδιοτήτων.

Δεδομένου πάντως των προβλημάτων που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων Barkhausen Noise, συμπεραίνουμε ότι η όλη μέθοδος χρίζει ανάγκης βελτιώσεων, ώστε να εξασφαλιστεί η ακρίβεια και αξιοπιστία της. Ορισμένες τροποποιήσεις επιβάλλεται να λάβουν χώρα προκειμένου ο αισθητήρας, και κατ' επέκταση όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός να μπορεί να αξιοποιείται με επιτυχία *in situ*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΗΝ: 20Α ΧΩΡΙΣ FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	5	5936	259	576
2	10	5310	233	530
3	15	6652	269	545
4	20	6412	259	508
5	25	5807	247	501
6	30	5808	251	505
7	35	6221	263	514
8	40	6517	267	417
9	45	7433	295	297
10	47	8025	315	344
11	49	8679	339	408
12	51	8704	336	387
13	53	9423	350	419
14	54	8899	347	425
15	55	9330	353	435
16	56	9171	359	451
17	57	9327	339	412
18	58	9288	350	470
19	59	9676	363	496
20	60	9653	361	512
21	61	9012	353	493
22	62	8541	339	526
23	63	8756	331	439
24	64	8732	315	431
25	65	8192	313	395
26	66	7543	305	460
27	68	7359	295	499
28	70	7295	295	530
29	72	6587	275	530
30	74	6199	267	536
31	76	6558	273	536
32	81	7381	291	532
33	86	7896	307	540
34	91	7470	311	563
35	96	7932	329	561
36	101	8779	355	560
37	106	10071	390	465
38	111	12045	419	433

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****1**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	9396	265	177
2	7	37	12349	331	602
3	9	39	12239	357	613
4	11	41	11759	345	634
5	13	43	12130	361	580
6	15	45	11785	361	530
7	17	47	9969	329	417
8	19	49	8351	301	377
9	21	51	9521	337	357
10	23	53	9482	321	359
11	25	55	10775	353	343
12	27	57	16101	464	329
13	29	59	22074	475	347
14	31	61	20404	439	339
15	33	63	17721	411	339
16	35	65	13151	359	425
17	37	67	12183	343	429
18	39	69	11175	327	499
19	41	71	11655	331	508
20	43	73	11146	323	522
21	45	75	9378	297	461
22	47	77	4511	209	179

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	5	6109	291	635
2	10	5894	273	600
3	15	5812	273	600
4	20	5570	263	600
5	25	5346	259	574
6	30	4947	239	520
7	32	4733	227	471
8	34	4812	235	463
9	36	4790	225	449
10	38	4247	219	443
11	40	4451	219	303
12	42	6085	261	355
13	43	7514	310	371
14	44	8195	313	381
15	45	8610	327	387
16	46	8468	329	395
17	47	9012	334	400
18	48	9150	338	410
19	49	8291	303	433
20	50	9102	344	452
21	51	9082	343	459
22	52	8943	347	465
23	53	8616	339	465
24	54	8819	328	397
25	56	8380	317	395
26	58	8410	307	419
27	60	7670	281	291
28	62	6849	273	447
29	64	6268	259	489
30	66	5527	243	501
31	71	4569	227	499
32	76	5134	233	502
33	81	5321	241	503
34	86	5666	249	509
35	91	5420	251	511
36	96	6003	267	540
37	101	6861	291	557
38	106	7827	315	547
39	111	8016	321	513
40	116	8686	337	509
41	121	8780	337	580

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	6	36	7734	339	563
2	8	38	7926	337	559
3	10	40	9132	343	331
4	12	42	9451	367	381
5	14	44	9508	377	395
6	15	45	10138	384	401
7	16	46	10225	387	415
8	17	47	9932	375	403
9	18	48	9716	367	441
10	19	49	9518	365	459
11	20	50	9609	363	462
12	21	51	9680	379	465
13	22	52	9142	363	473
14	23	53	9319	361	476
15	24	54	8689	343	483
16	25	55	8520	343	487
17	26	56	8370	339	375
18	28	58	7901	322	361
19	30	60	7578	307	321
20	32	62	7522	307	421
21	34	64	6818	303	580
22	36	66	7210	305	600
23	38	68	7106	303	606
24	40	70	7657	307	608
25	45	75	7989	299	602
26	50	80	6921	271	600

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	5	6437	299	612
2	10	5940	299	626
3	15	6578	291	549
4	20	6923	283	580
5	25	7455	287	580
6	30	6452	247	509
7	32	5949	243	514
8	34	7499	273	526
9	36	6707	247	526
10	38	5749	235	520
11	40	5574	243	530
12	42	7029	263	377
13	43	7475	283	344
14	44	7628	287	307
15	45	7937	323	443
16	46	8508	331	470
17	47	8345	337	488
18	48	8637	345	493
19	49	8918	357	512
20	50	8803	335	511
21	51	9317	355	499
22	52	8750	331	503
23	53	9148	355	500
24	55	9164	342	516
25	57	9737	379	501
26	59	9493	369	509
27	61	9842	377	520
28	63	9713	386	502
29	65	9010	359	512
30	70	9622	359	327
31	75	9343	341	287
32	80	8088	305	289
33	85	8882	315	345
34	90	8571	305	353
35	95	7781	299	469
36	100	7646	291	517
37	105	6539	273	526
38	110	7067	277	537
39	115	7488	283	511
40	120	7623	289	540
41	125	8105	305	536

42	130	8547	339	588
43	135	8335	323	532
44	140	7988	318	530
45	145	8039	303	543
46	150	7901	307	521

Μετά τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	6	46	8112	353	491
2	17	47	8424	355	558
3	18	48	8954	359	427
4	19	49	10362	381	315
5	20	50	10124	395	461
6	21	51	10528	401	466
7	22	52	11057	415	472
8	23	53	11083	423	479
9	24	54	11092	417	481
10	25	55	11033	410	478
11	26	56	10238	387	474
12	27	57	10402	384	460
13	28	58	10813	394	459
14	30	60	10763	405	447
15	32	62	10192	386	455
16	34	64	9677	369	454
17	36	66	9358	367	451
18	38	68	9260	353	454
19	40	70	9779	363	464
20	42	72	9029	343	375
21	47	77	8061	315	345
22	52	82	7838	311	532
23	57	87	7401	297	586
24	62	92	7912	307	588
25	67	97	7853	299	582
26	72	102	8395	307	575

20A ME FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6726	295	578
2	15	6746	289	580
3	20	6256	271	570
4	25	5915	251	572
5	30	5711	243	559
6	32	7443	267	559
7	34	5554	233	509
8	36	4297	211	516
9	38	5055	225	472
10	40	4242	203	225
11	41	6110	231	225
12	42	7175	257	247
13	43	6985	273	578
14	44	6759	271	576
15	45	7254	279	564
16	46	7698	297	569
17	47	7804	289	573
18	48	8253	307	580
19	49	7788	319	532
20	50	7483	299	491
21	51	7366	303	518
22	52	7442	313	522
23	53	7822	283	239
24	54	7604	267	227
25	55	7867	303	534
26	56	8041	307	557
27	58	7066	287	557
28	60	7465	289	518
29	62	8221	309	578
30	64	9226	329	580
31	66	7923	303	585
32	71	8216	345	586
33	76	8217	346	578
34	81	7219	319	581
35	86	8452	341	590
36	91	7963	329	606

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****1**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	18715	347	167
2	7	37	11535	327	540
3	9	39	13767	363	518
4	11	41	13919	353	514
5	13	43	13480	359	493
6	15	45	13451	403	488
7	17	47	12821	381	468
8	19	49	13434	410	483
9	21	51	14385	435	481
10	23	53	15380	441	504
11	25	55	14828	431	547
12	27	57	13141	405	586
13	29	59	11676	369	600
14	31	61	10544	347	611
15	33	63	9471	329	612
16	35	65	8532	317	614
17	37	67	9002	320	584
18	39	69	8226	297	399
19	41	71	5288	225	169

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6618	313	552
2	15	6355	291	584
3	20	6234	282	576
4	25	5686	271	559
5	30	4948	247	561
6	32	4715	235	495
7	34	4896	243	437
8	36	5420	235	361
9	38	5221	235	449
10	40	4463	201	397
11	41	5329	227	243
12	42	6226	247	235
13	43	5866	251	493
14	44	6749	275	490
15	45	7390	289	476
16	46	6074	251	482
17	47	7556	287	483
18	48	7843	305	481
19	49	6497	265	391
20	50	6464	279	464
21	51	6890	271	239
22	52	6419	261	239
23	53	6054	251	255
24	54	5652	243	255
25	55	5775	255	492
26	56	5681	255	528
27	58	5837	263	559
28	60	6716	279	536
29	62	6491	275	517
30	64	7212	293	528
31	66	6324	274	543
32	71	5227	247	547
33	76	7055	291	568
34	81	7656	315	567
35	86	8010	331	566
36	91	8872	337	580

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	6990	281	479
2	7	37	8487	321	403
3	9	39	9057	339	383
4	11	41	9395	353	384
5	13	43	10166	367	381
6	15	45	10582	371	331
7	16	46	11287	390	286
8	17	47	9925	373	307
9	18	48	9720	365	404
10	19	49	10009	377	369
11	20	50	9034	345	385
12	21	51	10189	379	387
13	22	52	10482	375	389
14	23	53	9032	336	452
15	24	54	9069	345	443
16	25	55	9267	355	456
17	26	56	8766	342	425
18	27	57	9526	337	291
19	28	58	9755	341	299
20	29	59	8733	321	359
21	30	60	8856	315	259
22	32	62	6510	281	491
23	34	64	7157	291	556
24	36	66	7799	303	572
25	38	68	7281	291	576
26	40	70	7200	289	594
27	45	75	7042	286	580

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6643	305	571
2	15	6488	297	584
3	20	6436	275	576
4	25	5299	239	556
5	30	4502	211	530
6	32	5172	223	520
7	34	5168	227	500
8	36	7845	295	497
9	38	7198	283	501
10	40	6711	269	489
11	41	8438	297	257
12	42	9609	315	243
13	43	9840	343	255
14	44	8779	333	389
15	45	8524	331	398
16	46	7644	295	439
17	47	8061	315	457
18	48	8909	352	503
19	49	8937	327	291
20	50	8608	313	263
21	51	7848	299	279
22	52	7584	290	283
23	53	7822	291	320
24	54	6595	279	484
25	56	6870	283	507
26	58	7306	289	522
27	60	7566	291	522
28	62	6739	281	524
29	64	6482	275	544
30	69	7680	303	580
31	74	7792	325	580
32	79	8043	341	580
33	84	9249	367	536
34	89	10244	398	530

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****3**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	7830	331	530
2	7	37	7551	335	516
3	9	39	7711	337	506
4	11	41	7941	343	503
5	13	43	7988	343	494
6	15	45	9142	344	287
7	16	46	9859	361	267
8	17	47	11185	408	267
9	18	48	9998	398	375
10	19	49	10026	402	379
11	20	50	9973	408	384
12	21	51	10115	402	395
13	22	52	9814	373	411
14	23	53	10089	375	423
15	24	54	9464	371	431
16	25	55	9536	395	460
17	26	56	9546	398	468
18	27	57	9738	390	456
19	28	58	10649	384	235
20	29	59	9246	357	273
21	30	60	9497	350	275
22	31	61	9285	339	271
23	33	63	8194	325	299
24	35	65	7100	333	530
25	37	67	7040	331	532
26	39	69	7020	330	540
27	41	71	7178	331	549
28	43	73	7101	331	566

30Α ΧΩΡΙΣ FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6856	315	545
2	15	7994	331	569
3	20	8044	331	571
4	25	8105	313	573
5	30	7429	291	590
6	35	7124	281	563
7	37	6989	278	572
8	39	6516	271	576
9	41	6129	267	536
10	43	6273	267	526
11	45	7067	295	528
12	47	8142	309	353
13	48	8812	337	369
14	49	9245	349	363
15	50	9307	355	397
16	51	9833	369	427
17	52	9790	371	439
18	53	9785	367	419
19	54	9341	353	439
20	55	9626	367	445
21	56	10444	379	451
22	57	10241	377	476
23	58	10164	381	494
24	59	9359	359	495
25	60	9843	371	509
26	61	9461	363	481
27	62	8783	323	419
28	63	8429	323	402
29	64	7738	305	392
30	65	7788	295	413
31	67	5096	263	564
32	69	5155	251	580
33	71	5198	251	572
34	73	5701	259	573
35	75	5644	259	574
36	80	6228	283	600
37	85	6460	307	615
38	90	7236	329	602

39	95	8575	367	532
40	100	11421	417	450

Μετά τη λείανση
Δοκίμιο
1

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	18715	347	167
2	7	37	11535	327	540
3	9	39	13767	363	518
4	11	41	13919	353	514
5	13	43	13480	359	493
6	15	45	13451	403	488
7	17	47	12821	381	468
8	19	49	13434	410	483
9	21	51	14385	435	481
10	23	53	15380	441	504
11	25	55	14828	431	547
12	27	57	13141	405	586
13	29	59	11676	369	600
14	31	61	10544	347	611
15	33	63	9471	329	612
16	35	65	8532	317	614
17	37	67	9002	320	584
18	39	69	8226	297	399
19	41	71	5288	225	169

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6688	313	536
2	15	5987	299	608
3	20	5775	283	594
4	25	5687	275	532
5	30	5212	259	526
6	35	4698	239	512
7	37	4660	231	522
8	39	4582	233	507
9	41	4540	229	493
10	43	5005	241	510
11	45	4923	235	520
12	47	4859	241	511
13	49	6069	275	512
14	51	7156	295	477
15	53	8059	323	481
16	54	7893	329	488
17	55	8068	327	505
18	56	8398	334	508
19	57	8334	335	516
20	58	8138	329	510
21	59	8380	337	512
22	60	8565	349	509
23	61	8395	342	510
24	62	8324	341	491
25	63	8637	347	456
26	64	7669	307	496
27	66	7259	299	419
28	68	5619	275	557
29	70	5001	257	580
30	72	5266	259	588
31	74	5362	251	516
32	79	5113	247	505
33	84	5192	255	571
34	89	5576	271	572
35	94	6080	289	538
36	99	6390	297	606
37	104	7705	320	604

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	3639	195	499
2	10	40	4201	211	534
3	15	45	8030	351	518
4	17	47	7998	341	472
5	19	49	8131	343	453
6	21	51	7831	327	501
7	23	53	7626	315	507
8	25	55	7493	311	509
9	26	56	7573	307	526
10	27	57	7486	303	522
11	28	58	7198	295	518
12	29	59	7006	289	503
13	30	60	7195	307	502
14	31	61	7312	307	499
15	33	63	7095	295	498
16	35	65	6708	289	492
17	37	67	6529	283	470
18	39	69	5654	271	557
19	41	71	5432	273	664

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6777	323	604
2	15	6971	323	534
3	20	7450	327	577
4	25	7882	305	580
5	30	7377	267	484
6	35	6931	255	522
7	40	6443	255	547
8	42	6461	263	561
9	44	6409	266	545
10	46	6861	291	524
11	48	7759	322	538
12	50	8546	345	509
13	51	8900	355	536
14	52	10029	371	520
15	53	10379	379	543
16	54	10499	390	544
17	55	10818	385	538
18	56	10501	386	538
19	57	9993	377	534
20	58	9448	361	532
21	59	8902	339	507
22	60	8372	331	511
23	62	7024	299	510
24	64	7265	281	493
25	66	7242	283	584
26	68	7360	279	565
27	70	8623	299	578
28	75	9082	315	545
29	80	8459	317	570
30	85	8439	323	621
31	90	7884	320	560
32	95	8289	341	627
33	100	8494	347	636

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****3**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	6505	307	644
2	10	40	6390	315	639
3	12	42	6521	311	575
4	14	44	6357	307	628
5	16	46	7123	303	482
6	18	48	7604	313	493
7	20	50	8061	335	548
8	22	52	7962	315	516
9	23	53	8769	339	532
10	24	54	9471	347	507
11	25	55	9458	355	540
12	26	56	9263	351	530
13	27	57	9005	341	522
14	28	58	8911	339	550
15	29	59	8328	323	559
16	30	60	8332	323	557
17	31	61	8136	320	540
18	32	62	7937	311	559
19	33	63	6958	299	569
20	35	65	6617	291	552
21	37	67	5974	295	673
22	39	69	6708	297	635
23	41	71	6627	291	628
24	43	73	6277	303	685

30A ME FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	5406	323	686
2	15	5787	315	555
3	20	6201	327	664
4	25	6915	329	639
5	30	7441	315	604
6	35	7035	289	604
7	37	6910	275	586
8	39	7224	279	571
9	41	7053	282	596
10	43	6361	263	606
11	45	6294	267	612
12	47	5946	275	612
13	49	6569	251	251
14	50	7475	270	259
15	51	7954	291	251
16	52	7805	311	485
17	53	7862	313	369
18	54	7855	305	419
19	55	7098	281	455
20	56	7103	274	469
21	57	8111	303	489
22	58	7183	287	495
23	59	7541	307	489
24	60	7512	323	530
25	61	8313	307	251
26	62	7979	295	247
27	64	7435	295	289
28	66	5798	299	660
29	68	5848	283	652
30	70	5828	273	664
31	72	5918	279	668
32	77	6141	275	648
33	82	6145	282	629
34	87	6177	287	570
35	92	6259	313	718
36	97	7026	343	668
37	102	8826	369	507

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****1**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	8858	255	163
2	7	37	8534	291	355
3	9	39	8712	297	359
4	11	41	10164	323	448
5	13	43	9749	327	589
6	15	45	10019	339	668
7	17	47	9998	343	668
8	19	49	12095	359	668
9	21	51	13276	379	620
10	23	53	13416	375	594
11	25	55	11448	373	600
12	27	57	13872	398	584
13	29	59	12782	392	556
14	31	61	11678	395	551
15	33	63	13152	402	563
16	35	65	15423	421	569
17	37	67	16297	429	551
18	39	69	19171	454	487
19	41	71	17443	439	545
20	43	73	16054	427	600
21	45	75	16663	419	550
22	47	77	21772	457	167

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6338	323	639
2	15	5983	305	660
3	20	5868	287	628
4	25	5587	275	620
5	30	5197	251	536
6	35	4683	227	522
7	37	4573	223	525
8	39	4451	217	516
9	41	4498	217	508
10	43	4606	235	516
11	45	4678	227	524
12	47	5153	243	530
13	49	6035	239	297
14	51	7572	287	283
15	52	8193	297	275
16	53	7846	303	402
17	54	8144	307	363
18	55	7634	289	379
19	56	6668	259	415
20	57	6522	251	432
21	58	6638	263	452
22	59	7356	295	449
23	60	7344	299	451
24	61	8201	323	450
25	62	8589	324	271
26	63	8091	313	275
27	64	7752	303	291
28	66	7061	283	277
29	68	5318	259	577
30	70	4910	259	619
31	72	5425	259	623
32	74	5327	251	623
33	76	5470	263	628
34	78	5482	265	644
35	83	5833	278	624
36	88	5904	277	642
37	93	5804	267	638
38	98	6183	279	572
39	103	6343	275	609

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	7406	311	522
2	10	40	8288	353	488
3	12	42	8236	363	491
4	14	44	7681	355	516
5	16	46	7656	352	536
6	18	48	7844	347	552
7	20	50	8183	351	459
8	22	52	9182	355	295
9	23	53	9008	347	285
10	24	54	8627	347	419
11	25	55	8383	344	427
12	26	56	8292	336	445
13	27	57	8283	336	447
14	28	58	7757	315	464
15	29	59	7232	315	468
16	30	60	7471	315	465
17	31	61	7722	319	466
18	32	62	7889	327	468
19	33	63	7869	326	467
20	34	64	7788	329	468
21	35	65	7658	329	503
22	36	66	8097	325	327
23	37	67	7521	319	387
24	38	68	7093	303	391
25	42	72	6762	281	323
26	46	76	5769	281	592

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6272	289	513
2	15	6302	305	557
3	20	6093	297	604
4	25	6590	315	622
5	30	7269	307	592
6	35	7824	297	580
7	40	7834	289	570
8	42	6489	259	584
9	44	6606	267	566
10	46	6697	281	568
11	48	6549	243	263
12	50	8581	289	239
13	51	8635	297	251
14	52	8660	331	413
15	53	9113	331	355
16	54	8696	325	391
17	55	8253	307	411
18	56	8922	322	347
19	57	8525	315	451
20	58	8311	307	417
21	59	8186	320	462
22	60	8020	307	485
23	61	8403	331	414
24	62	8498	299	243
25	63	8670	311	251
26	64	8126	289	259
27	65	7396	275	247
28	66	6860	265	259
29	68	6771	259	355
30	70	6155	267	573
31	72	6381	263	590
32	74	6421	259	584
33	76	6534	283	604
34	81	6884	294	634
35	86	7194	313	630
36	91	7056	320	654
37	96	6878	305	656
38	101	6803	297	654

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****3**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	7023	339	588
2	10	40	7001	351	582
3	12	42	7184	353	590
4	14	44	6894	347	614
5	16	46	6620	339	614
6	18	48	6912	333	626
7	20	50	8192	325	403
8	22	52	8425	331	373
9	23	53	8610	331	295
10	24	54	8630	355	419
11	25	55	8450	343	423
12	26	56	8432	343	427
13	27	57	8420	345	431
14	28	58	7794	320	445
15	29	59	7388	323	450
16	30	60	6843	284	462
17	31	61	7473	311	464
18	32	62	7597	321	478
19	33	63	7427	323	501
20	34	64	7670	325	476
21	35	65	8294	321	303
22	36	66	7583	313	341
23	37	67	7491	313	337
24	39	69	7378	291	278
25	41	71	6453	299	562
26	43	73	6277	299	625
27	45	75	6786	313	632

40A ΧΩΡΙΣ FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6282	275	590
2	15	5193	251	678
3	20	5967	283	670
4	25	6380	287	660
5	30	6251	275	652
6	35	6939	275	639
7	40	7166	279	636
8	42	6948	281	644
9	44	6374	283	668
10	46	5765	289	692
11	48	6397	295	660
12	50	6372	291	617
13	52	8578	325	375
14	53	9974	331	263
15	54	9370	361	458
16	55	9868	359	452
17	56	9943	363	449
18	57	9982	363	450
19	58	9747	361	460
20	59	10001	363	464
21	60	9792	363	470
22	61	9929	371	456
23	62	9523	367	469
24	63	9923	371	467
25	64	9149	355	461
26	65	9328	355	470
27	66	9148	357	470
28	67	8965	355	467
29	68	7348	275	251
30	70	5642	267	576
31	72	4885	247	640
32	74	6453	317	557
33	76	6646	315	558
34	78	6552	319	570
35	83	6380	305	612
36	88	5948	291	652
37	93	5538	287	664
38	98	6233	299	621

39	103	8094	331	510
40	108	9917	373	435

Μετά τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	8775	263	171
2	7	37	9215	289	241
3	9	39	10455	327	518
4	11	41	9691	323	580
5	13	43	9666	331	577
6	15	45	9483	323	576
7	17	47	9745	331	562
8	19	49	10806	339	548
9	21	51	11517	359	526
10	23	53	11922	390	507
11	25	55	12383	407	495
12	27	57	13281	435	496
13	29	59	13686	454	487
14	31	61	13195	449	495
15	33	63	12499	421	494
16	35	65	11675	385	485
17	37	67	10783	359	493
18	39	69	10238	333	490
19	41	71	10095	321	454
20	43	73	6943	249	201
21	45	75	4823	217	153

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	5431	283	648
2	15	5153	257	632
3	20	5450	263	614
4	25	5969	275	623
5	30	5892	279	648
6	35	5613	267	616
7	40	5796	271	610
8	42	6271	295	652
9	44	6330	291	640
10	46	6197	281	604
11	48	6267	279	588
12	50	6781	281	447
13	52	7326	297	427
14	53	8432	329	464
15	54	8580	333	508
16	55	8806	343	508
17	56	9322	353	524
18	57	9543	361	514
19	58	9599	367	512
20	59	9399	347	514
21	60	9303	355	508
22	61	9087	352	507
23	62	8944	339	506
24	63	8622	341	505
25	64	8377	330	509
26	66	7839	299	339
27	68	5654	251	536
28	70	4844	231	521
29	72	4708	227	512
30	74	4613	227	512
31	76	4350	211	514
32	78	4223	211	532
33	83	4201	215	557
34	88	4415	227	600
35	93	4793	233	642
36	98	4998	235	638
37	103	5631	259	674
38	108	6965	289	648

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	4141	223	602
2	10	40	4080	211	572
3	15	45	4244	217	582
4	17	47	5191	241	584
5	19	49	6823	265	341
6	21	51	7921	305	409
7	23	53	8458	333	403
8	24	54	8449	333	425
9	25	55	8228	320	435
10	26	56	7964	307	435
11	27	57	7799	299	437
12	28	58	7947	307	457
13	29	59	7785	295	460
14	30	60	7596	299	452
15	31	61	7565	305	451
16	32	62	7574	291	287
17	33	63	7111	281	297
18	35	65	5739	241	305
19	37	67	4835	215	351
20	39	69	4482	211	383
21	41	71	4745	219	411
22	43	73	4757	225	458
23	45	75	4549	217	485

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6420	285	696
2	15	6072	289	674
3	20	5883	271	690
4	25	6221	283	684
5	30	6891	303	670
6	35	6880	307	668
7	40	6588	311	668
8	42	6787	315	648
9	44	6741	315	644
10	46	7522	315	617
11	48	7399	301	623
12	50	8023	295	389
13	52	8294	333	443
14	53	8883	359	472
15	54	9322	355	493
16	55	9456	359	497
17	56	9258	353	485
18	57	9659	371	474
19	58	10037	373	485
20	59	9876	363	475
21	60	9685	355	485
22	61	9828	359	462
23	62	9094	346	495
24	63	8663	331	477
25	64	8194	323	495
26	65	7663	311	564
27	66	7940	295	325
28	68	7553	291	353
29	70	6333	267	466
30	72	5045	233	556
31	74	4721	219	546
32	76	4613	215	538
33	78	4001	199	530
34	83	4250	207	542
35	88	4318	209	565
36	93	4029	203	578
37	98	3844	195	592
38	103	6046	239	620
39	108	5567	241	668
40	113	6882	265	674

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****3**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	6536	287	654
2	12	42	6472	275	644
3	14	44	6051	266	619
4	16	46	5953	267	628
5	18	48	5785	275	652
6	20	50	6279	287	633
7	22	52	7971	307	355
8	23	53	8090	335	462
9	24	54	8872	355	355
10	25	55	8895	355	371
11	26	56	9144	377	446
12	27	57	9525	381	466
13	28	58	9948	393	468
14	29	59	9991	395	425
15	30	60	9388	363	439
16	31	61	9685	400	454
17	32	62	9537	385	464
18	33	63	9534	385	443
19	34	64	9562	389	462
20	35	65	8894	373	447
21	36	66	8343	357	414
22	37	67	8016	339	389
23	39	69	7084	311	505
24	41	71	6817	271	361
25	43	73	5510	251	526
26	45	75	5423	241	522

50A ΧΩΡΙΣ FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6104	295	628
2	15	5171	257	639
3	20	4320	227	620
4	25	3663	203	656
5	30	4284	217	609
6	35	5076	241	640
7	40	5818	271	668
8	42	5690	279	664
9	44	5501	263	616
10	46	6280	251	239
11	48	7197	275	239
12	50	8492	315	251
13	51	8675	369	507
14	52	9090	384	487
15	53	9224	387	487
16	54	9335	373	483
17	55	9099	369	489
18	56	9184	369	478
19	57	8628	353	479
20	58	9132	379	479
21	59	8673	359	447
22	60	7673	331	489
23	62	6414	271	271
24	64	5790	257	299
25	66	5172	255	584
26	68	5235	251	613
27	70	5185	243	592
28	72	5099	239	632
29	77	5369	241	644
30	82	5219	244	654
31	87	5372	257	555
32	92	5668	282	629
33	97	6816	315	559
34	102	8408	337	464

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****1**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	7871	255	171
2	7	37	8993	291	287
3	9	39	8953	305	544
4	11	41	7916	295	627
5	13	43	9189	305	596
6	15	45	8880	313	600
7	17	47	9729	345	570
8	19	49	11016	375	553
9	21	51	12073	402	560
10	23	53	12806	417	550
11	25	55	13141	416	549
12	27	57	13286	411	559
13	29	59	12284	383	569
14	31	61	11581	367	564
15	33	63	10340	338	576
16	35	65	9537	323	600
17	37	67	9231	327	602
18	39	69	9330	325	609
19	41	71	9803	327	600
20	43	73	10012	321	401
21	45	75	12115	291	171

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	4078	211	664
2	15	3414	199	656
3	20	3429	195	668
4	25	3851	211	664
5	30	4378	227	668
6	35	5060	259	676
7	40	5134	281	664
8	42	5274	279	673
9	44	5111	277	650
10	46	5725	291	588
11	48	7623	323	406
12	50	8316	351	455
13	52	8660	377	511
14	53	8526	361	525
15	54	8844	371	516
16	55	8773	361	512
17	56	8733	375	516
18	57	8822	375	515
19	58	8429	369	516
20	59	8586	367	518
21	60	8453	359	518
22	61	7627	346	540
23	62	7236	323	534
24	64	6755	289	399
25	66	5497	246	450
26	68	4586	231	538
27	70	4377	223	565
28	72	4175	219	552
29	74	3662	203	553
30	76	3637	203	568
31	81	3616	203	582
32	86	3681	209	617
33	91	4110	219	593
34	96	4248	219	606
35	101	4131	215	618
36	106	5001	233	602

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	4951	247	604
2	10	40	5428	259	606
3	12	42	5364	265	629
4	14	44	4950	257	635
5	16	46	5334	269	616
6	18	48	6984	299	469
7	20	50	7678	321	472
8	22	52	8327	337	522
9	23	53	7439	321	509
10	24	54	7968	322	532
11	25	55	8020	315	532
12	26	56	8253	329	521
13	27	57	8556	331	532
14	28	58	8218	323	536
15	29	59	8219	329	551
16	30	60	8124	331	558
17	31	61	7919	321	577
18	32	62	7696	315	596
19	33	63	7464	307	555
20	34	64	6968	297	553
21	35	65	6968	283	408
22	36	66	6069	263	419
23	38	68	4998	235	462
24	40	70	4572	219	528
25	42	72	4345	211	514
26	44	74	4182	207	514

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6493	279	652
2	15	6145	295	636
3	20	5278	241	633
4	25	5445	235	638
5	30	5513	239	627
6	35	6084	243	637
7	40	6398	289	679
8	42	6207	273	664
9	44	5007	235	600
10	46	4401	225	628
11	48	6078	257	393
12	50	6739	283	522
13	52	8000	319	499
14	53	8177	328	504
15	54	8549	336	507
16	55	9010	355	501
17	56	8678	343	490
18	57	8811	347	496
19	58	8556	343	501
20	59	8607	343	491
21	60	8396	329	476
22	61	7790	320	495
23	62	7496	307	512
24	64	7386	311	371
25	66	6345	283	462
26	68	5346	267	600
27	70	5198	251	617
28	72	5428	251	621
29	74	5532	243	614
30	79	5815	251	648
31	84	5598	247	654
32	89	5247	241	635
33	94	5256	239	623
34	99	4625	225	614
35	104	4988	231	648

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****3**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	6007	295	648
2	10	40	5424	263	646
3	12	42	5530	265	644
4	14	44	5333	259	654
5	16	46	4670	251	655
6	18	48	6181	283	517
7	20	50	7481	299	405
8	21	51	7862	331	532
9	22	52	8274	335	514
10	23	53	9227	351	508
11	24	54	9082	355	526
12	25	55	9509	357	524
13	26	56	9179	351	547
14	27	57	8634	339	559
15	28	58	8689	343	565
16	29	59	8253	336	602
17	30	60	7527	323	636
18	31	61	7259	317	636
19	32	62	7102	307	616
20	33	63	6991	305	586
21	34	64	7232	291	417
22	35	65	6484	275	401
23	37	67	5544	271	606
24	39	69	4916	243	580
25	41	71	5362	243	568
26	43	73	5535	243	569
27	45	75	5396	243	561

50A ME FILLER

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

1

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	3060	187	668
2	15	3303	193	664
3	20	3697	203	652
4	25	4724	233	618
5	30	6531	281	530
6	35	7469	313	497
7	40	6935	315	557
8	42	6741	303	580
9	44	6402	303	586
10	46	6856	291	421
11	48	7172	286	393
12	49	7661	295	337
13	50	7776	299	319
14	51	7246	305	435
15	52	7439	297	389
16	53	7311	295	385
17	54	7277	289	371
18	55	7057	281	367
19	56	7123	296	369
20	57	6898	279	359
21	58	6856	281	359
22	59	7190	289	363
23	60	7068	283	365
24	61	7121	289	387
25	62	7013	281	329
26	63	6311	267	337
27	64	5872	243	299
28	66	6019	259	405
29	68	5641	282	551
30	70	6551	307	514
31	72	6625	315	594
32	74	7133	337	586
33	79	7575	345	524
34	84	6879	311	540
35	89	6266	287	564
36	94	6665	301	568
37	99	7632	334	505
38	104	9427	363	439

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****1**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	19475	365	171
2	7	37	15272	342	403
3	9	39	15218	355	598
4	11	41	15138	359	596
5	13	43	14530	359	598
6	15	45	13433	351	596
7	17	47	13031	355	584
8	19	49	13601	375	540
9	21	51	12816	402	532
10	23	53	13554	431	530
11	25	55	14129	462	540
12	27	57	14677	458	542
13	29	59	14013	448	555
14	31	61	14948	454	548
15	33	63	16000	437	547
16	35	65	15605	423	548
17	37	67	14617	371	560
18	39	69	12272	345	575
19	41	71	10597	327	568
20	43	73	10099	323	529
21	45	75	8427	271	187
22	47	77	5671	231	151

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

2

#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	2212	163	630
2	15	2702	171	671
3	20	2869	183	660
4	25	4332	223	596
5	30	6357	267	532
6	35	7443	322	470
7	40	7442	335	448
8	42	6919	320	487
9	44	6588	311	532
10	46	6775	309	493
11	48	7149	283	283
12	49	7325	267	279
13	50	7021	295	417
14	51	7157	281	371
15	52	6973	281	357
16	53	6615	267	351
17	54	6529	259	339
18	55	6452	259	335
19	56	6371	259	331
20	57	6004	251	329
21	58	6328	257	329
22	59	6725	275	327
23	60	7017	283	343
24	61	7091	283	346
25	62	7427	305	379
26	63	8064	307	375
27	64	7733	295	259
28	65	7726	315	335
29	67	8016	343	375
30	69	7291	345	536
31	71	7714	365	485
32	73	8000	367	448
33	75	8280	355	435
34	80	8085	329	471
35	85	6913	285	522
36	90	4467	219	596
37	95	3420	193	609
38	100	3542	199	571
39	105	5088	227	495

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****2**

#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	5330	247	497
2	10	40	5590	259	516
3	12	42	5988	289	552
4	14	44	6338	305	578
5	16	46	7008	343	561
6	18	48	8933	377	363
7	20	50	9672	413	326
8	21	51	10037	414	311
9	22	52	10195	433	327
10	23	53	10420	450	331
11	24	54	10427	429	335
12	25	55	10197	419	328
13	26	56	10220	423	323
14	27	57	9677	414	339
15	28	58	9709	395	331
16	29	59	9791	404	351
17	30	60	9999	425	359
18	31	61	10391	450	339
19	32	62	10294	431	307
20	33	63	9517	427	371
21	34	64	9715	415	307
22	35	65	9333	401	307
23	36	66	9516	379	299
24	38	68	8358	365	391
25	40	70	7453	345	481
26	42	72	6327	318	487
27	44	74	5892	275	510

Πριν τη λείανση

Δοκίμιο

3

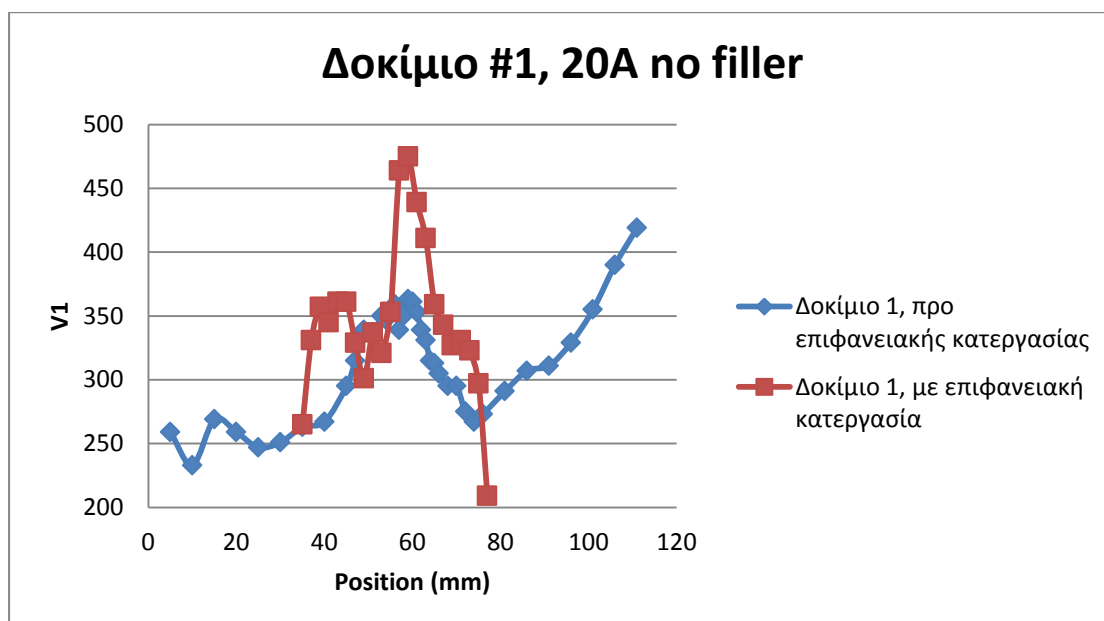
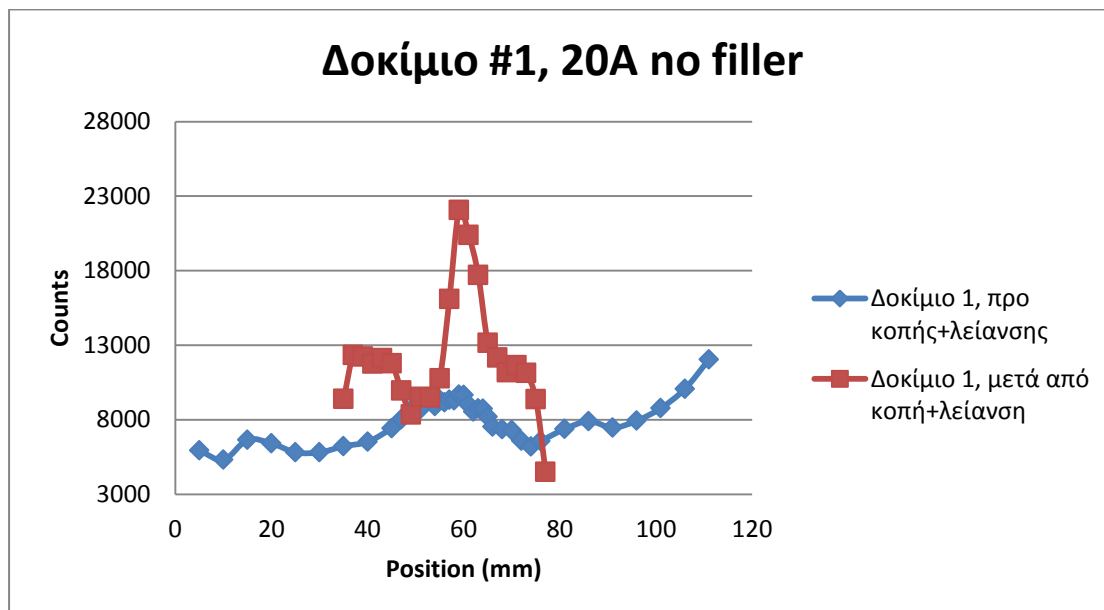
#	Θέση (mm)	Counts	V1	V2
1	10	6337	267	648
2	15	6894	305	586
3	20	7005	315	600
4	25	6365	305	598
5	30	6588	320	576
6	35	6678	320	594
7	40	6937	291	588
8	42	6315	265	550
9	44	5694	235	479
10	46	5554	239	448
11	48	5172	225	331
12	49	6205	247	307
13	50	6277	265	393
14	51	6417	262	373
15	52	6329	259	363
16	53	6511	267	355
17	54	6238	255	353
18	55	6354	259	359
19	56	6432	265	363
20	57	6529	267	371
21	58	6642	273	387
22	59	6795	283	395
23	60	6734	281	413
24	61	7385	297	466
25	62	6716	271	323
26	63	6472	263	321
27	65	6667	293	605
28	67	6748	305	616
29	69	7122	323	609
30	71	7401	347	544
31	73	7636	353	505
32	78	8038	343	552
33	83	7564	325	557
34	88	6841	303	596
35	93	6100	275	620
36	98	6408	267	644
37	103	6858	267	644

Μετά τη λείανση**Δοκίμιο****3**

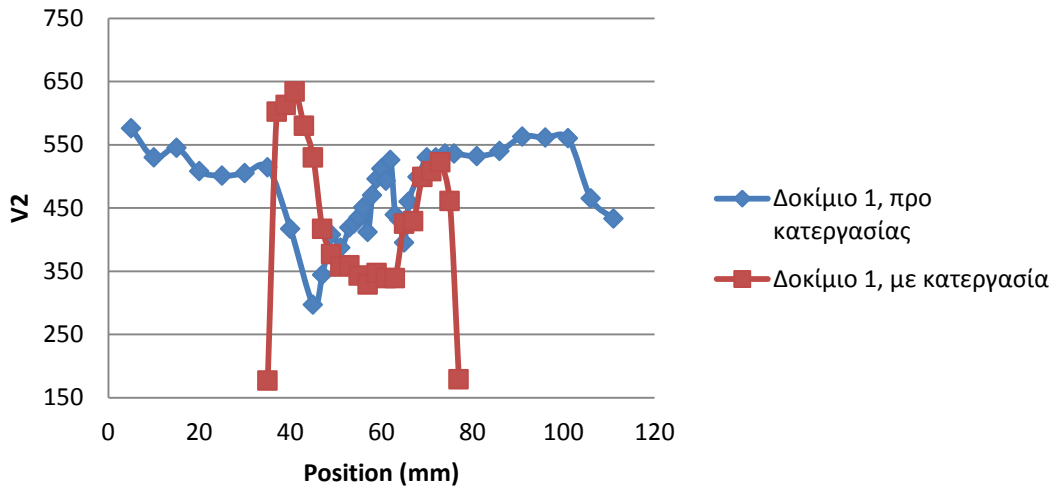
#	Θέση (mm)	Προσαρμοσμένη Θέση (mm)*	Counts	V1	V2
1	5	35	2104	155	510
2	10	40	3545	195	576
3	12	42	4932	235	596
4	14	44	5965	267	560
5	16	46	7887	301	369
6	18	48	9147	347	295
7	19	49	9293	342	307
8	20	50	9608	347	283
9	21	51	10526	390	275
10	22	52	10296	391	291
11	23	53	10445	400	299
12	24	54	10348	384	303
13	25	55	10259	365	311
14	26	56	10071	361	311
15	27	57	9753	346	326
16	28	58	9681	353	343
17	29	59	9843	369	349
18	30	60	9293	359	390
19	31	61	9419	355	375
20	32	62	9041	331	351
21	33	63	8822	323	281
22	34	64	7480	275	249
23	35	65	6462	251	271
24	36	66	5731	243	464
25	37	67	4652	219	506
26	39	69	4214	209	495
27	41	71	4232	203	467
28	43	73	3766	199	470

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ SEM – ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ:

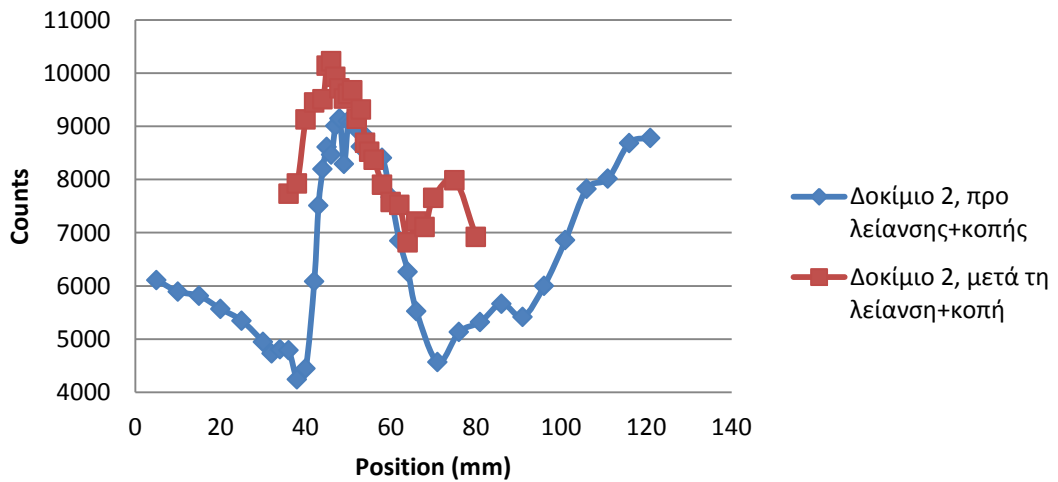
Δοκίμια 20A: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 20A, χωρίς μέταλλο προσθήκης:



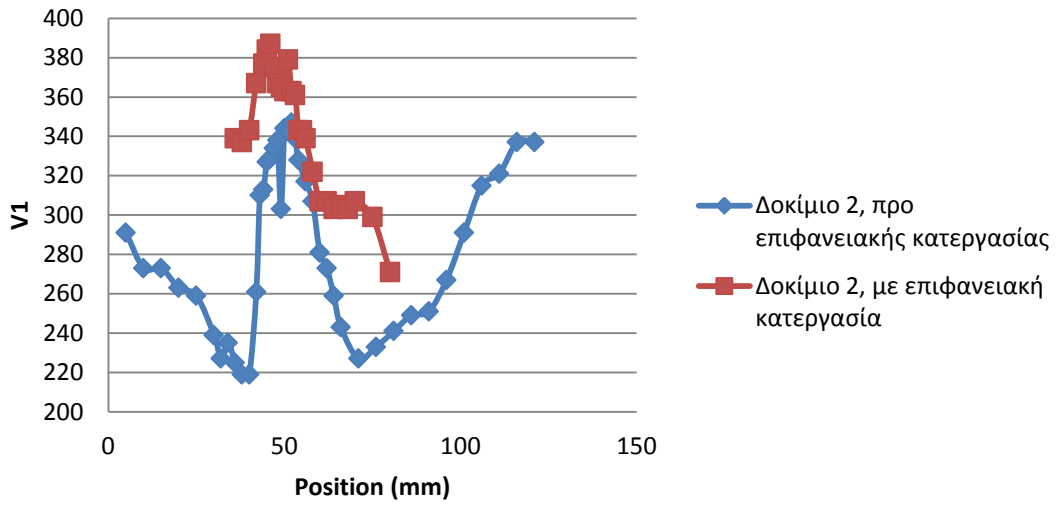
Δοκίμιο #1, 20A no filler



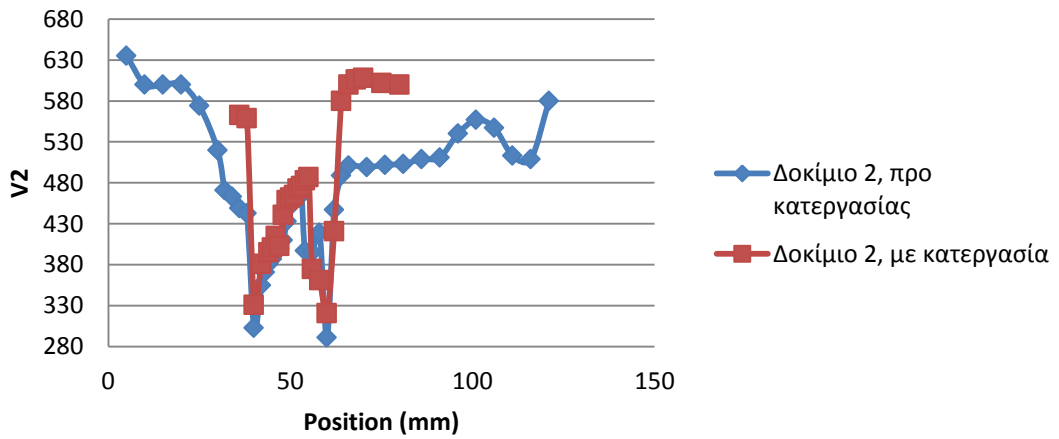
Δοκίμιο #2, 20A no filler

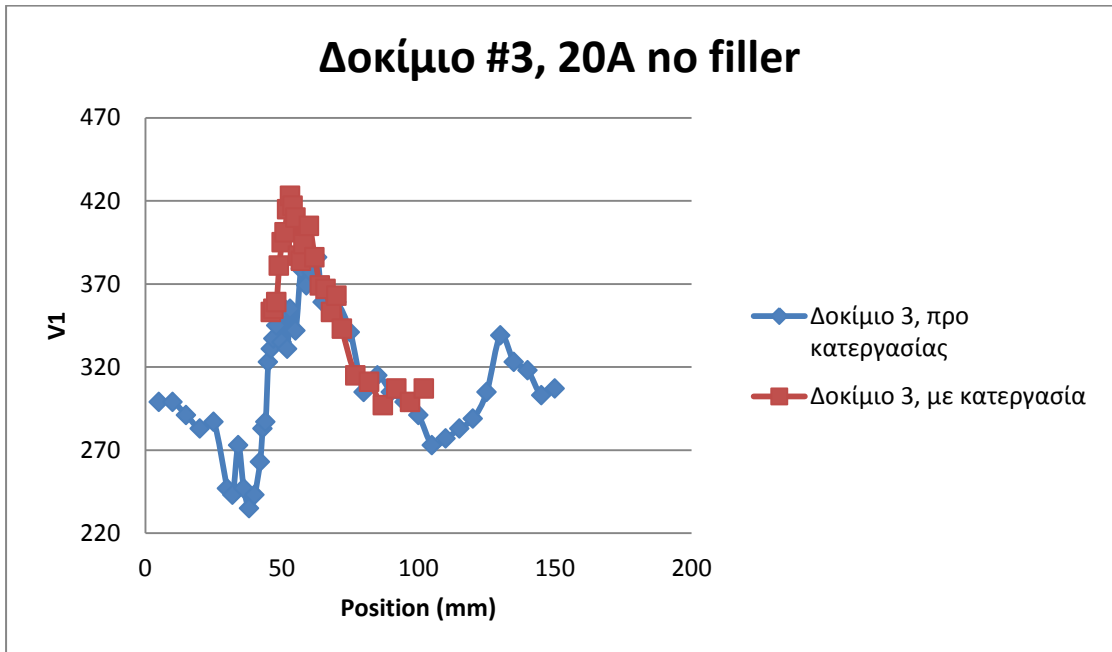
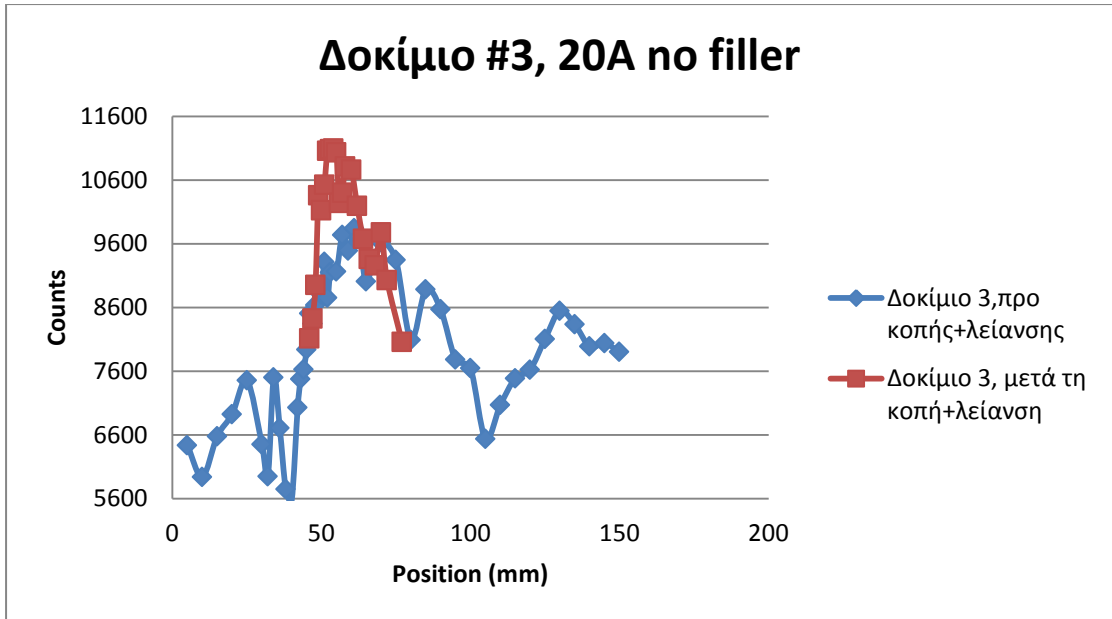


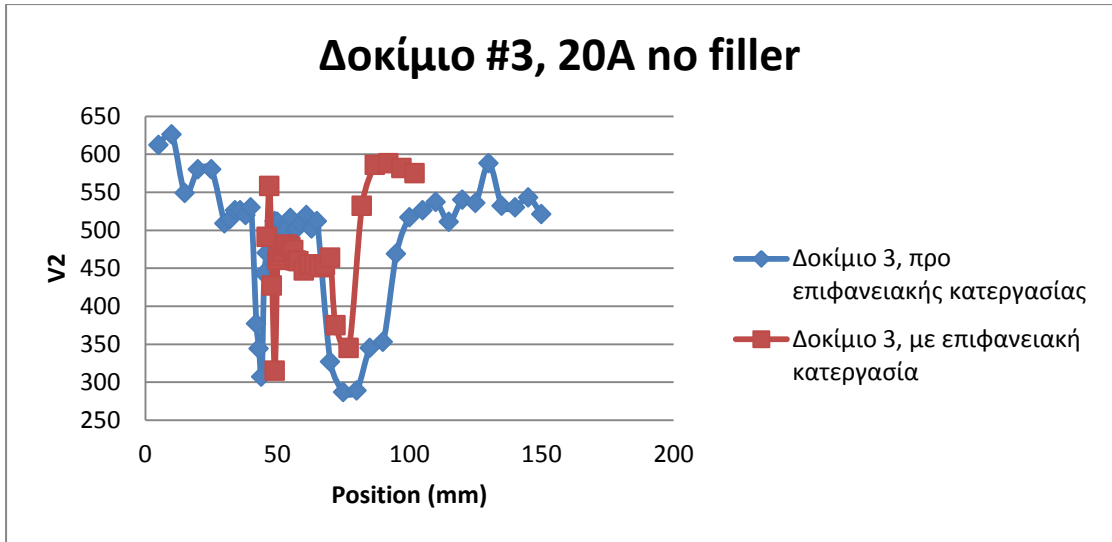
Δοκίμιο #2, 20A no filler



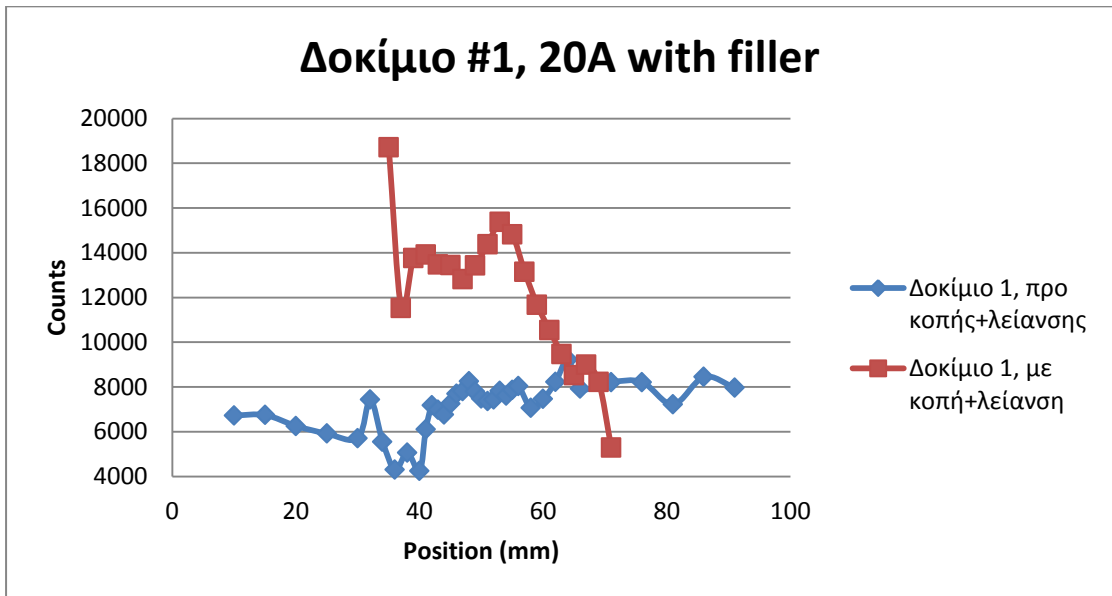
Δοκίμιο #2, 20A no filler

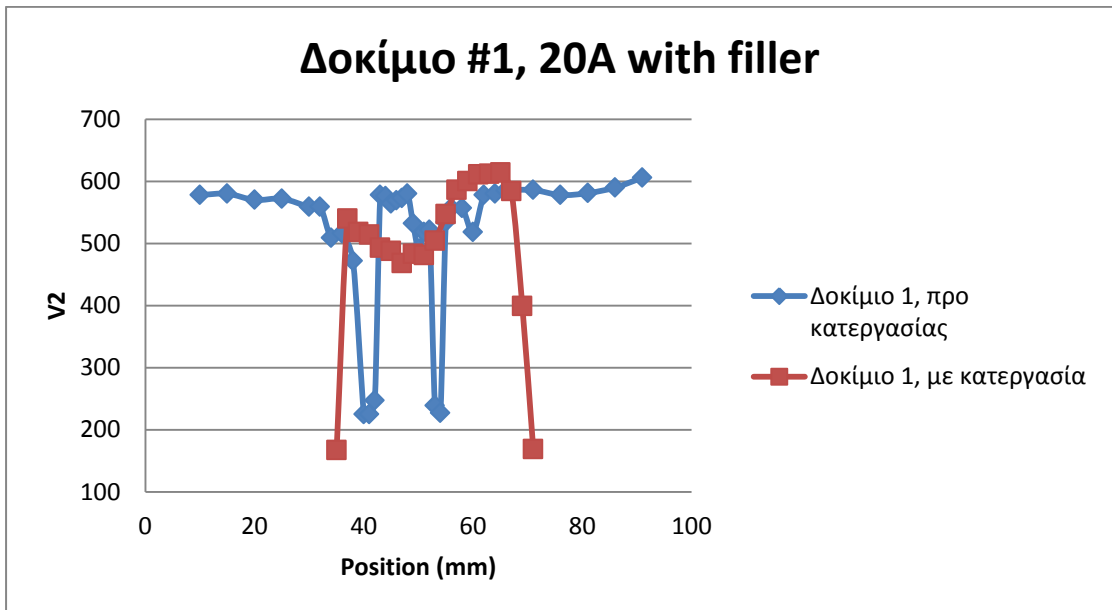
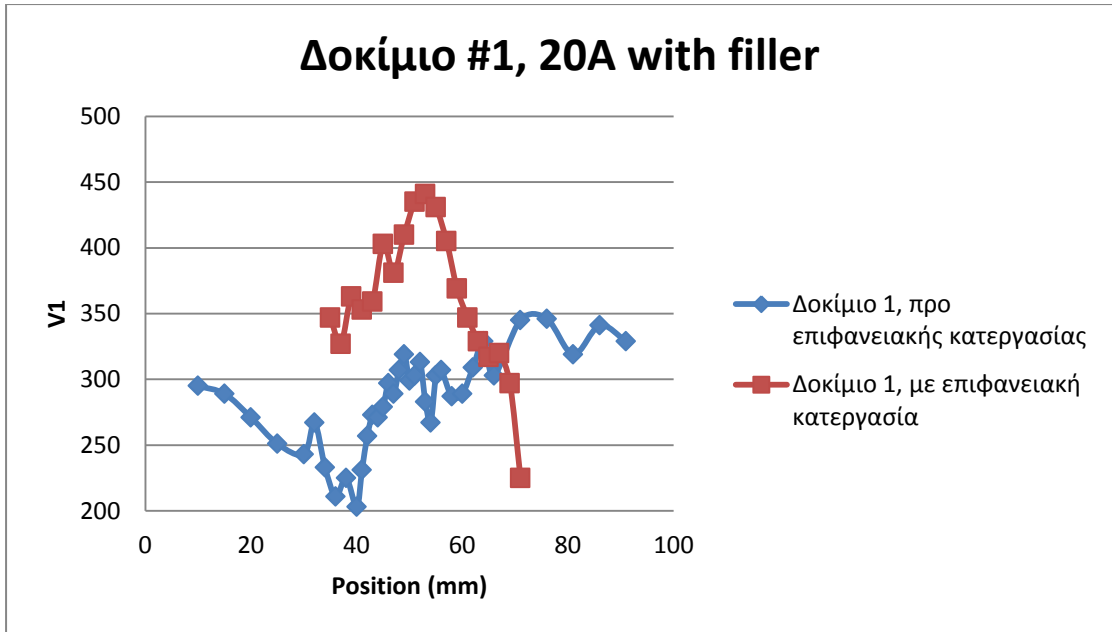


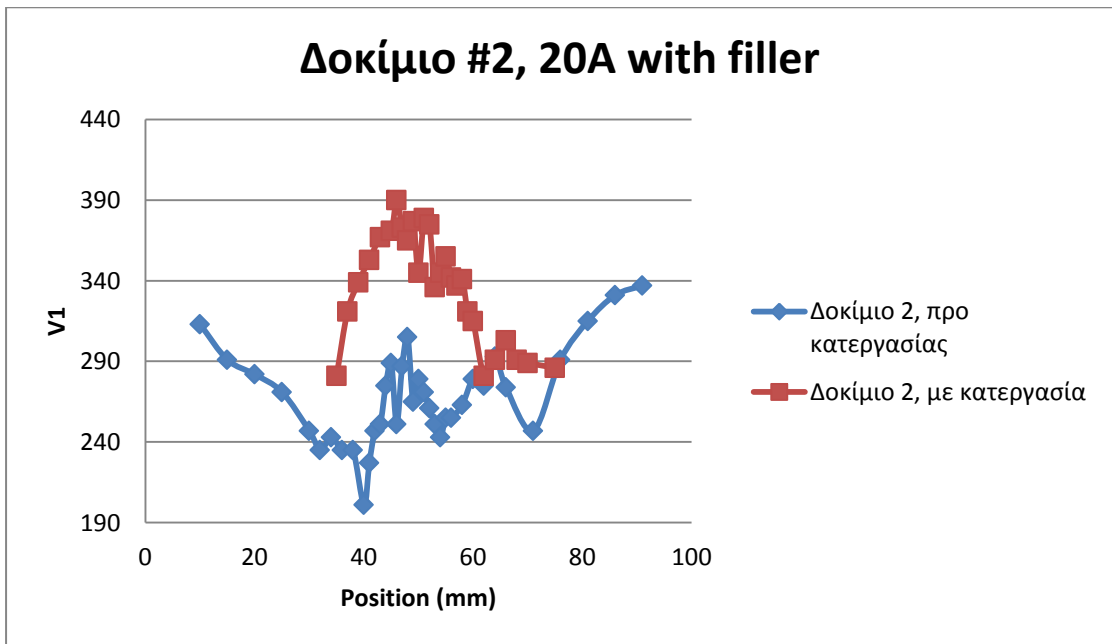
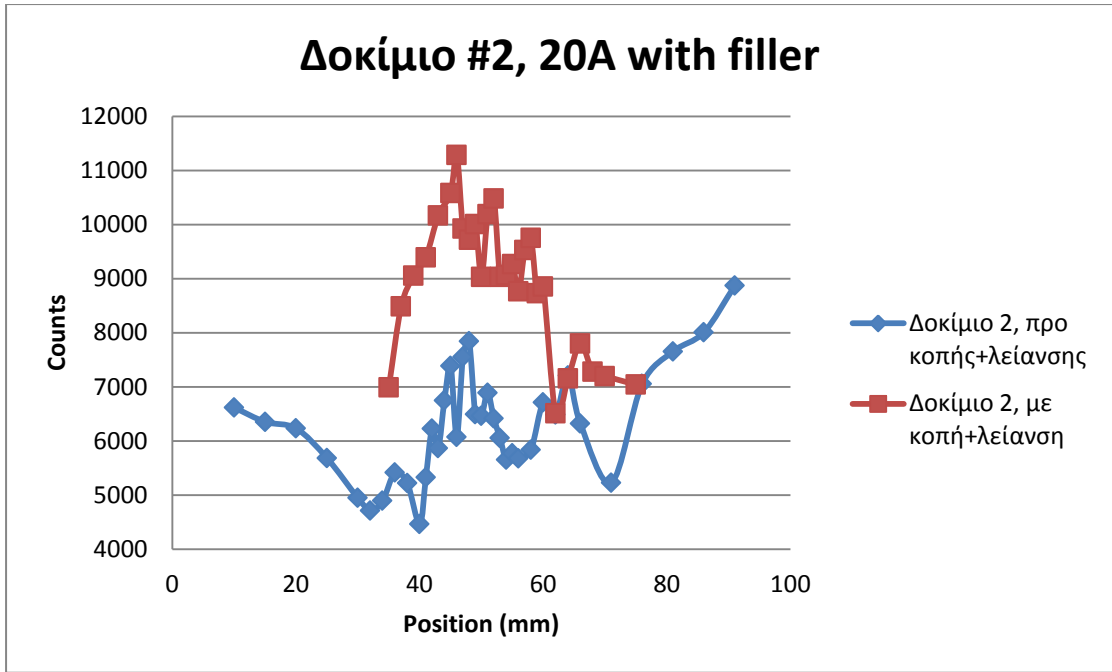




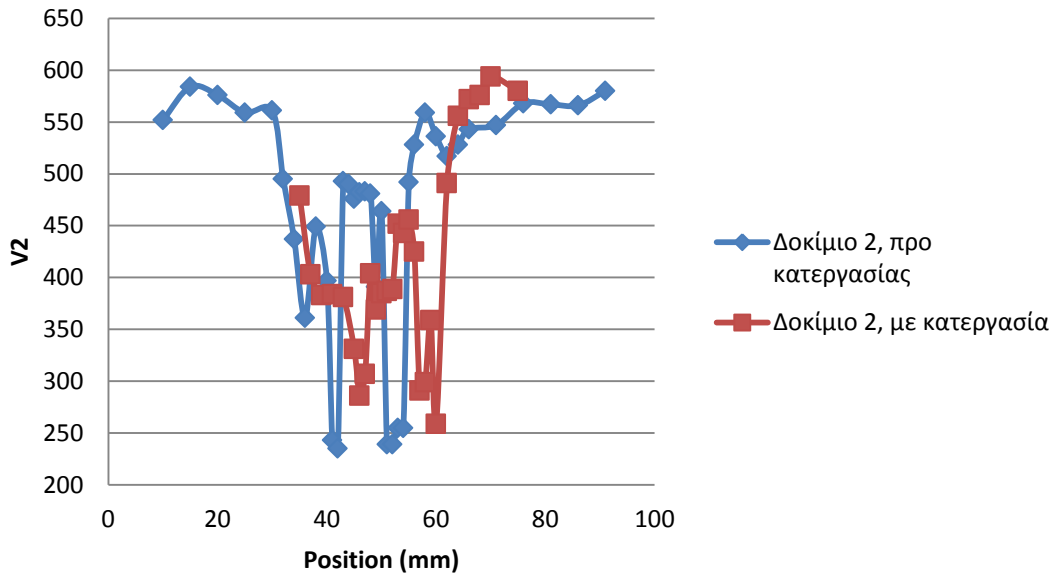
Δοκίμιο 20AF: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 20A, με χρήση μετάλλου προσθήκης:



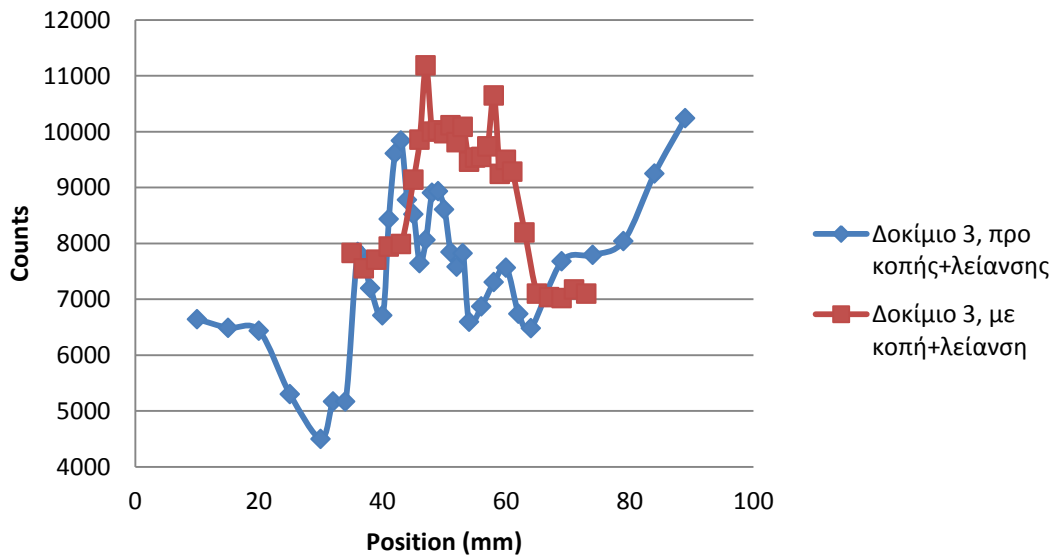


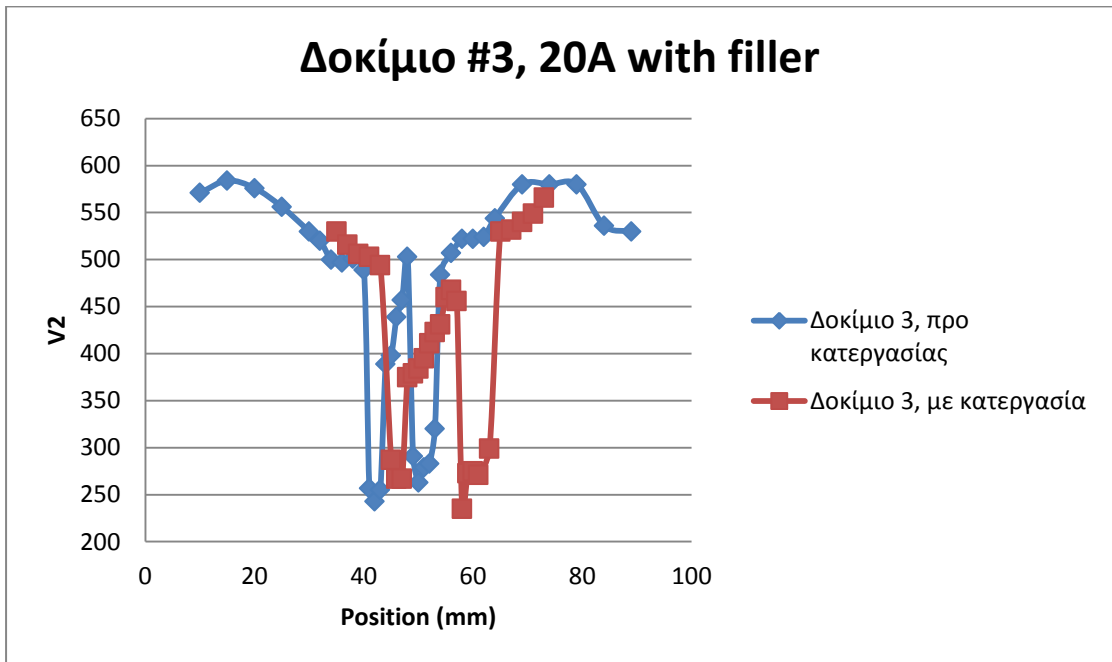
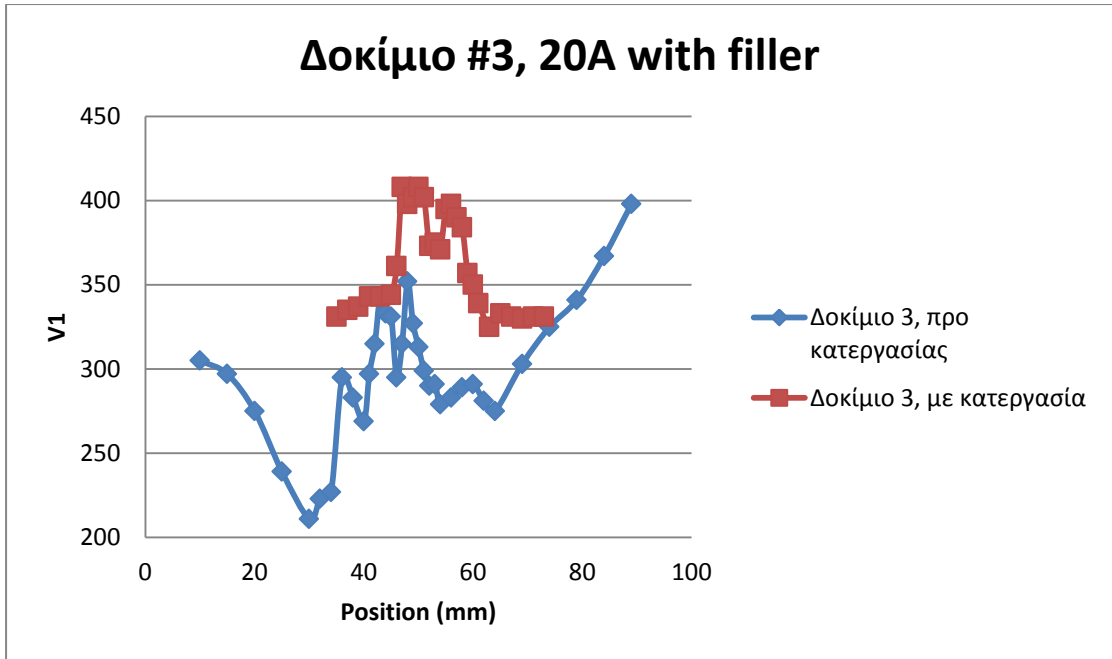


Δοκίμο #2, 20A with filler

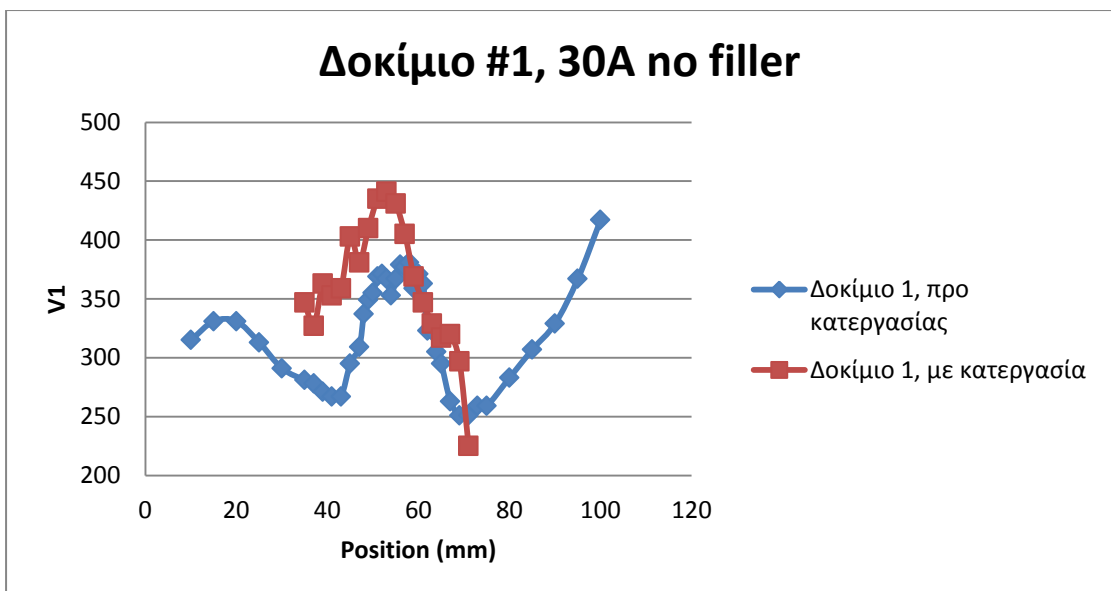
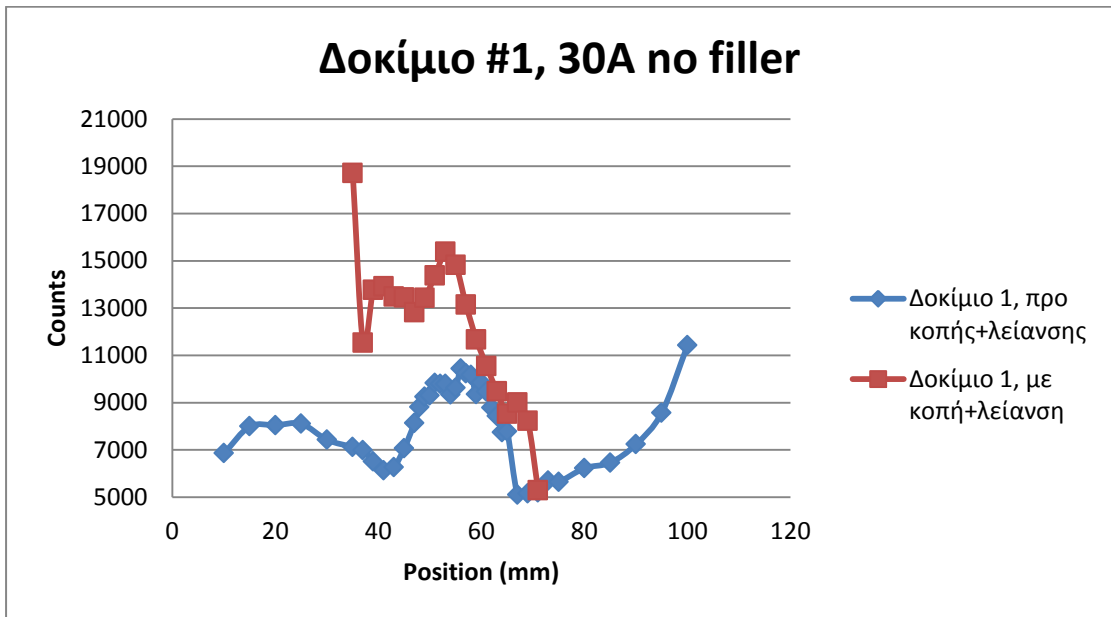


Δοκίμο #3, 20A with filler

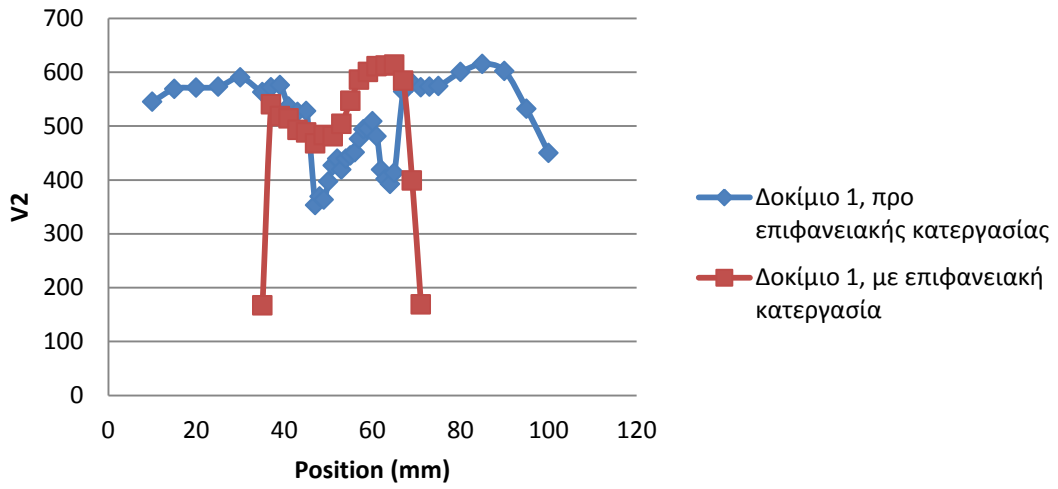




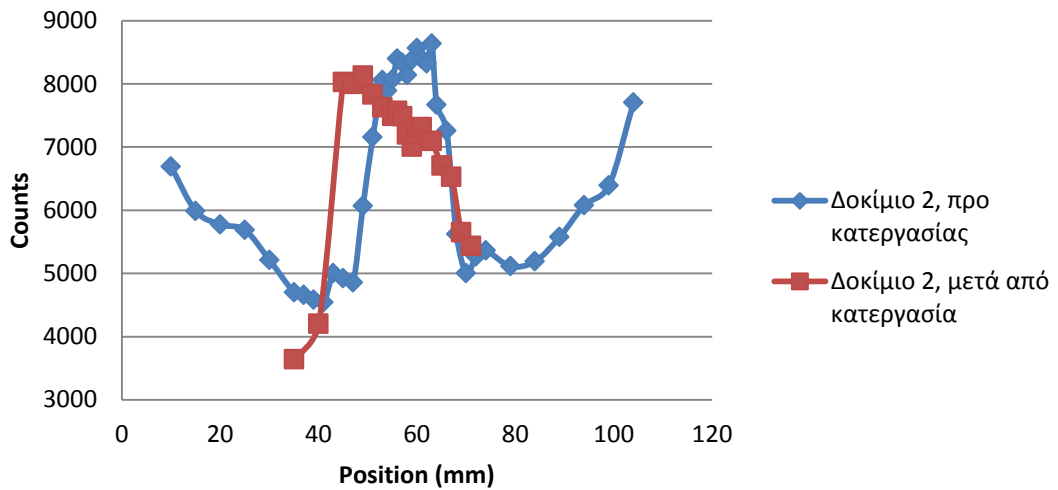
Δοκίμια 30A: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 30A, χωρίς μέταλλο προσθήκης:



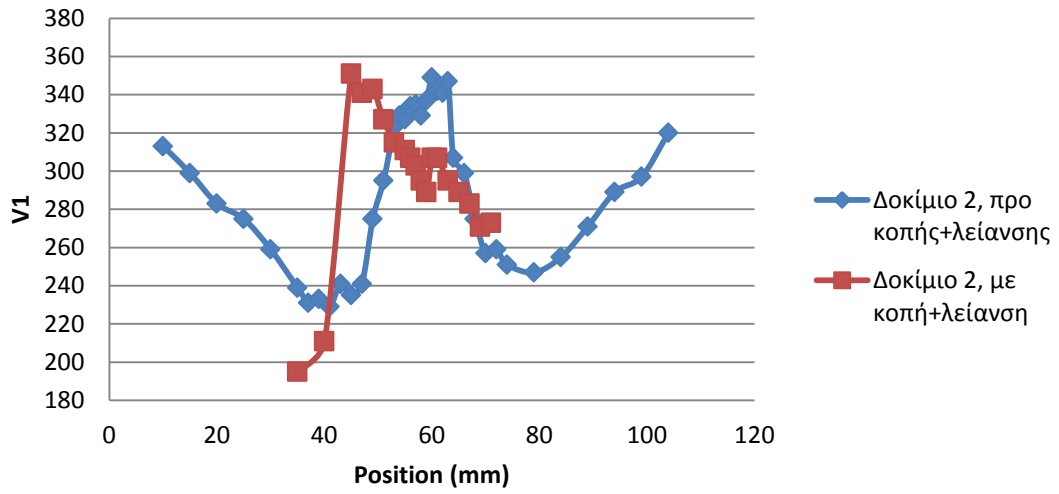
Δοκίμιο #1, 30A no filler



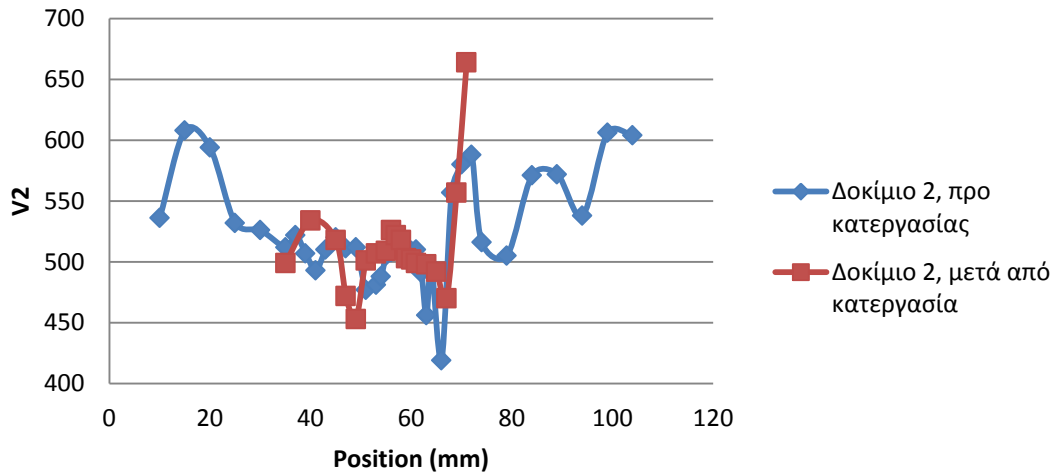
Δοκίμιο #2, 30A no filler



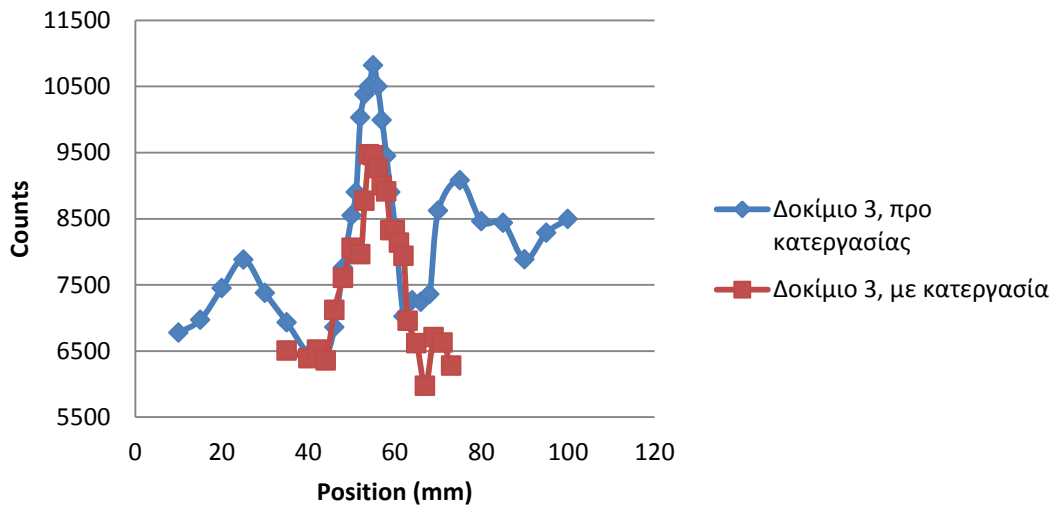
Δοκίμιο #2, 30A no filler



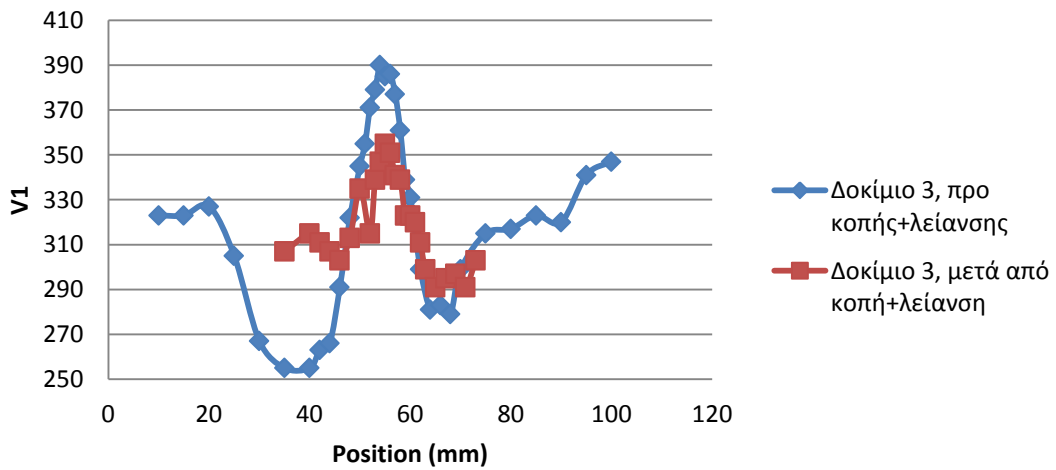
Δοκίμιο #2, 30A no filler

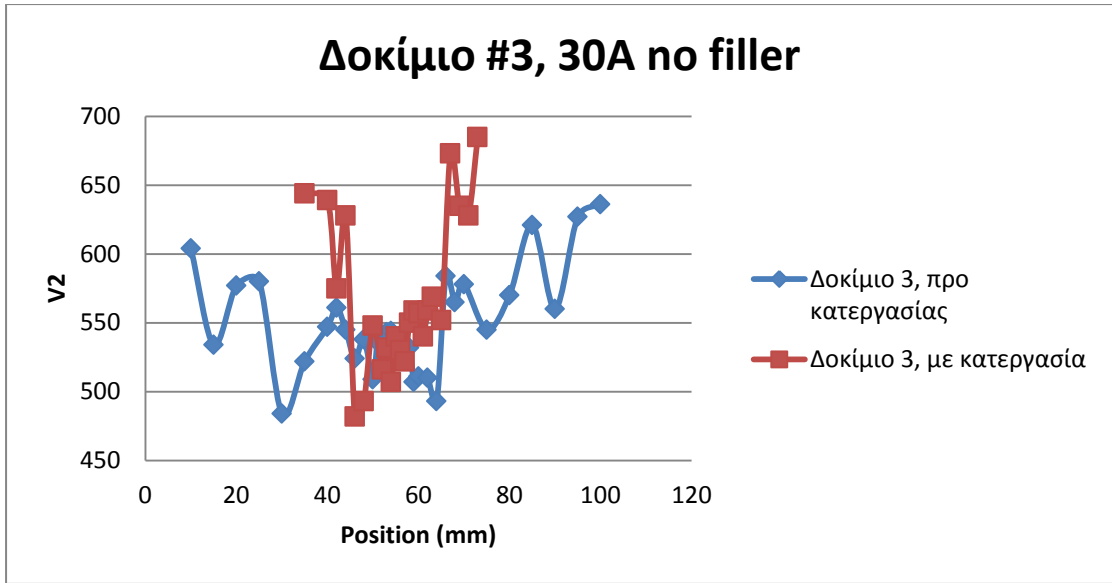


Δοκίμιο #3, 30A no filler

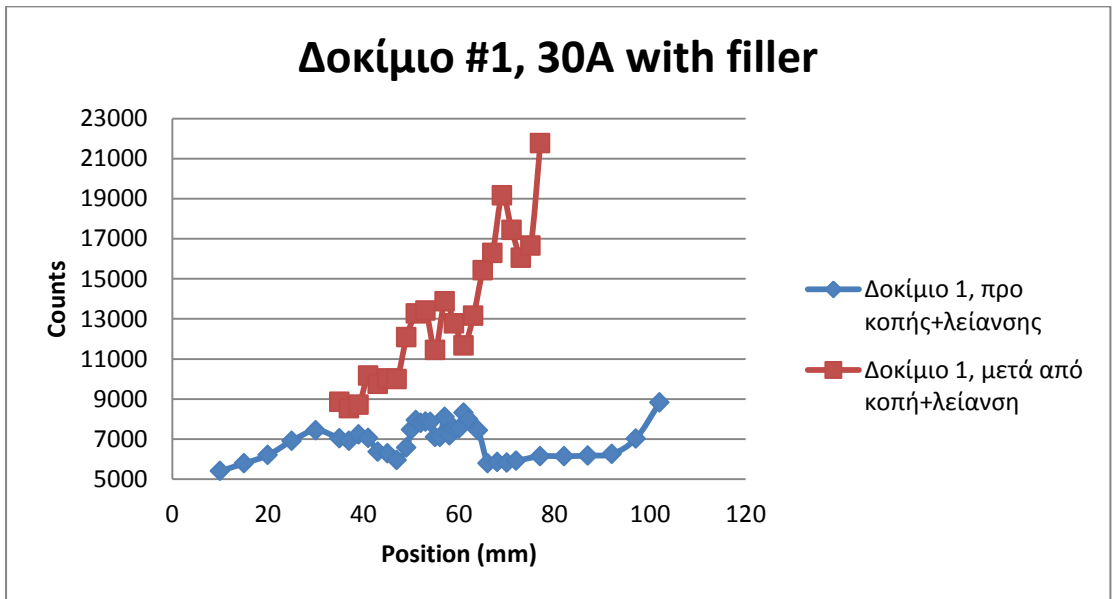


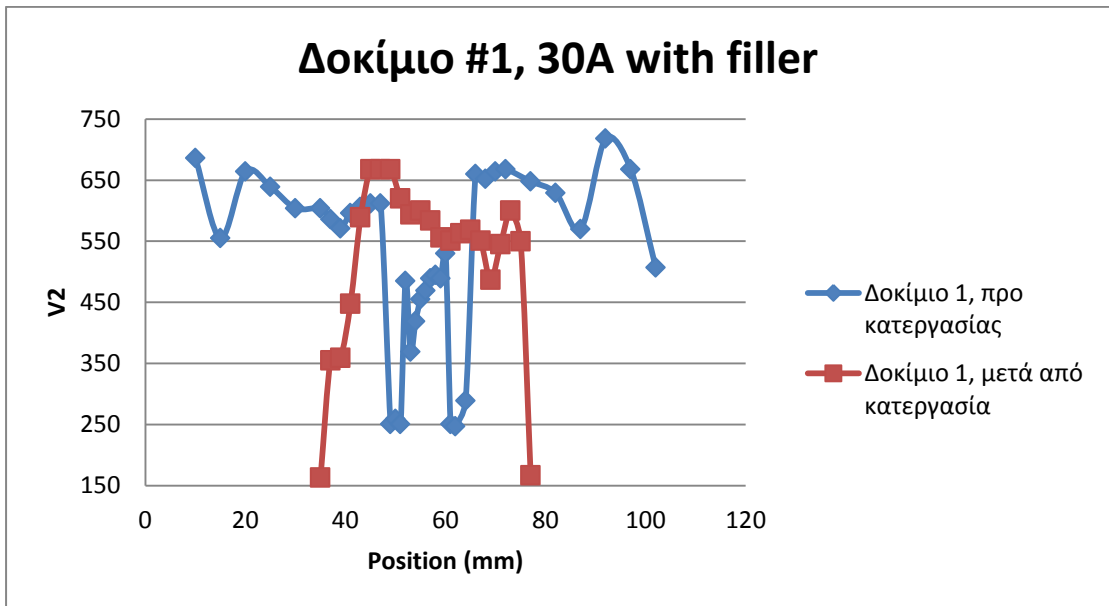
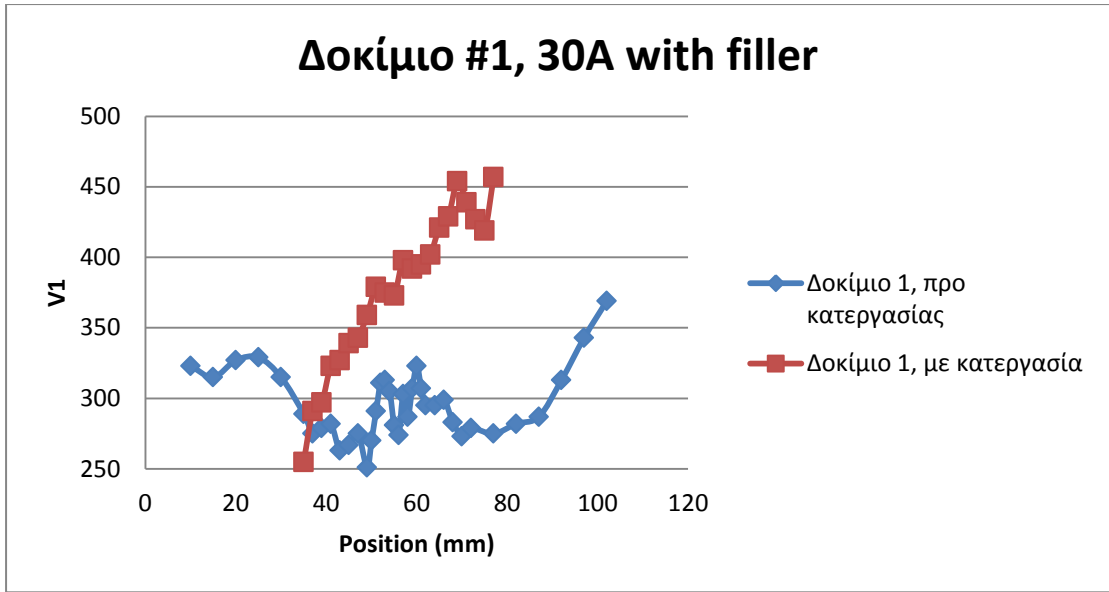
Δοκίμιο #3, 30A no filler

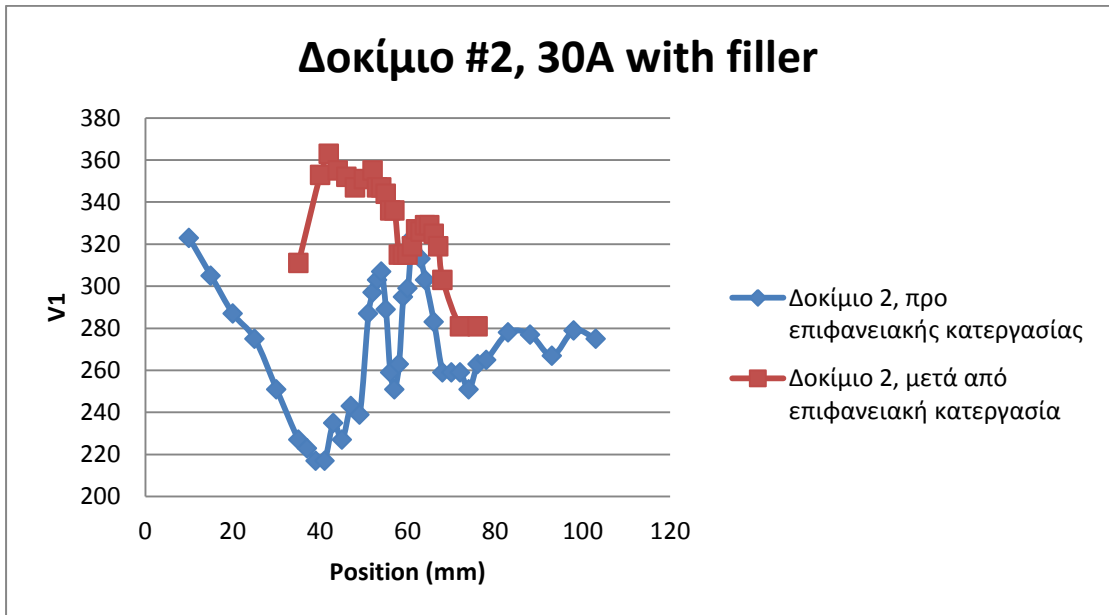
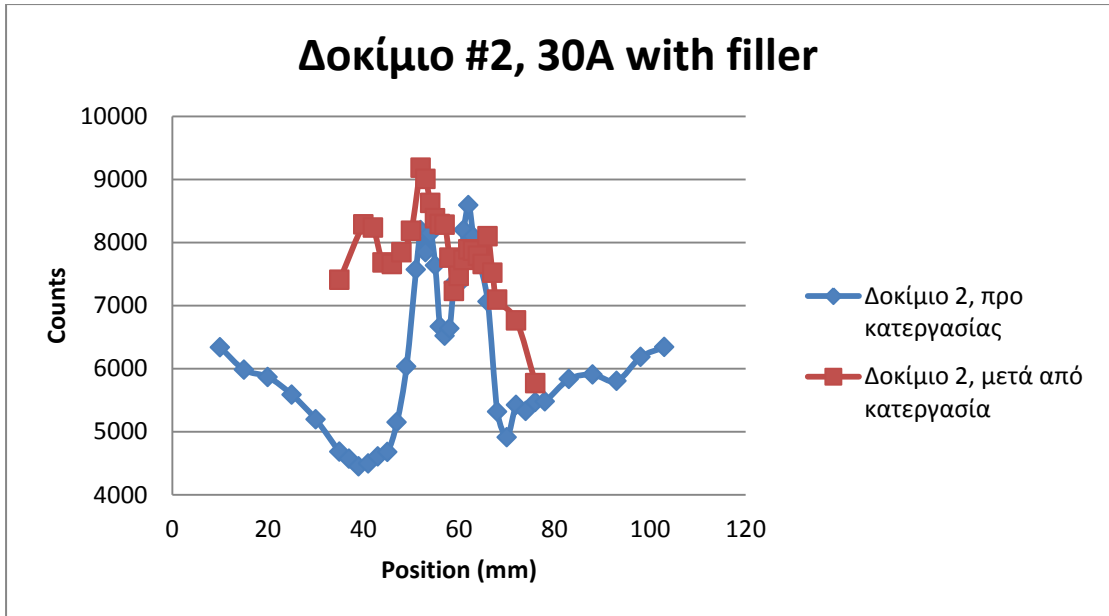


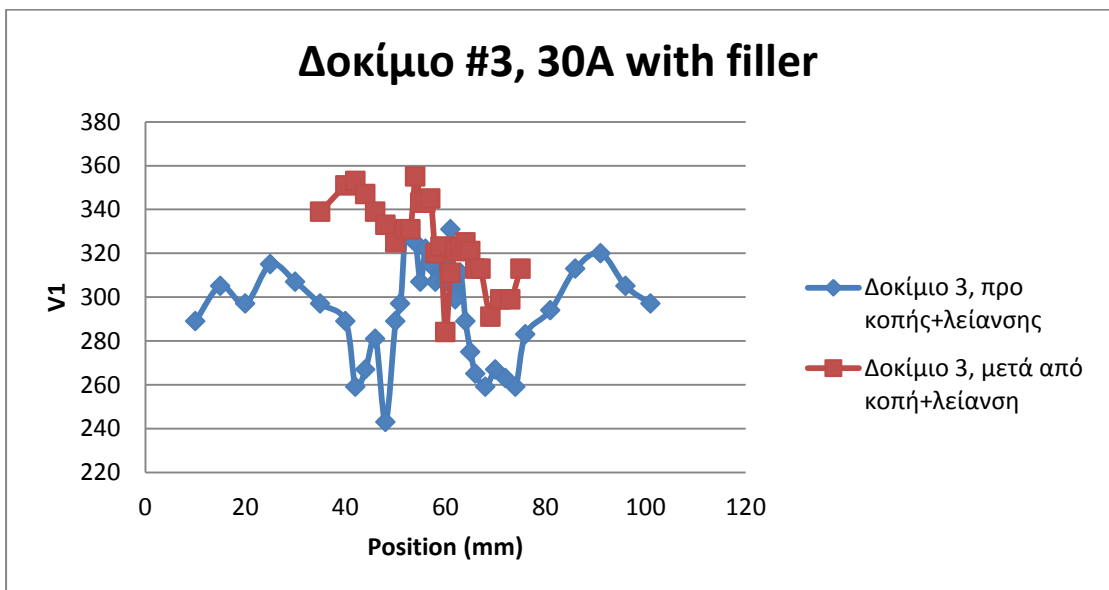
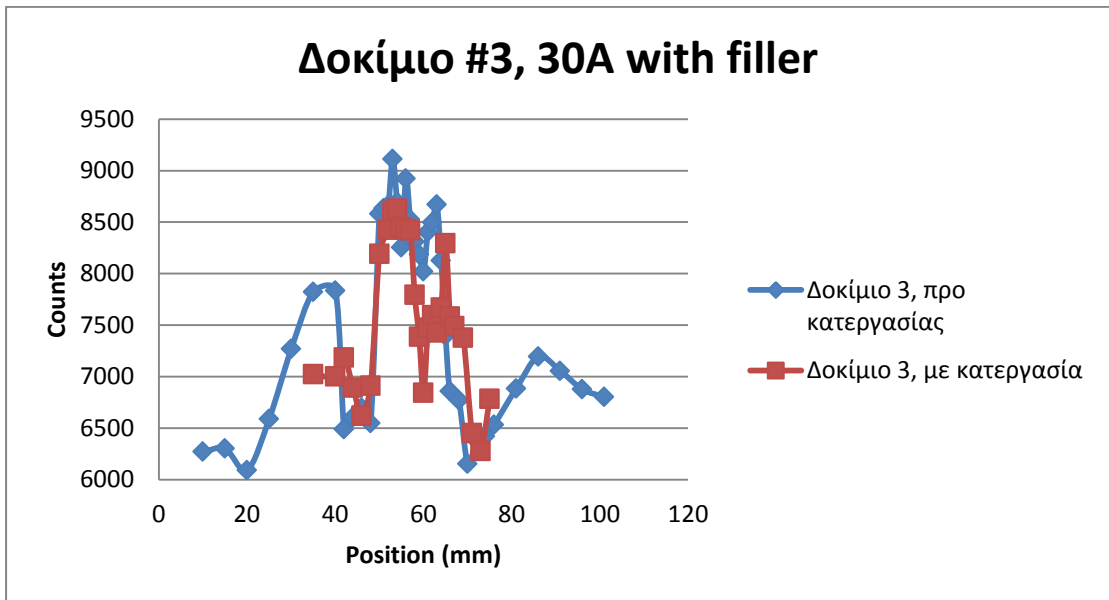
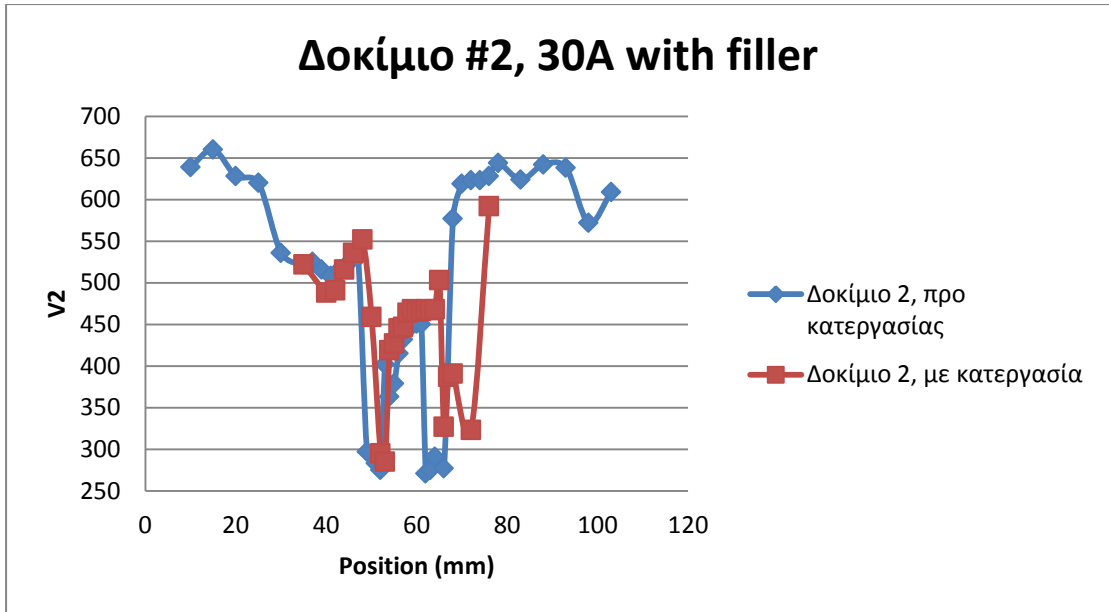


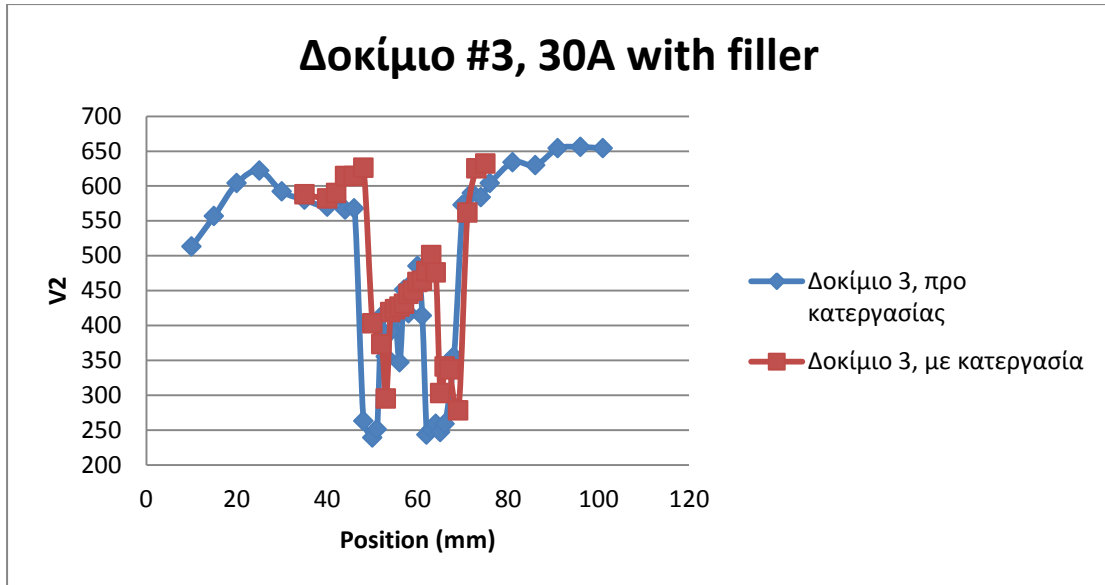
Δοκίμια 30AF: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 30A, με χρήση μετάλλου προσθήκης:



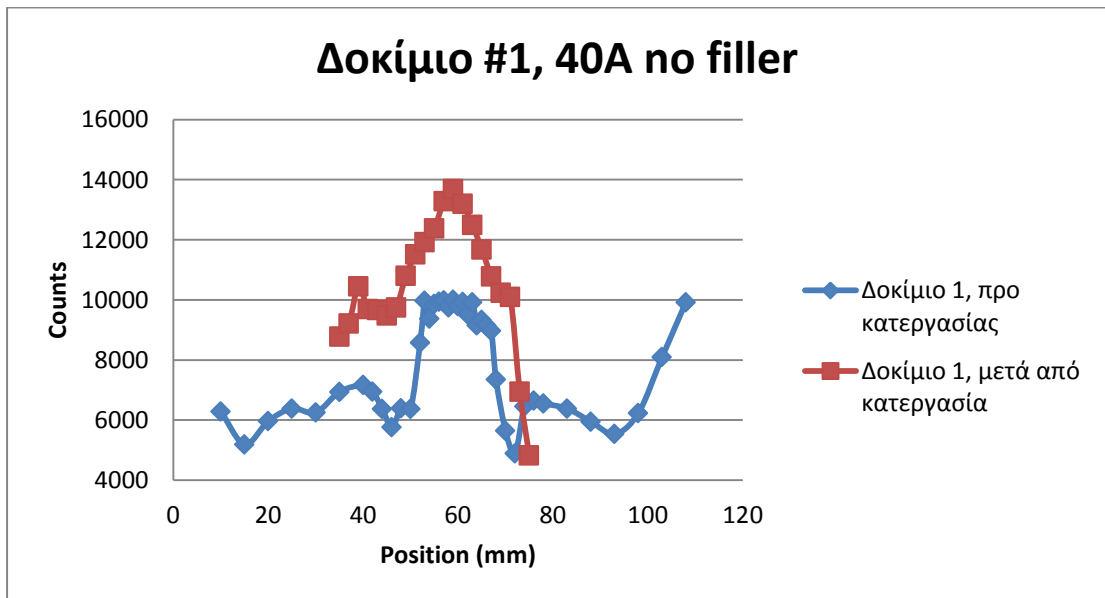




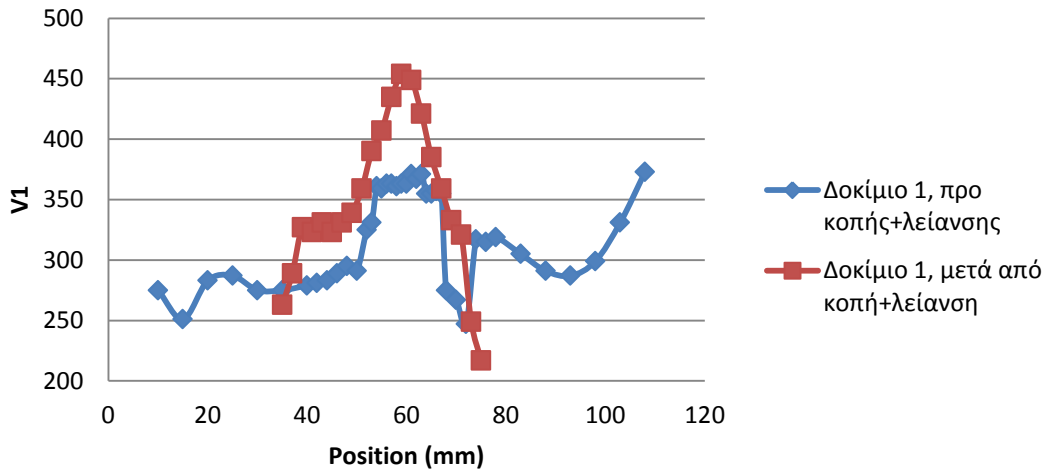




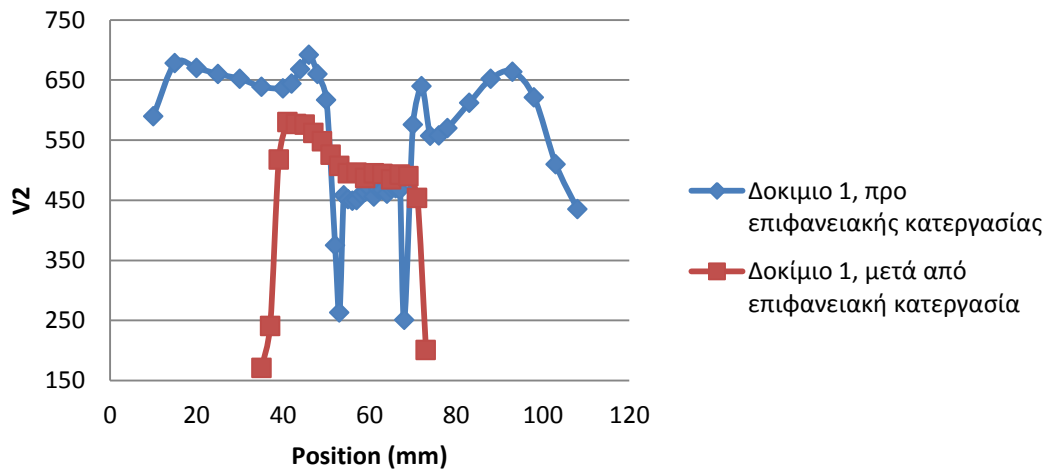
Δοκίμια 40A: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 40A, χωρίς μέταλλο προσθήκης:



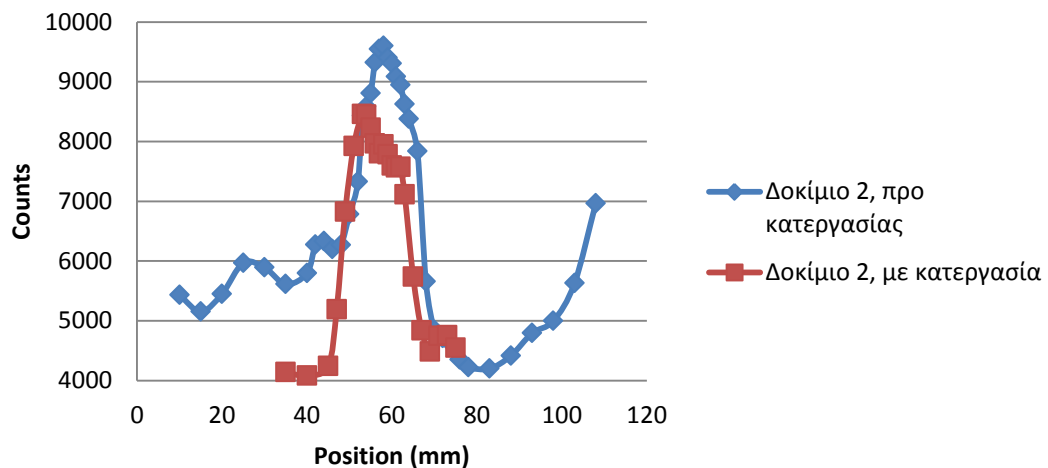
Δοκίμιο #1, 40A no filler



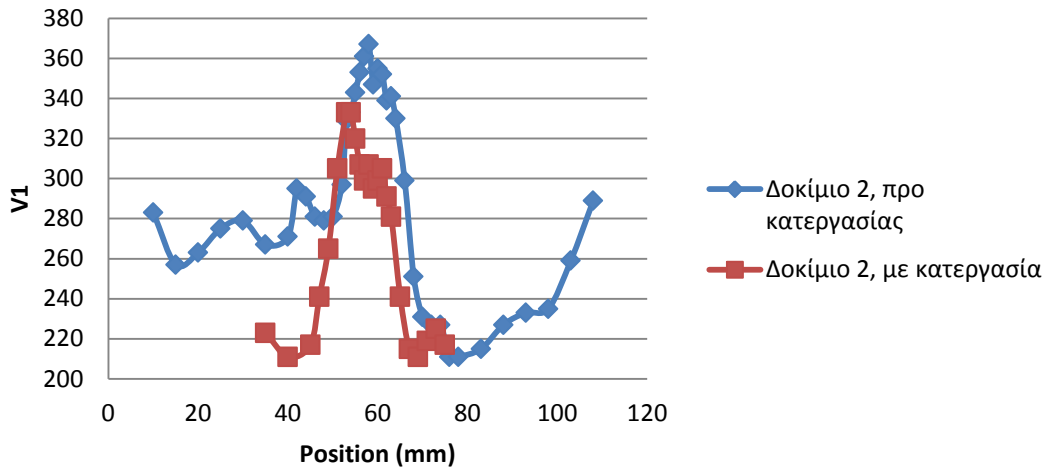
Δοκίμιο #1, 40A no filler



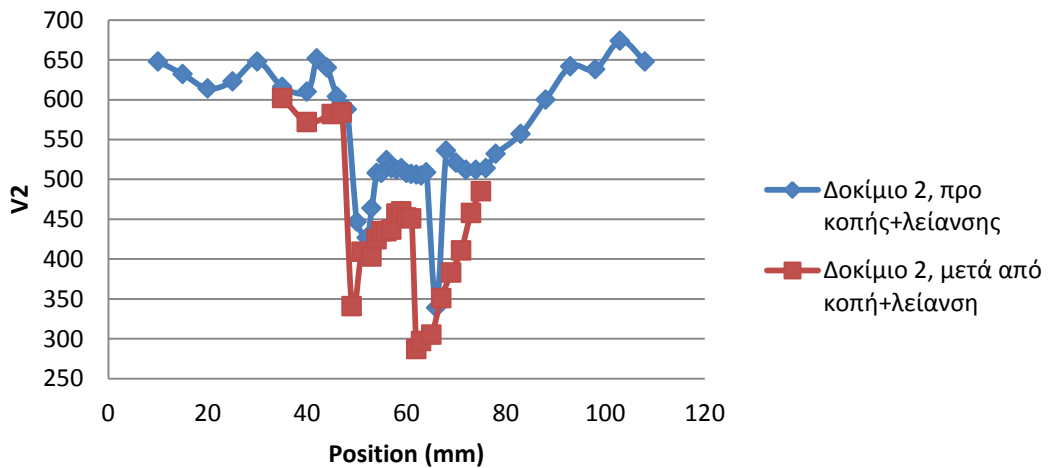
Δοκίμιο #2, 40A no filler



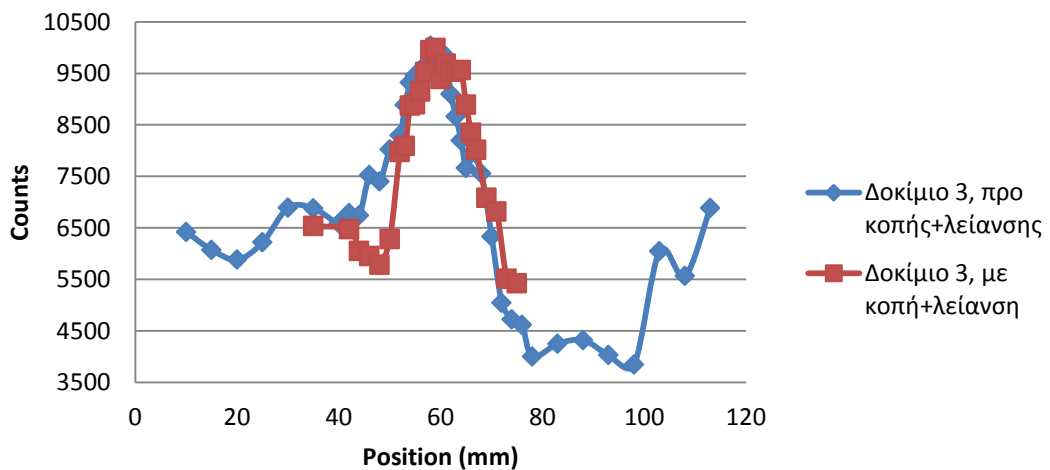
Δοκίμιο #2, 40A no filler



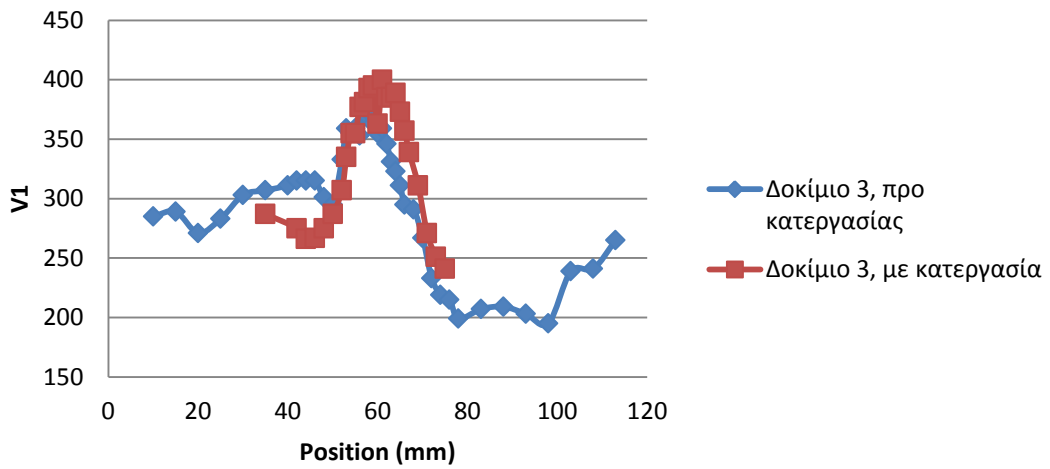
Δοκίμιο #2, 40A no filler



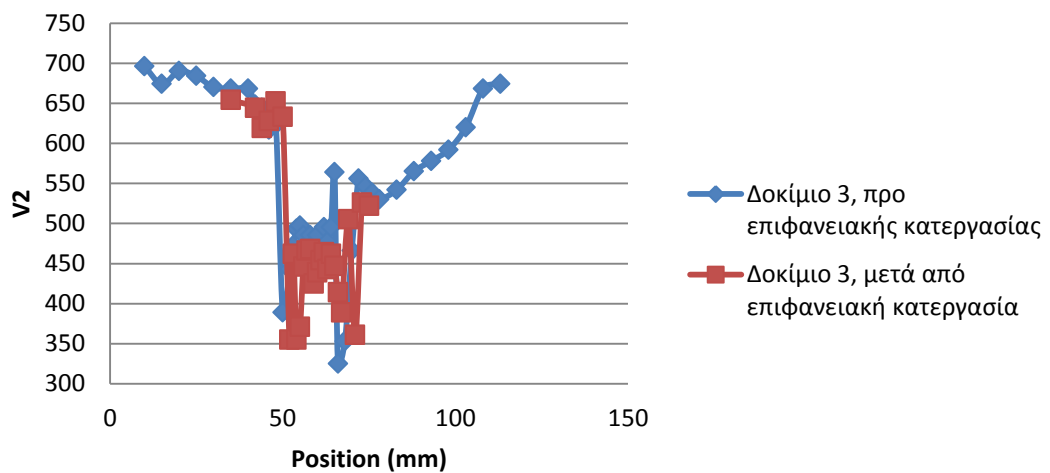
Δοκίμιο #3, 40A no filler



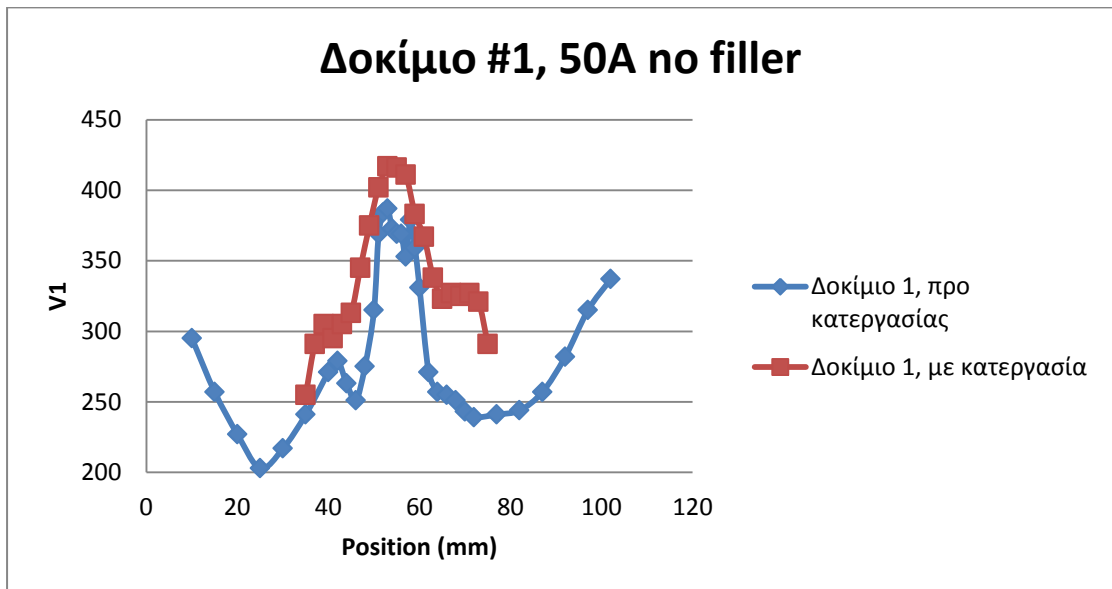
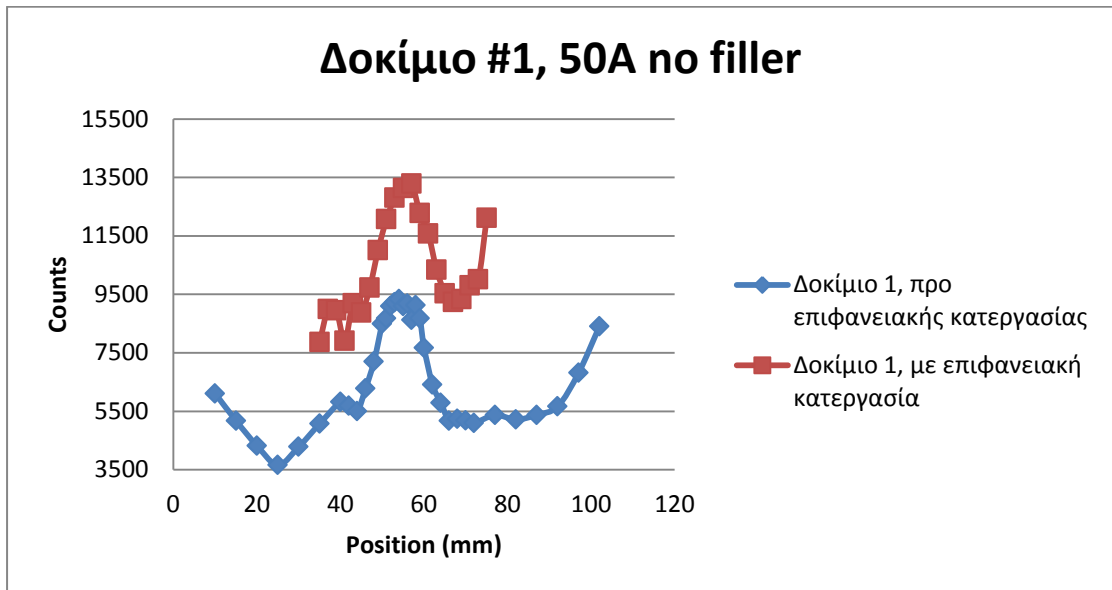
Δοκίμιο #3, 40A no filler

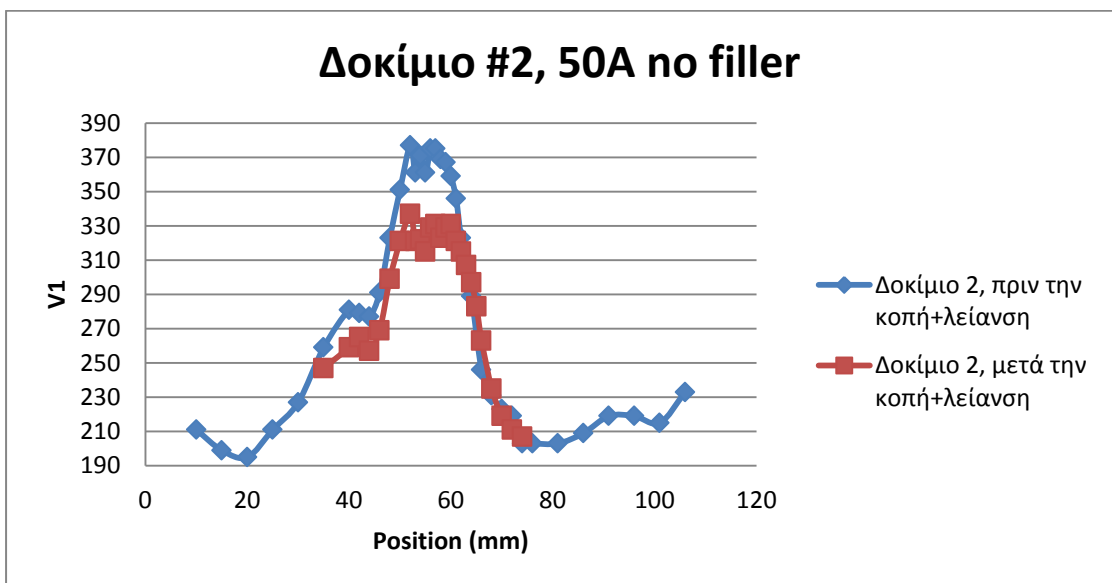
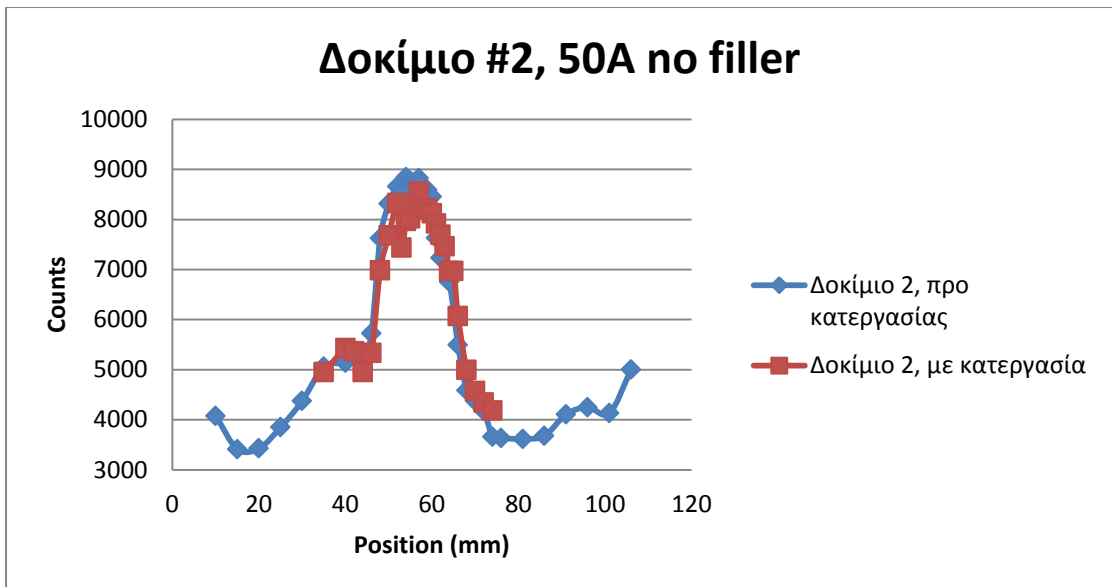
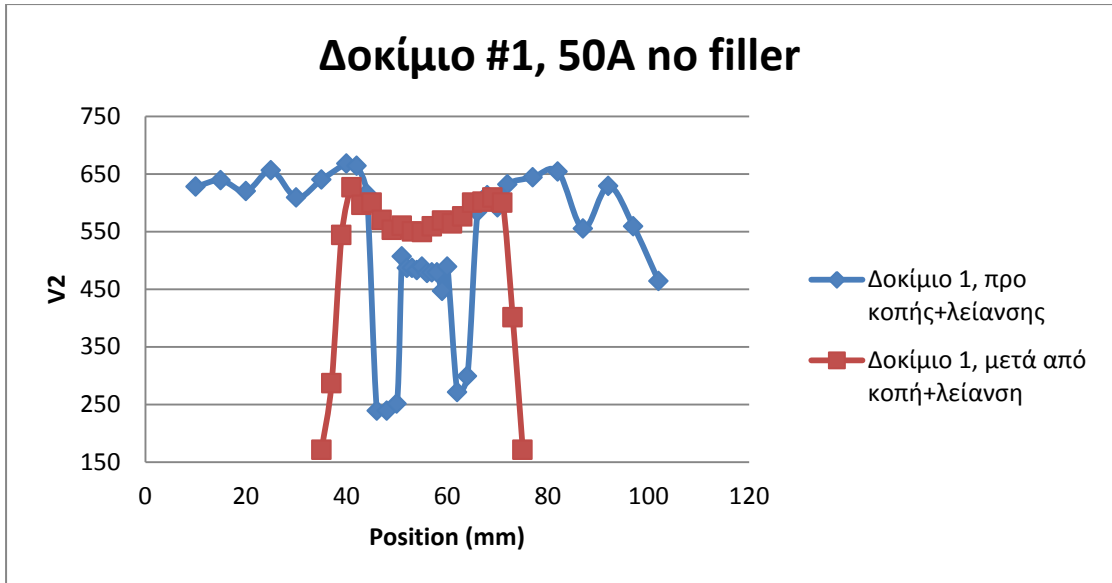


Δοκίμιο #3, 40A no filler

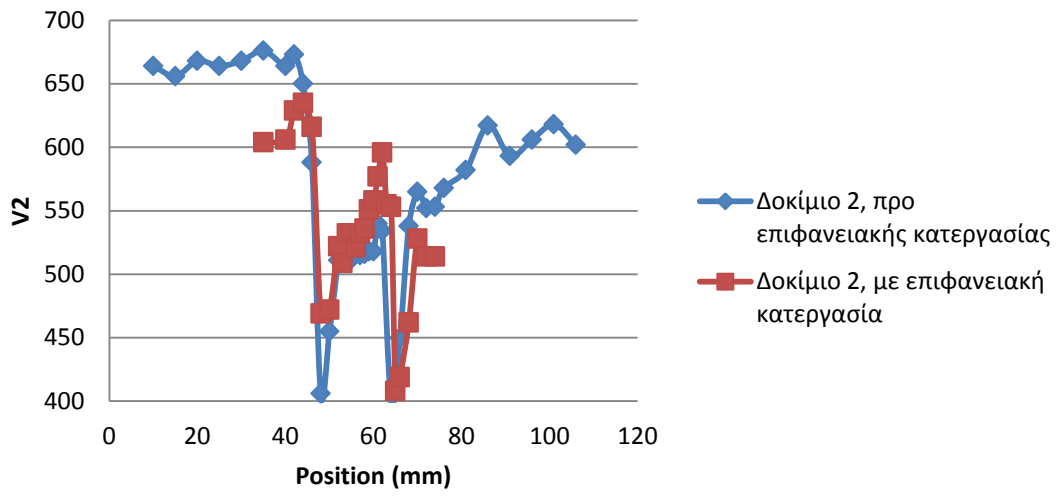


Δοκίμια 50A: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 50A χωρίς μέταλλο προσθήκης:

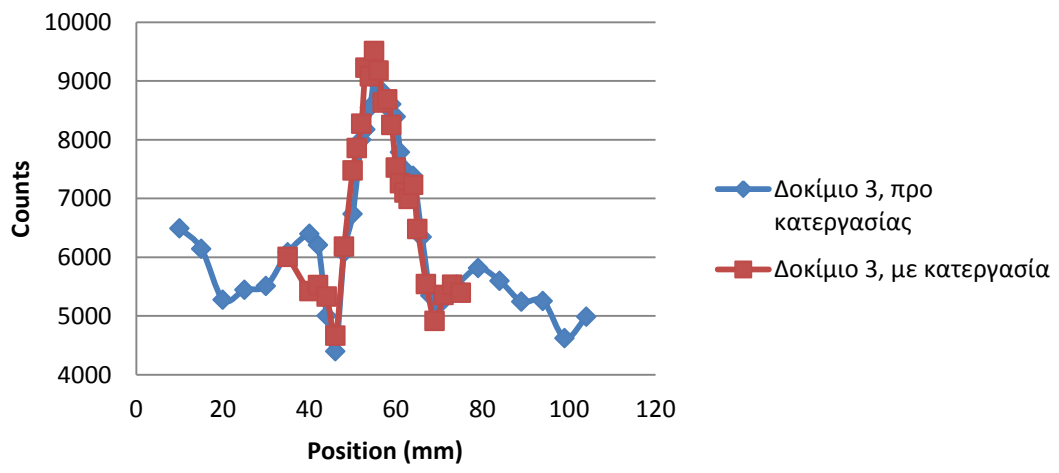




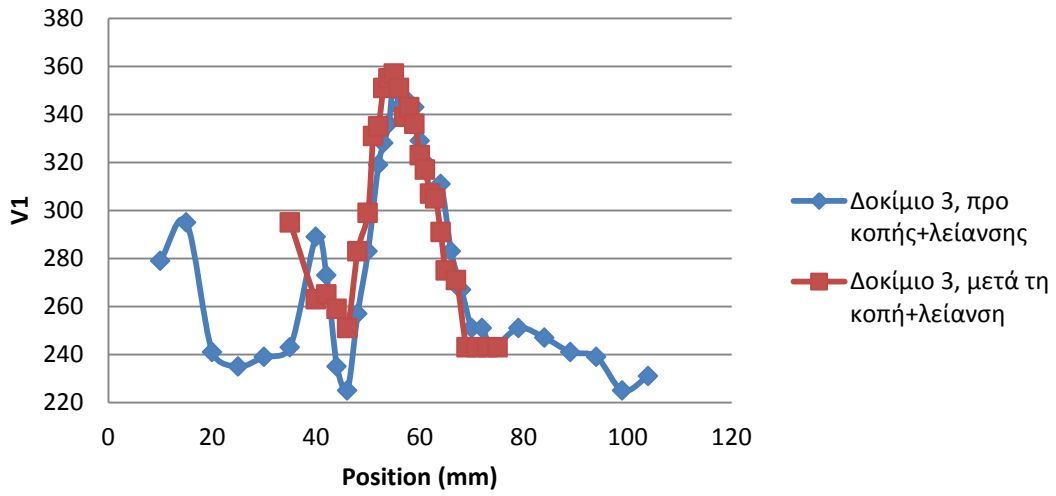
Δοκίμιο #2, 50A no filler



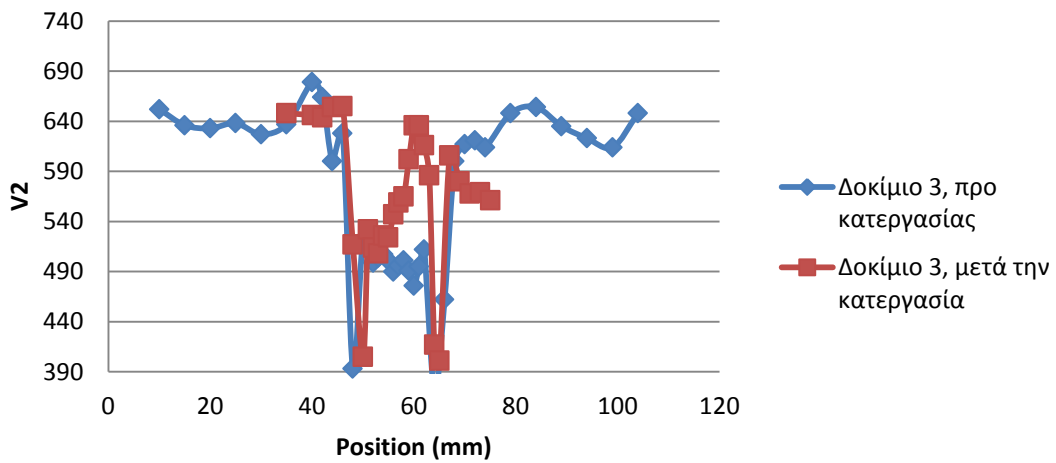
Δοκίμιο #3, 50A no filler



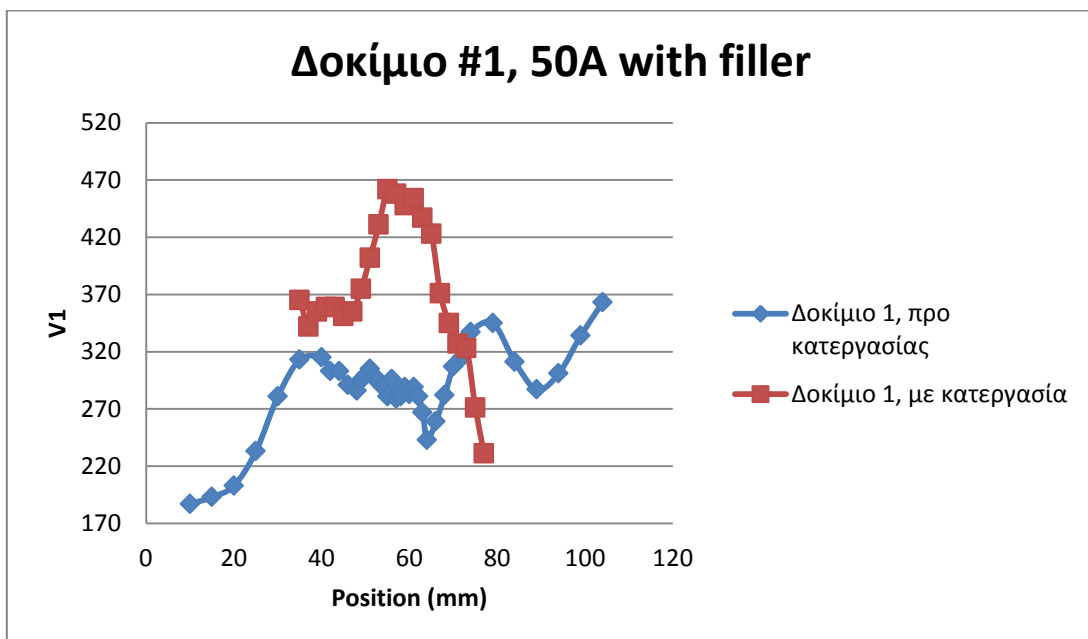
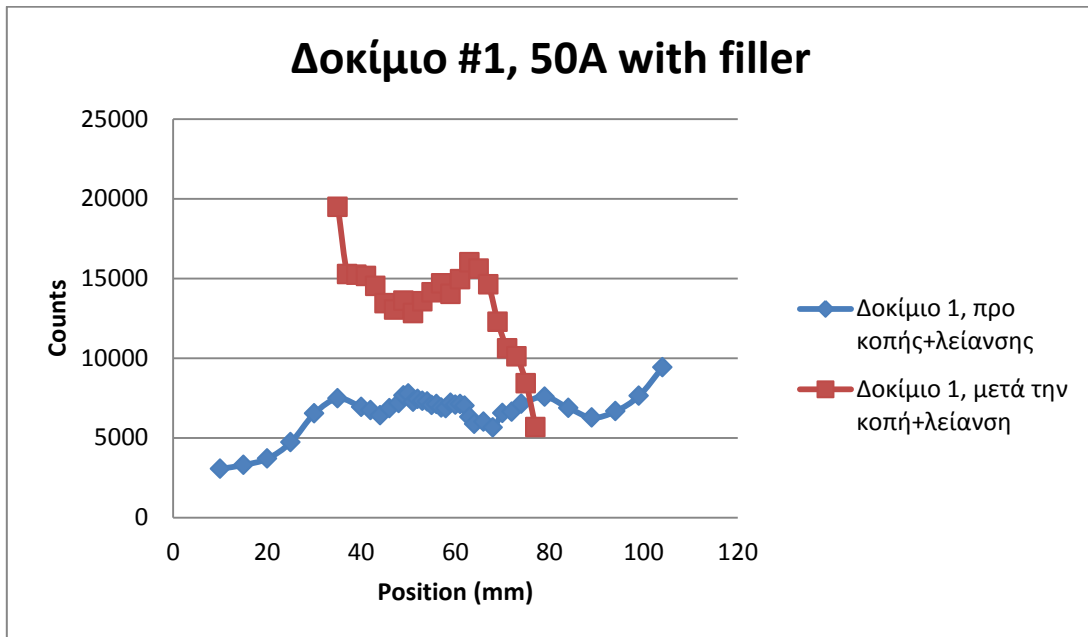
Δοκίμιο #3, 50A no filler



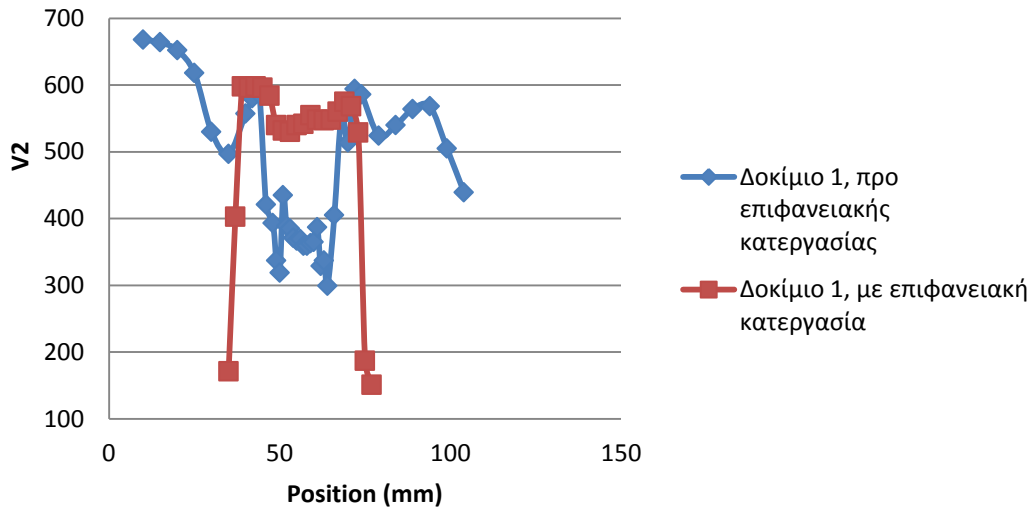
Δοκίμιο #3, 50A no filler



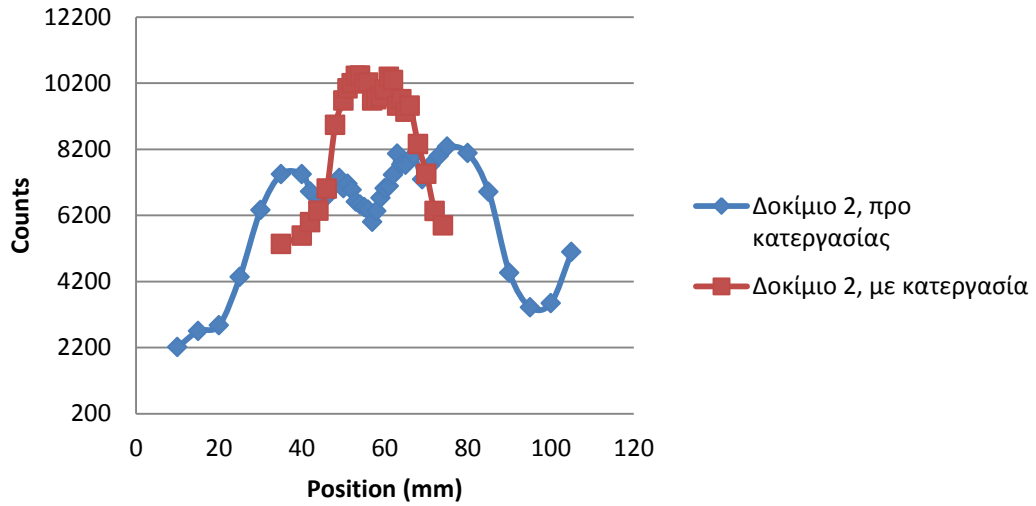
Δοκίμια 50AF: Συγκολλημένα με ένταση ρεύματος 50A, με μέταλλο προσθήκης:

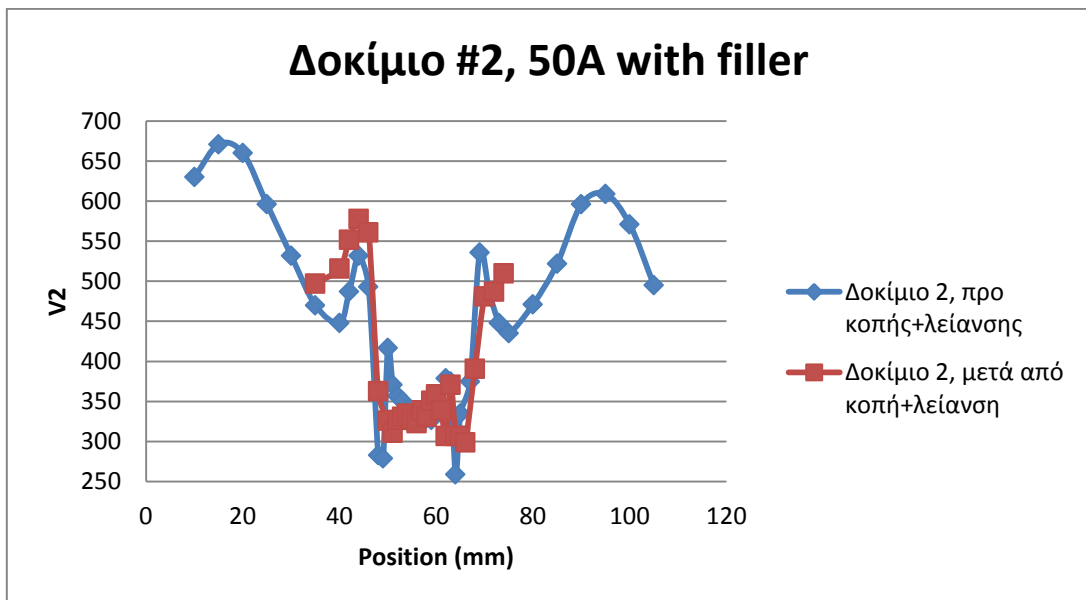
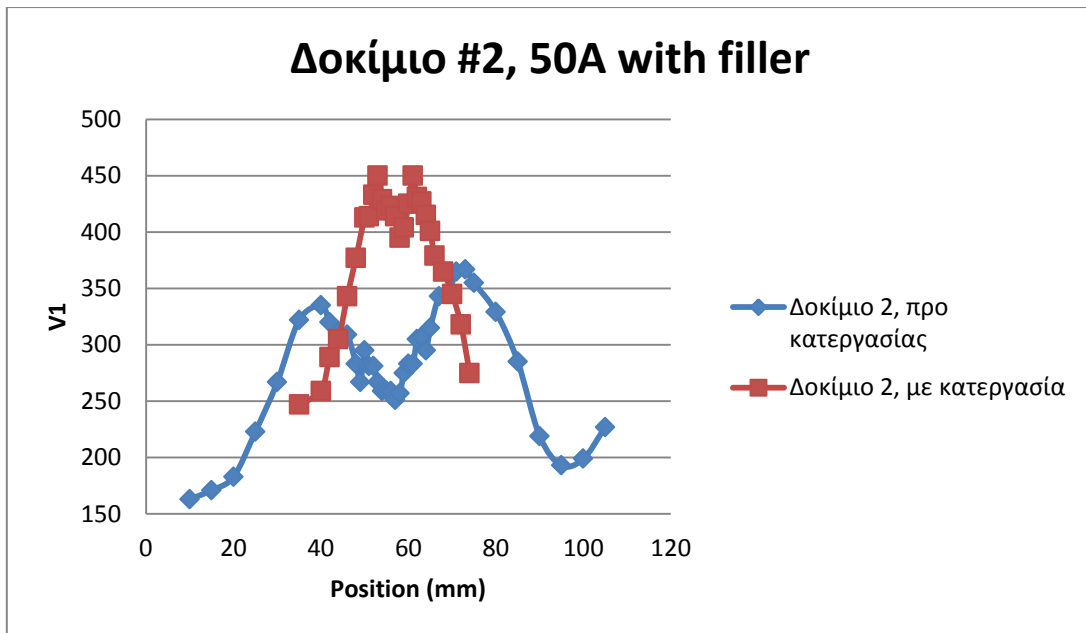


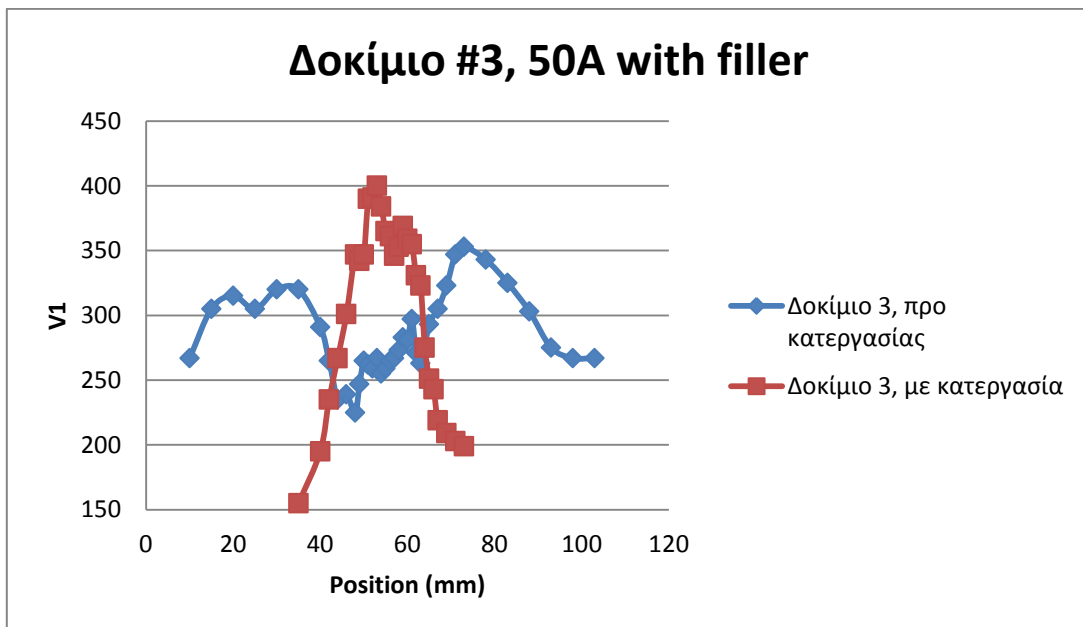
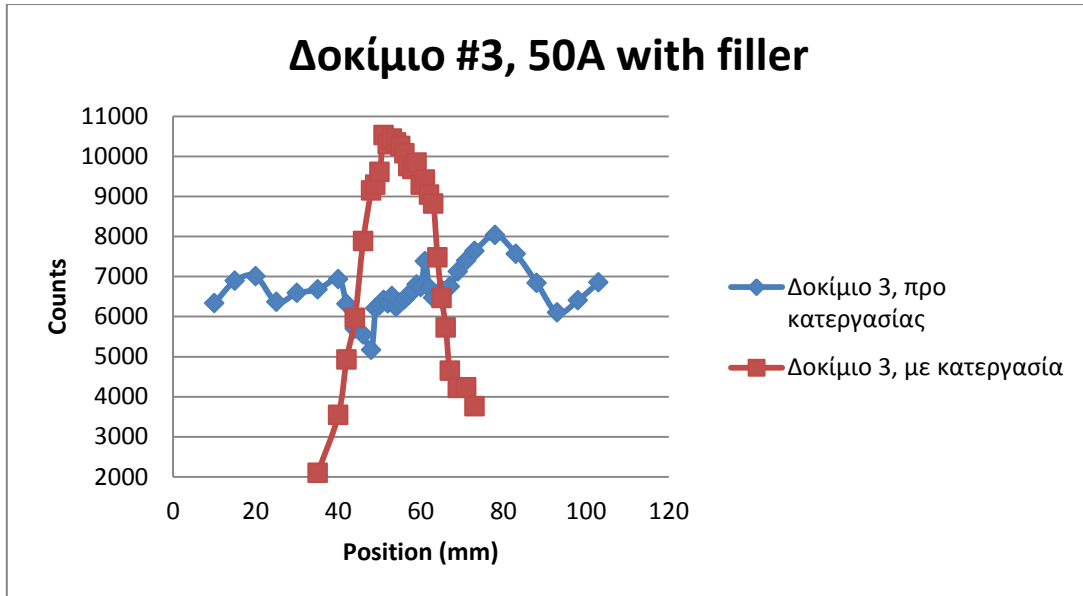
Δοκίμιο #1, 50A with filler



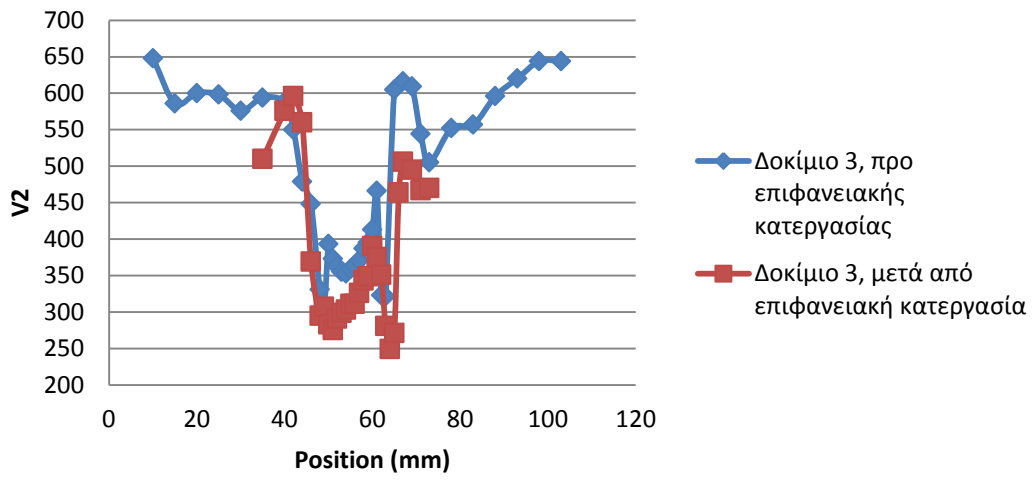
Δοκίμιο #2, 50A with filler



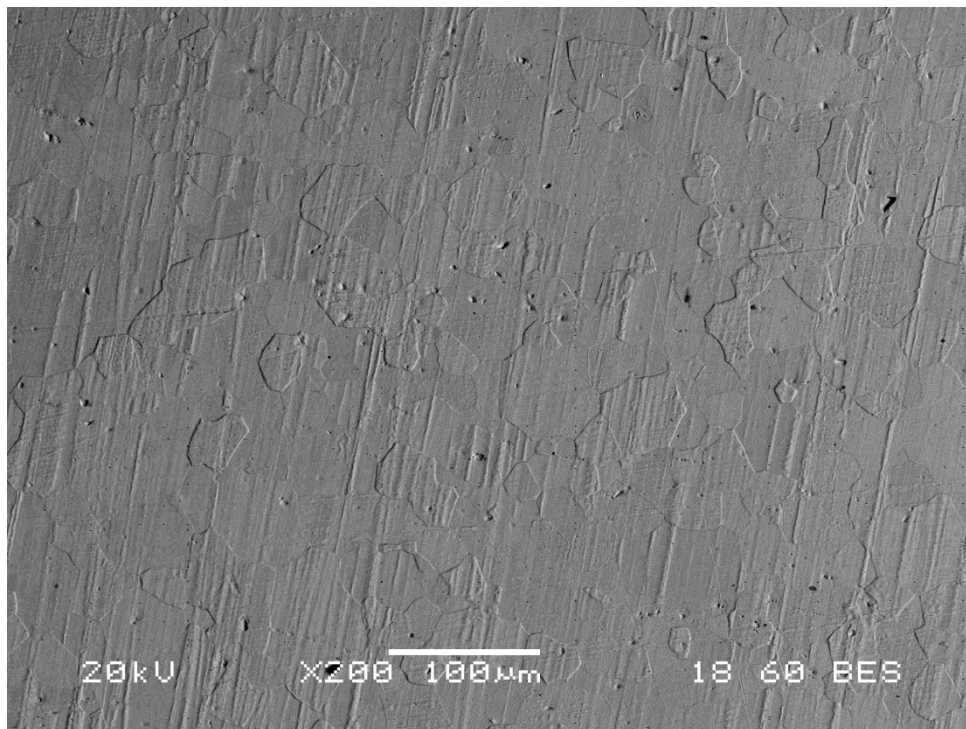




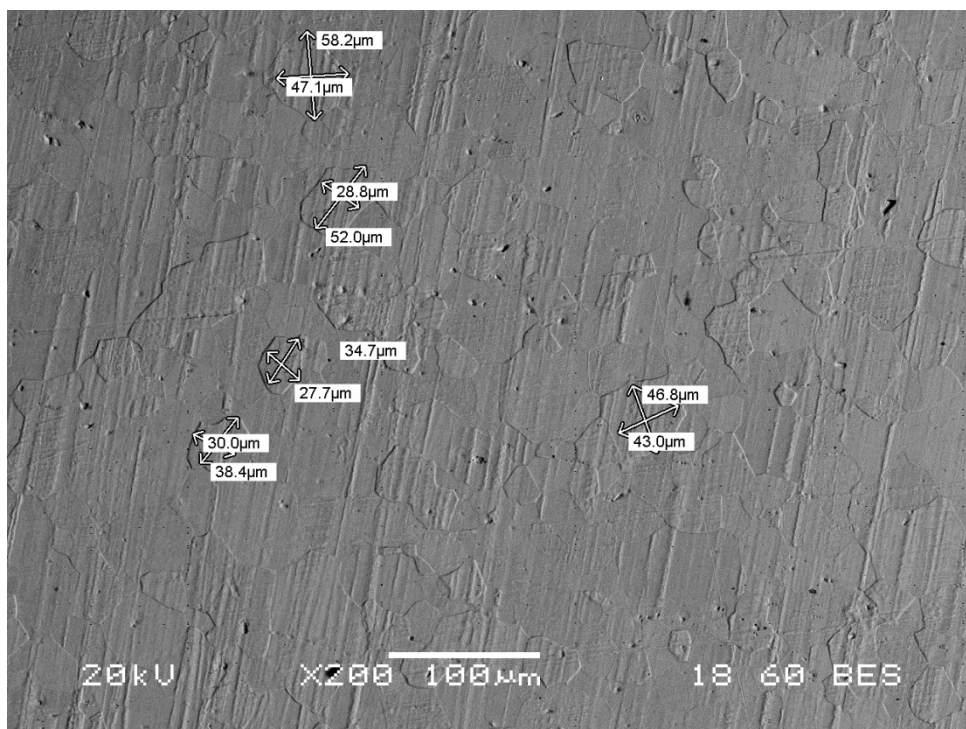
Δοκίμιο #3, 50A with filler



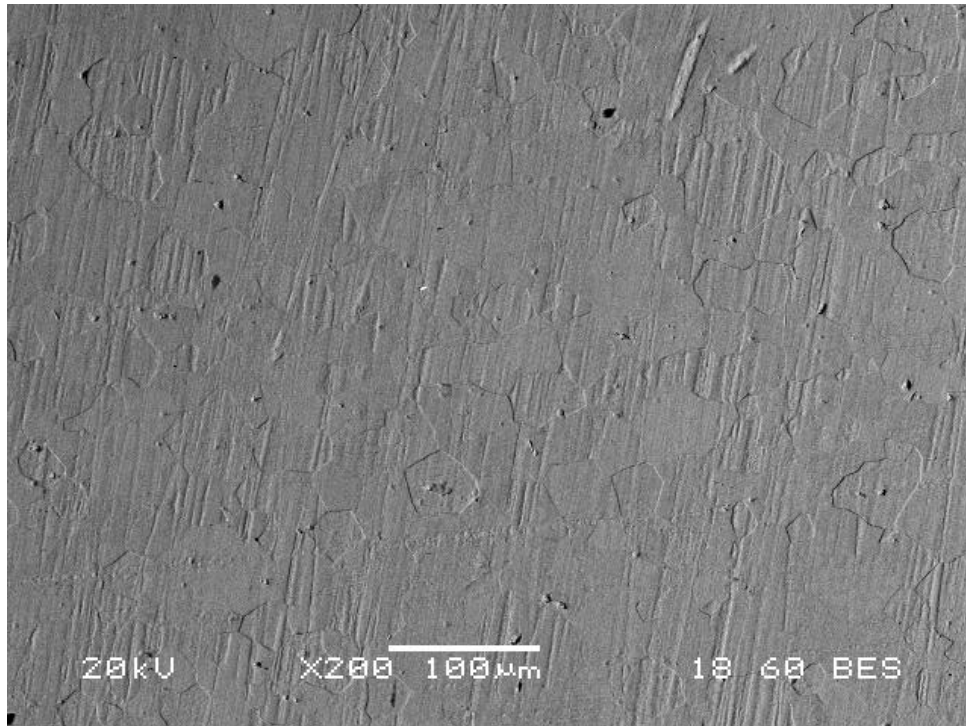
ΕΙΚΟΝΕΣ SEM & ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ: ΔΟΚΙΜΙΟ 20Α:



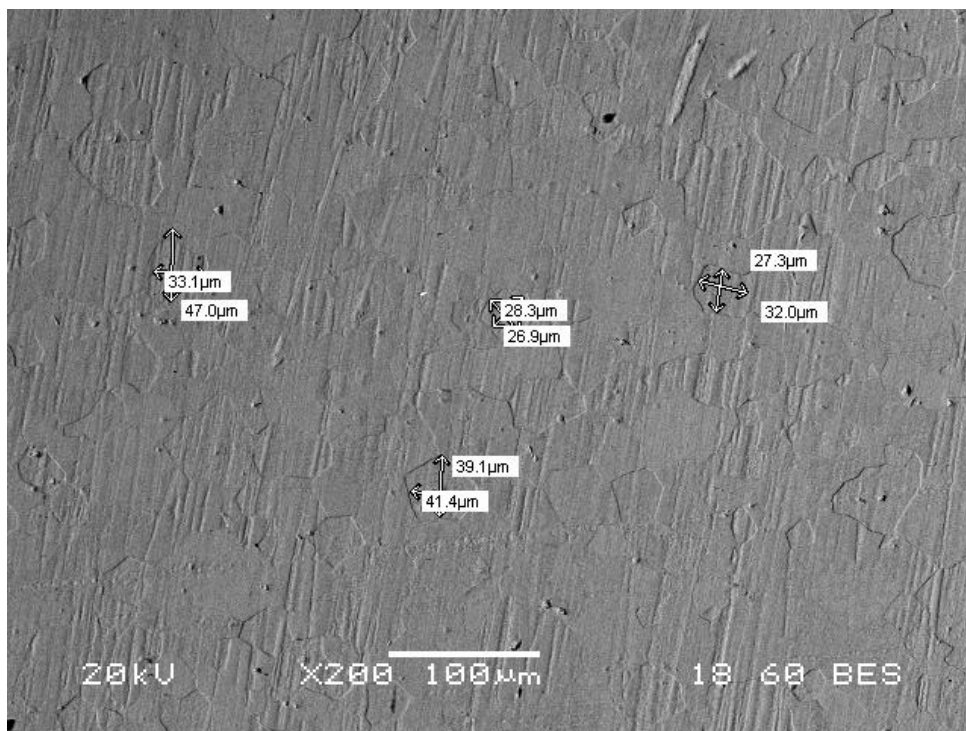
Εικόνα 1: Μέταλλο βάσης (base metal) δοκιμίου 20Α, με πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (BES), μεγέθυνση x200.



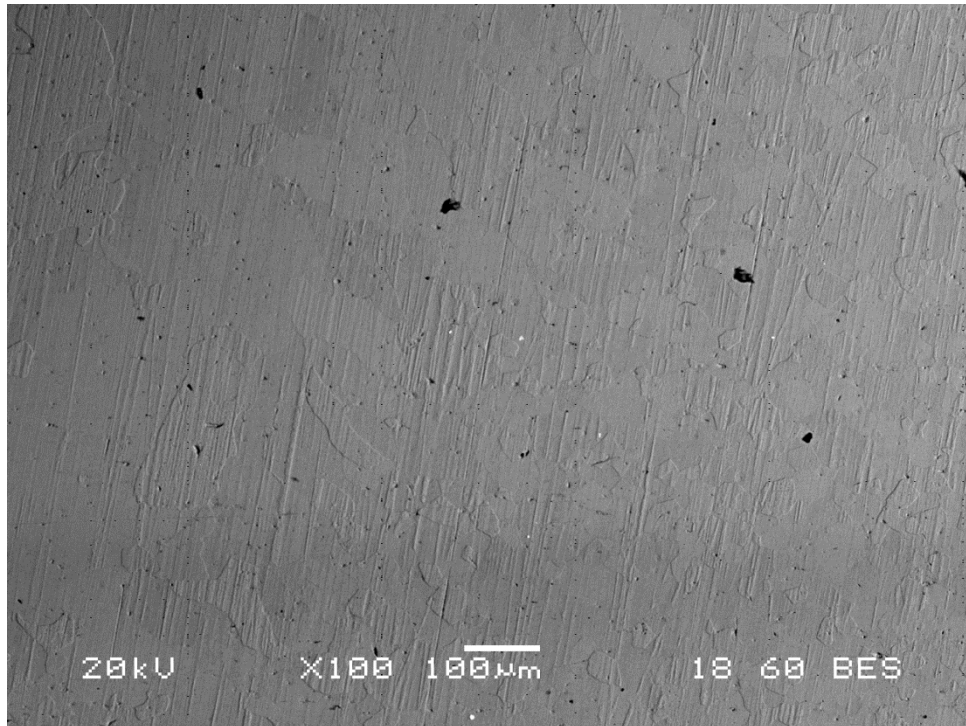
Εικόνα 2: Η εικόνα 3.1, ίδια μεγέθυνση, ενδεικτικές μετρήσεις διαμέτρων κόκκων (grain size) στο μέταλλο βάσης.



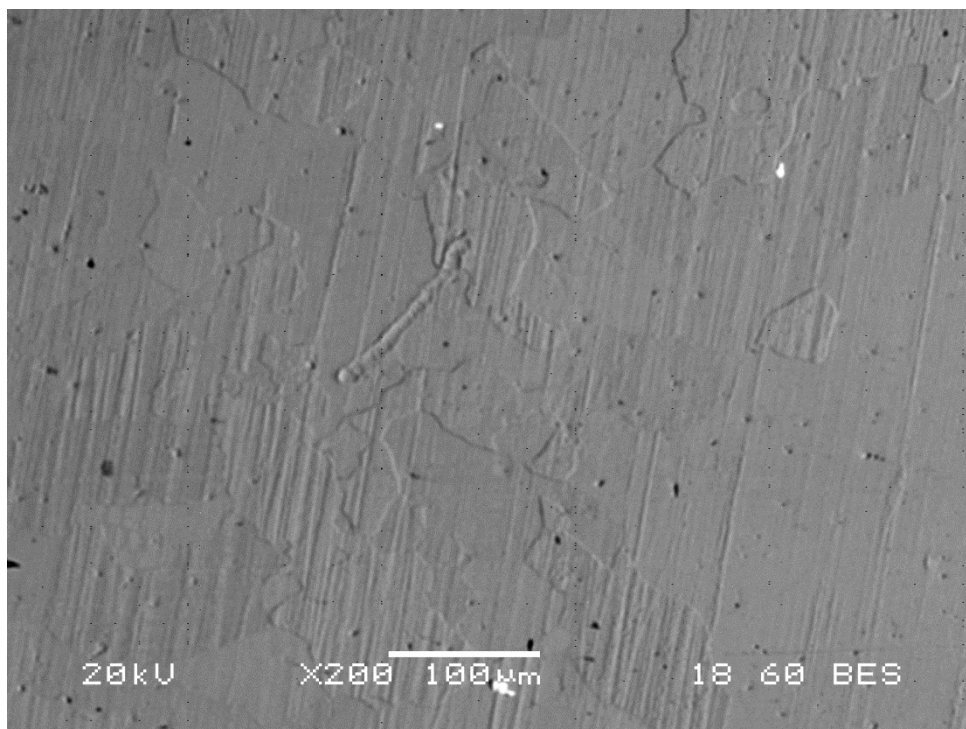
Εικόνα 3: Μέταλλο βάσης δοκιμίου 20Α, ίδιοι παράμετροι, διαφορετική περιοχή.



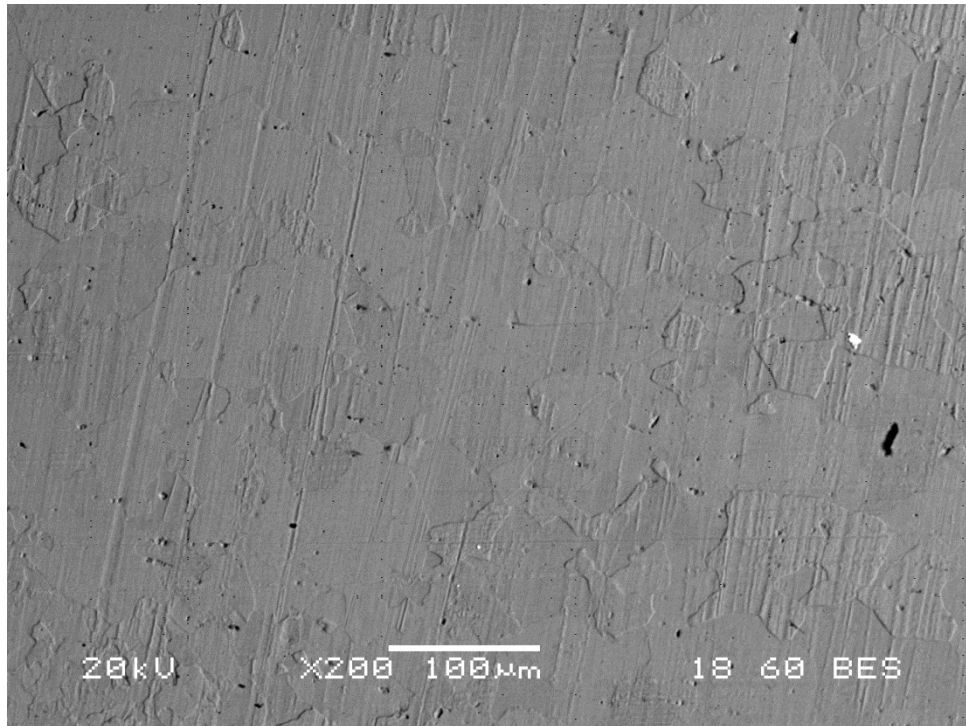
Εικόνα 4: Ενδεικτικές μετρήσεις διαμέτρων κόκκων της περιοχής της εικόνα 3.3.



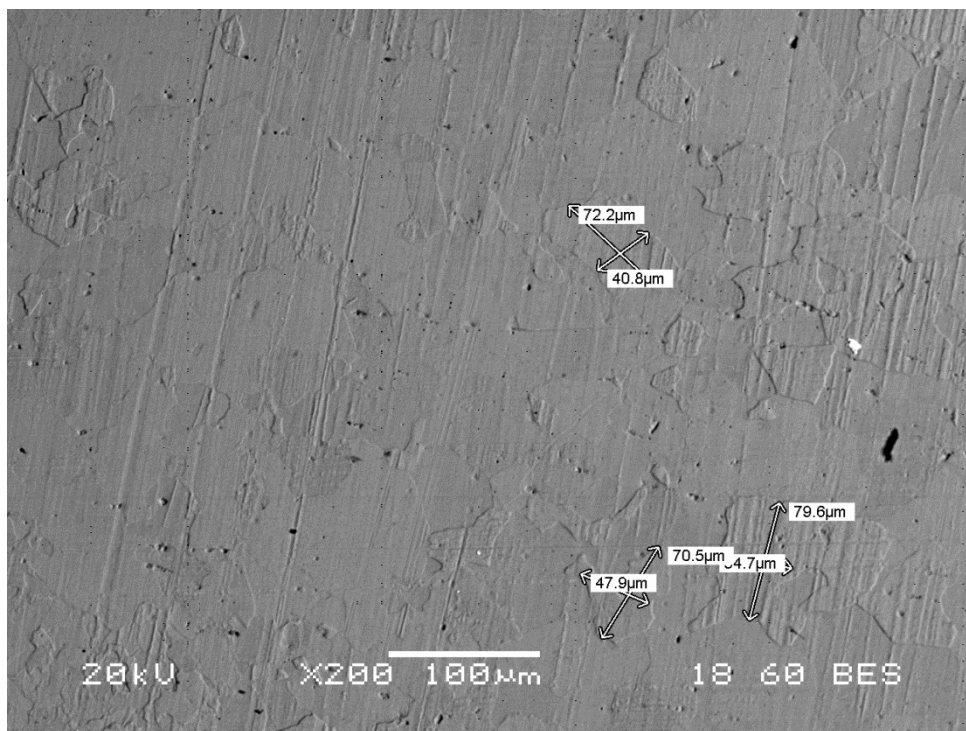
Εικόνα.5: Διεπιφάνεια (interface) Μετάλλου βάσης – ΘΕΖ (θερμικά επηρεασμένης ζώνης, heat affected zone) δοκιμίου 20Α, μεγέθυνση x100, Στα αριστερά διακρίνονται μεγαλύτεροι κόκκοι από ότι στα δεξιά, ξεχωρίζοντας την ΘΕΖ στα αριστερά της φωτογραφίας, με την δεξιά πλευρά να αποτελεί το μέταλλο βάσης.



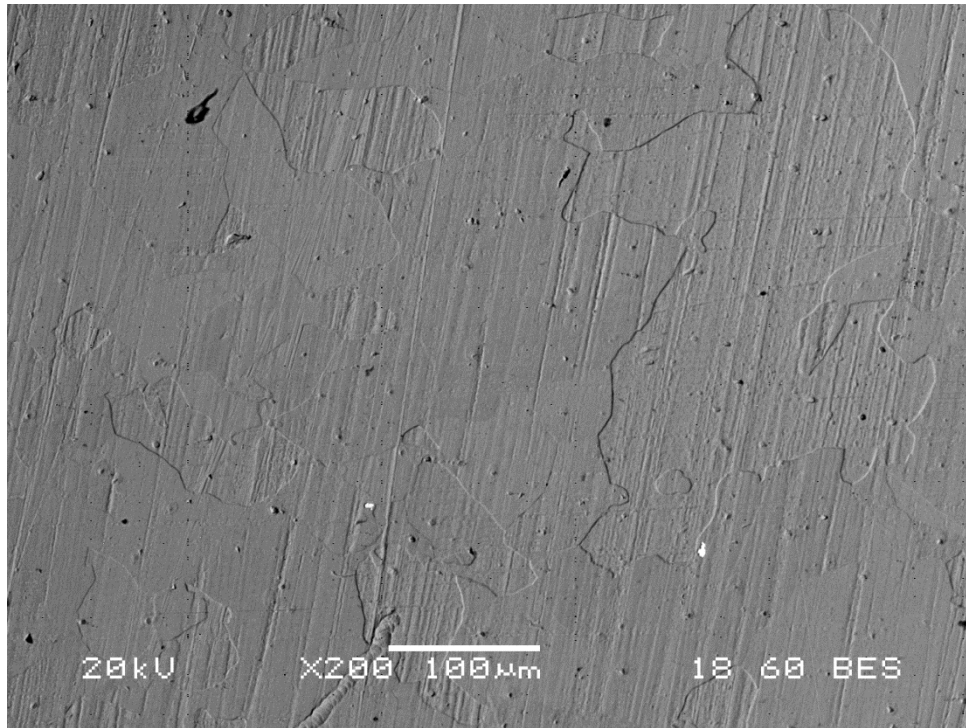
Εικόνα 6: Διεπιφάνεια μετάλλου βάσης (αριστερά) – ΘΕΖ (δεξιά), BES, μεγέθυνση x200.



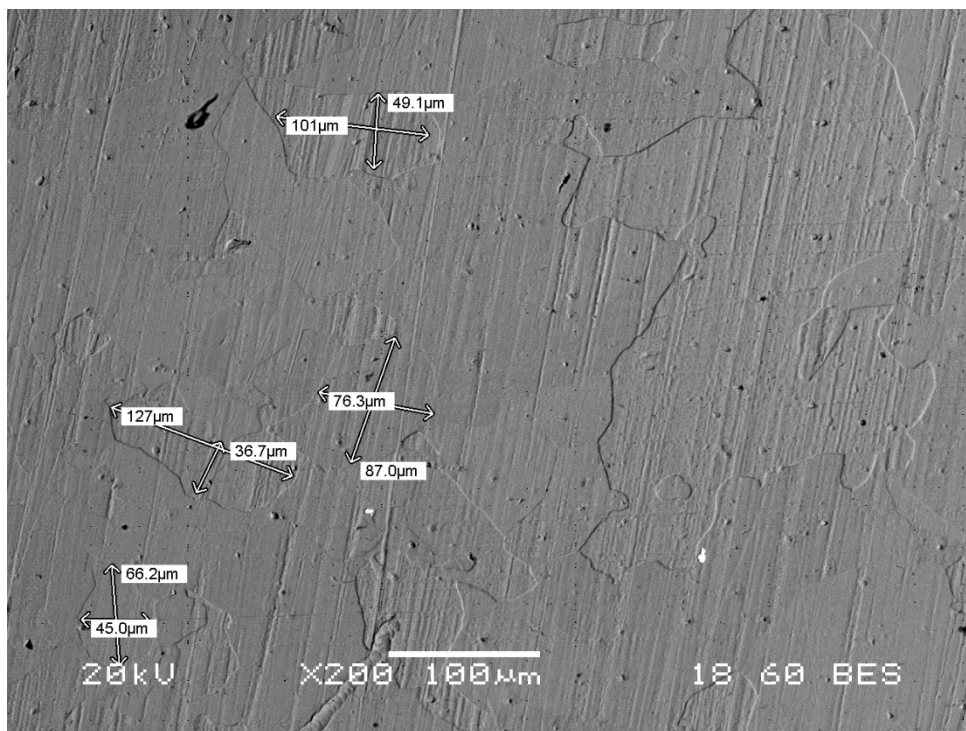
Εικόνα 7: Θερμικά επηρεασμένη ζώνη δοκιμίου 20Α, ΒΕΣ, x200.



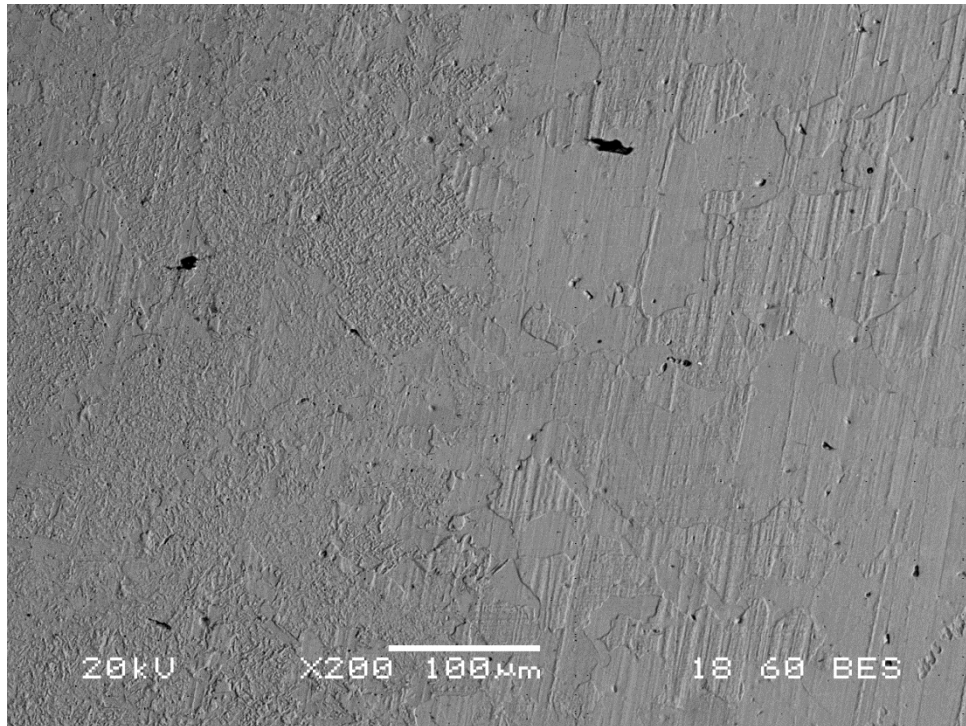
Εικόνα 8: Ενδεικτικές μετρήσεις διαμέτρων κόκκων στη περιοχή της ΘΕΖ, x200, ΒΕΣ.



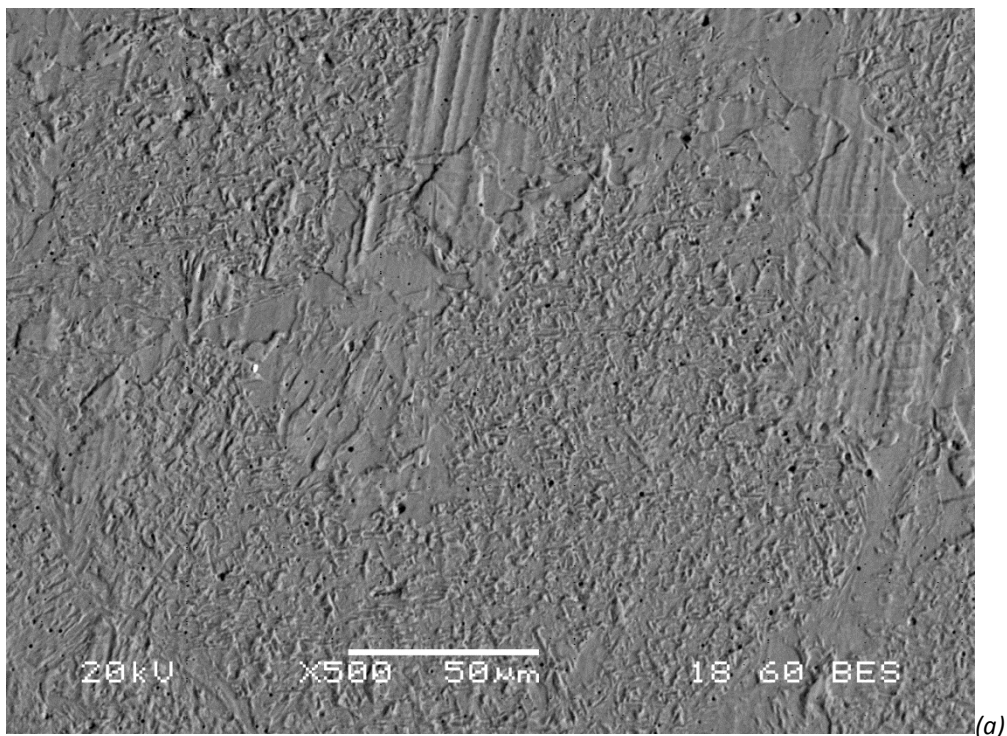
Εικόνα 9: Δοκίμιο 20Α, ΘΕΖ, ΒΕΣ, x200, διαφορετική περιοχή.

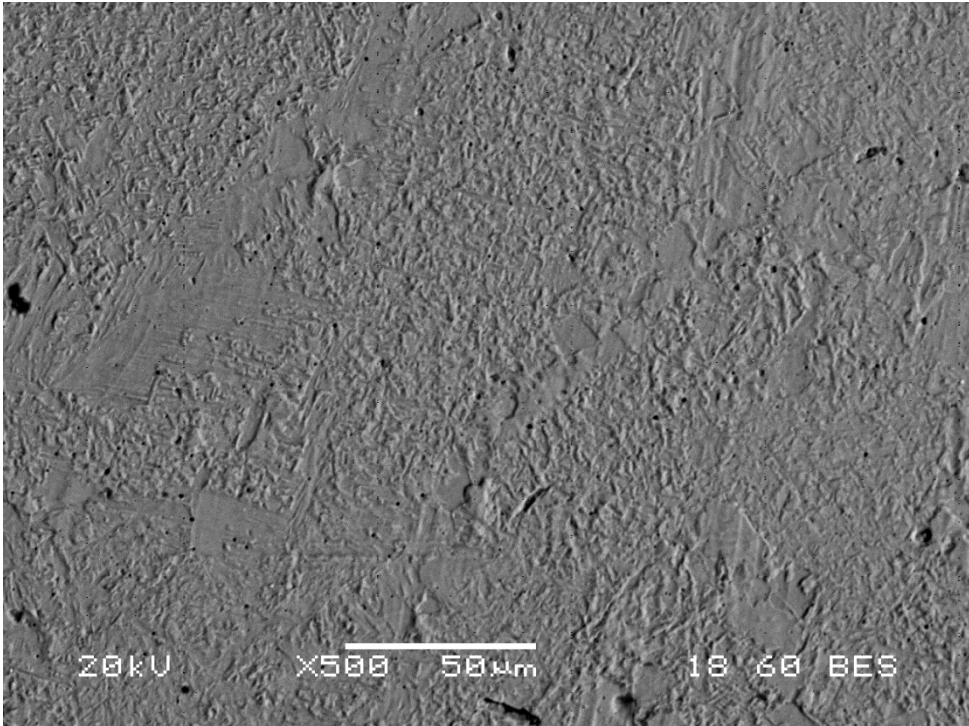


Εικόνα 10: Ενδεικτικές μετρήσεις μεγέθους κόκκων στη ΘΕΖ, ΒΕΣ, x200, για το δοκίμιο 20Α.

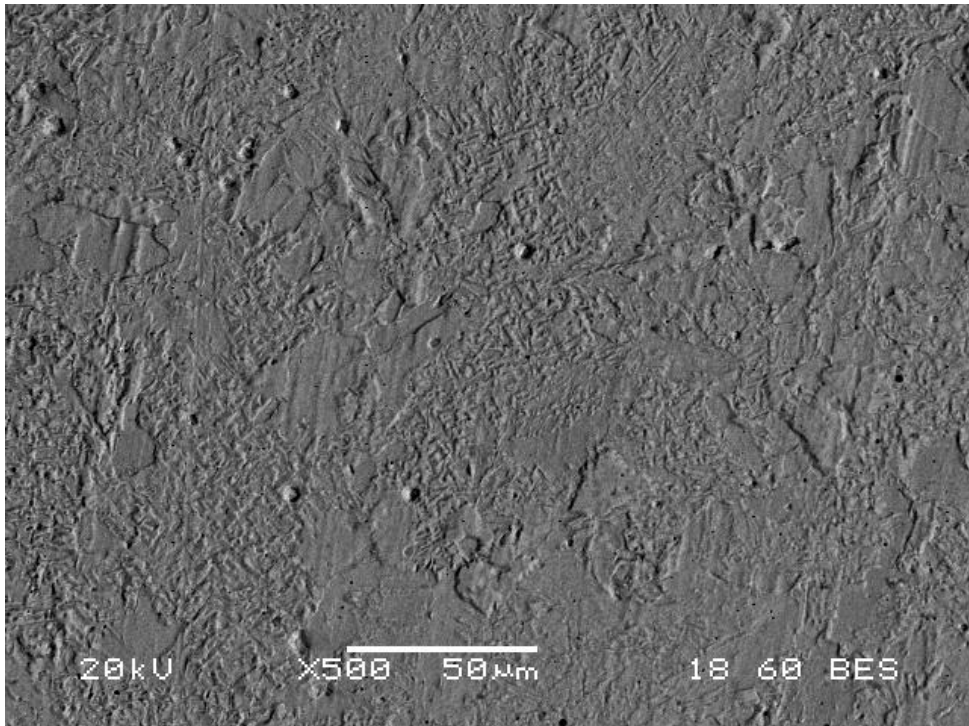


Εικόνα 11: Διεπιφάνεια ΘΕΖ (δεξιά περιοχή της φωτογραφίας με τους εμφανώς μεγεθυμένους κόκκους) – ΖΤ (ζώνη τήξης, fusion zone, αριστερή περιοχή της φωτογραφίας, με τους δενδρίτες να εμφανίζονται επαρκώς καθαρά), δοκιμίου 20Α, ΒΕΣ, x200.

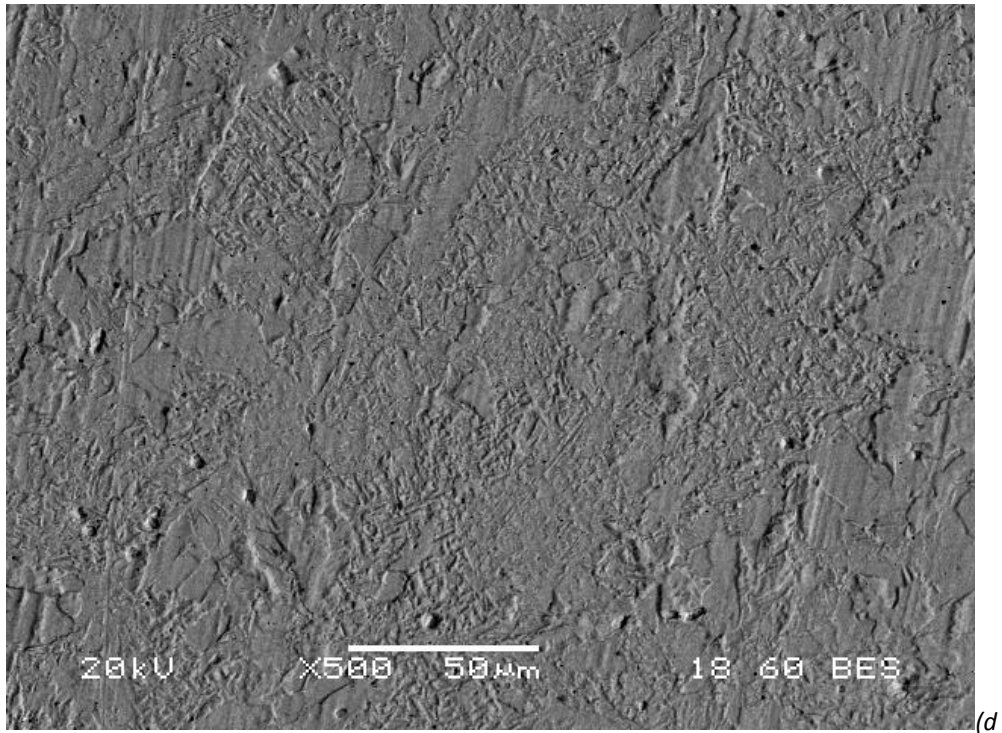




(b)

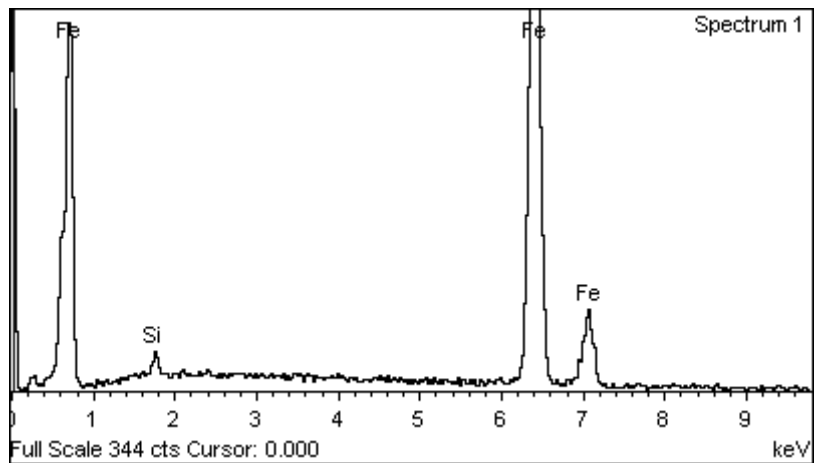
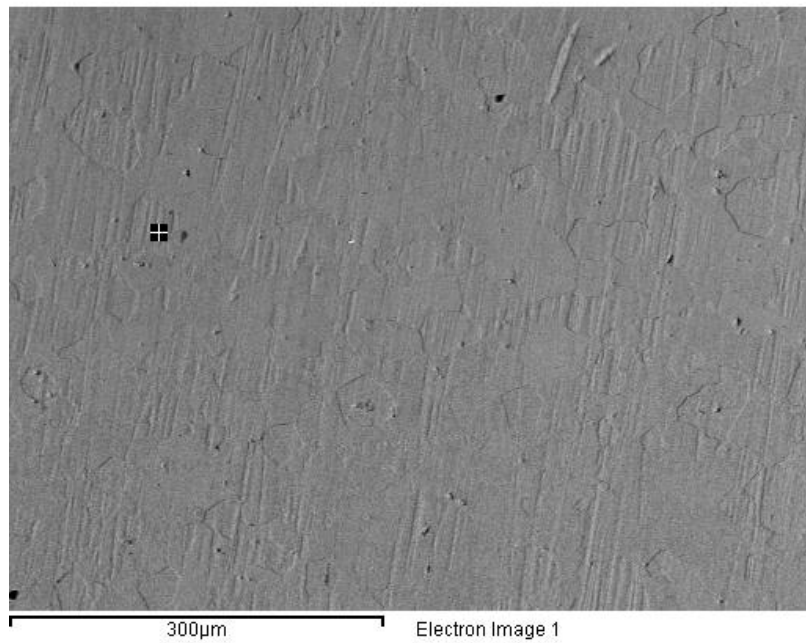


(c)



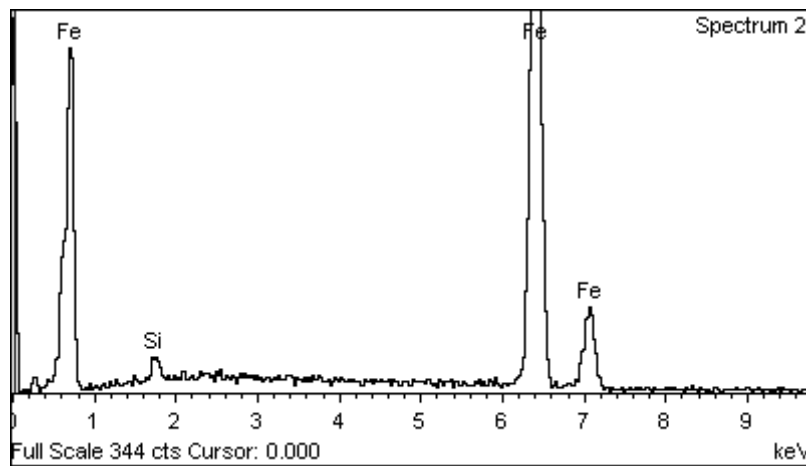
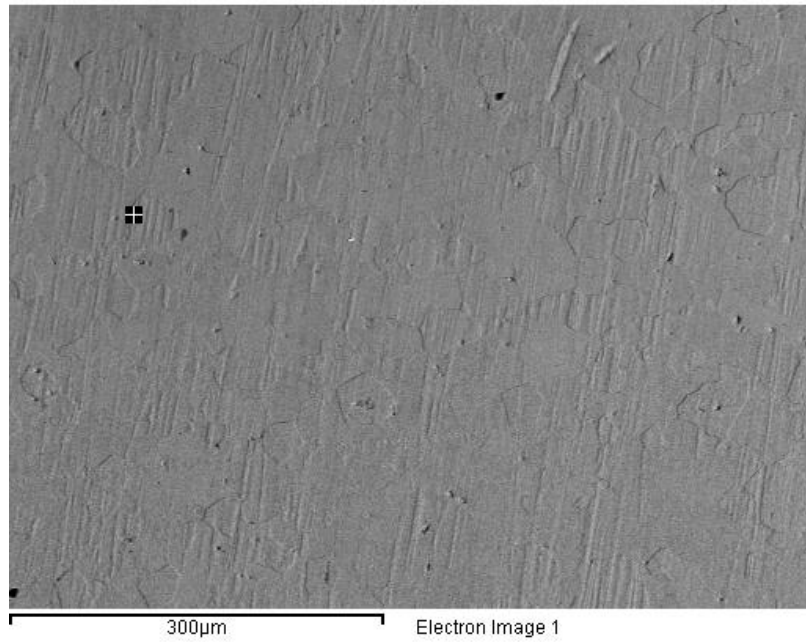
Εικόνες 12.α-d: 4 διαφορετικές περιοχές της ΖΤ δοκιμίου 20Α, ΒΕS, σε μεγέθυνση x500.

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



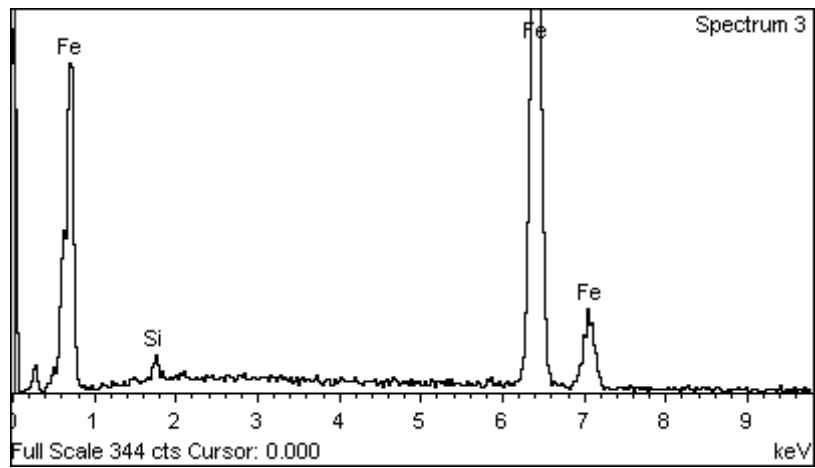
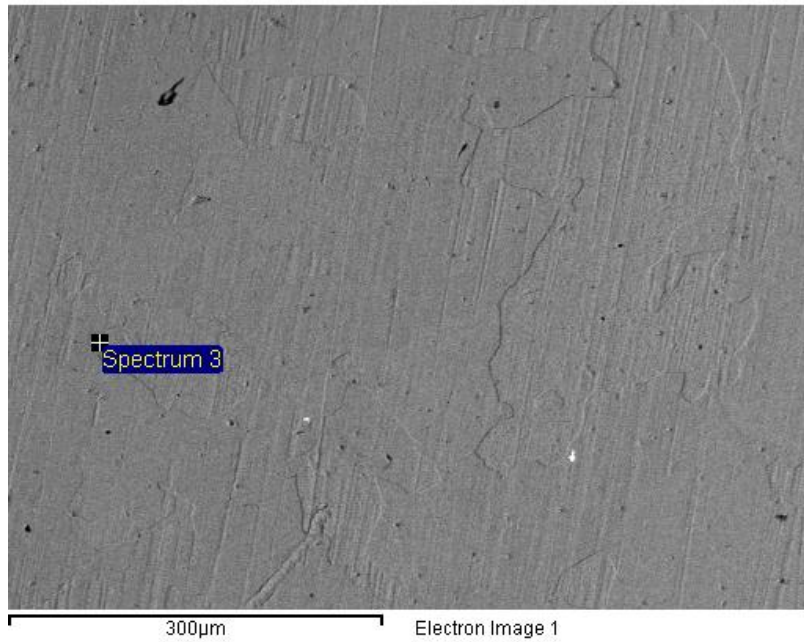
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.44	2.82
Fe K	98.56	97.18
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο κόκκου:



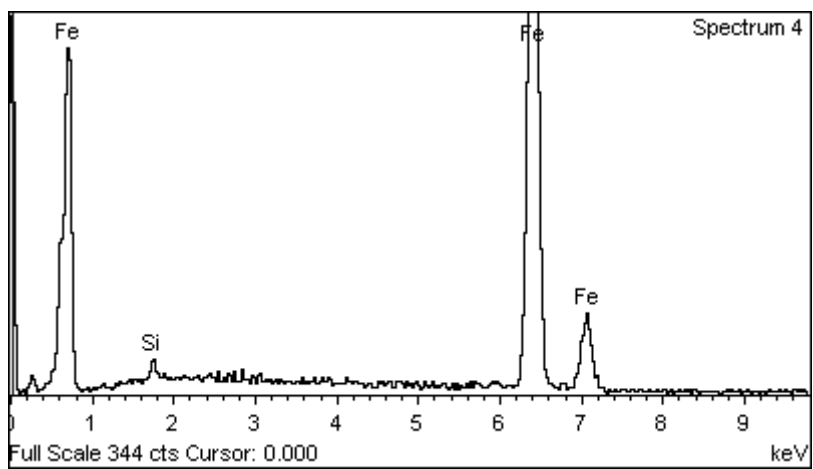
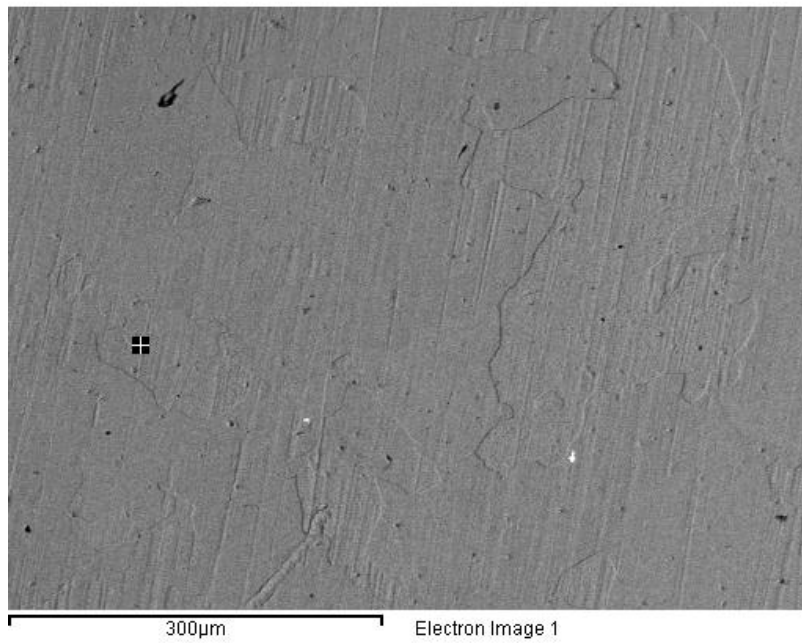
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.50	2.93
Fe K	98.50	97.07
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



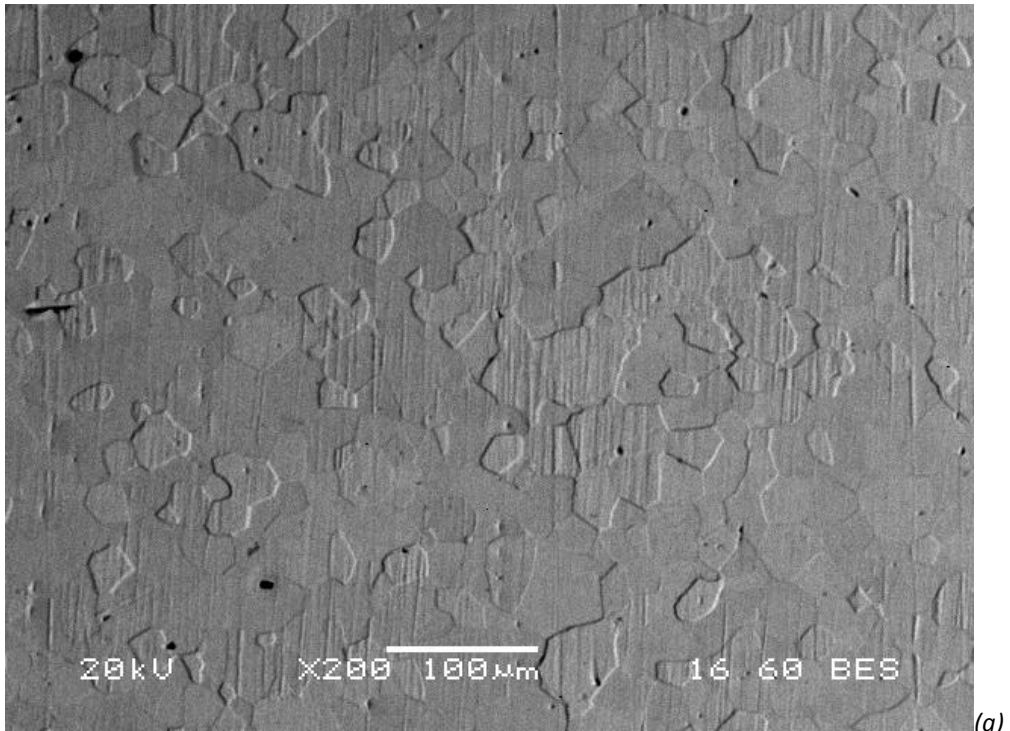
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.32	2.60
Fe K	98.68	97.40
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο στο εσωτερικό κόκκου:

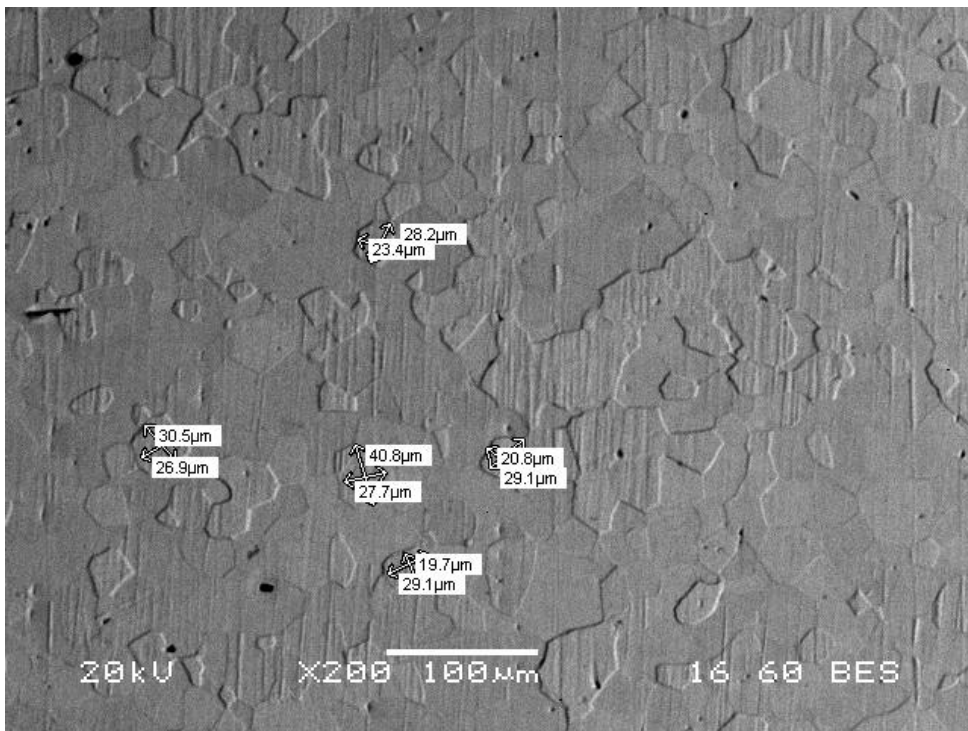


Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.06	2.08
Fe K	98.94	97.92
Totals	100.00	

ΔΟΚΙΜΙΟ 30AF:

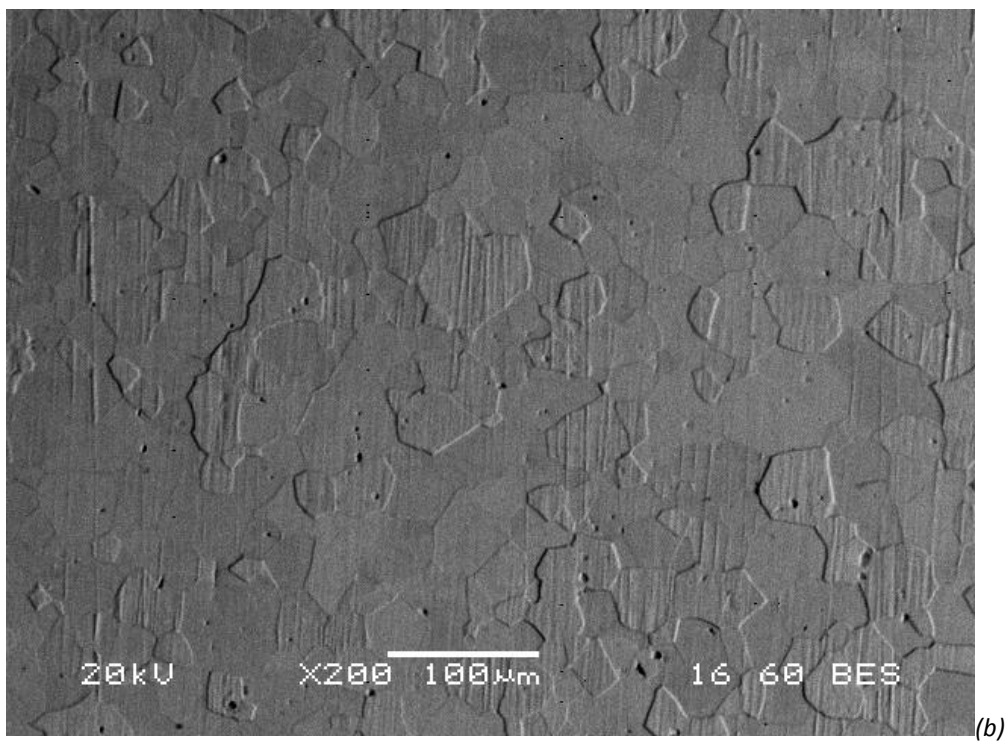
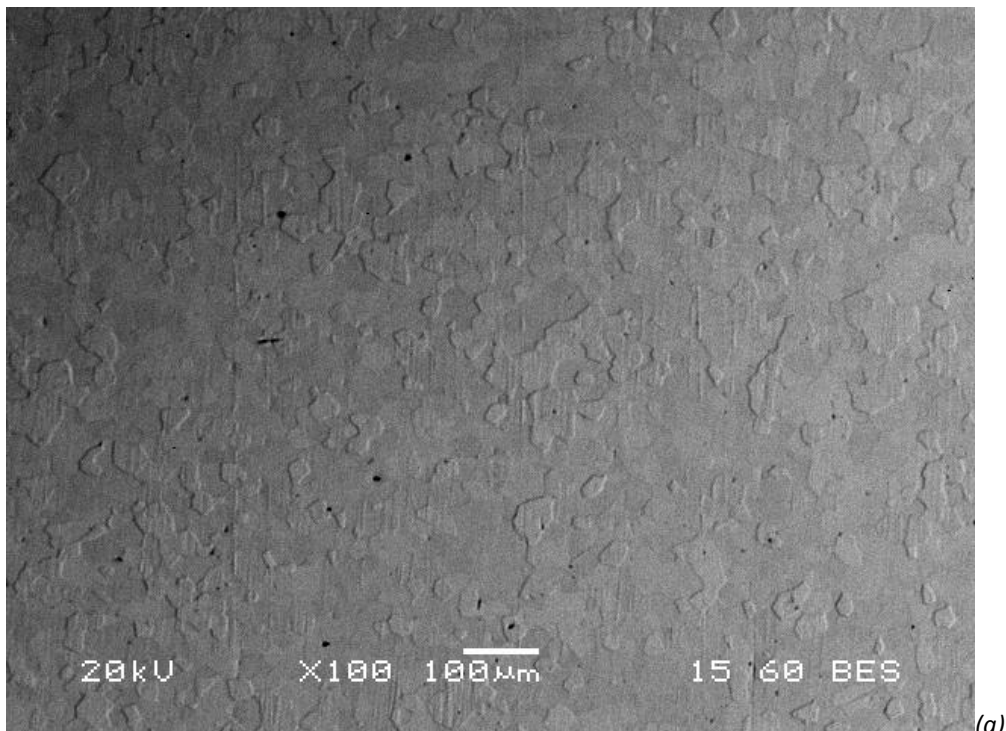


(a)

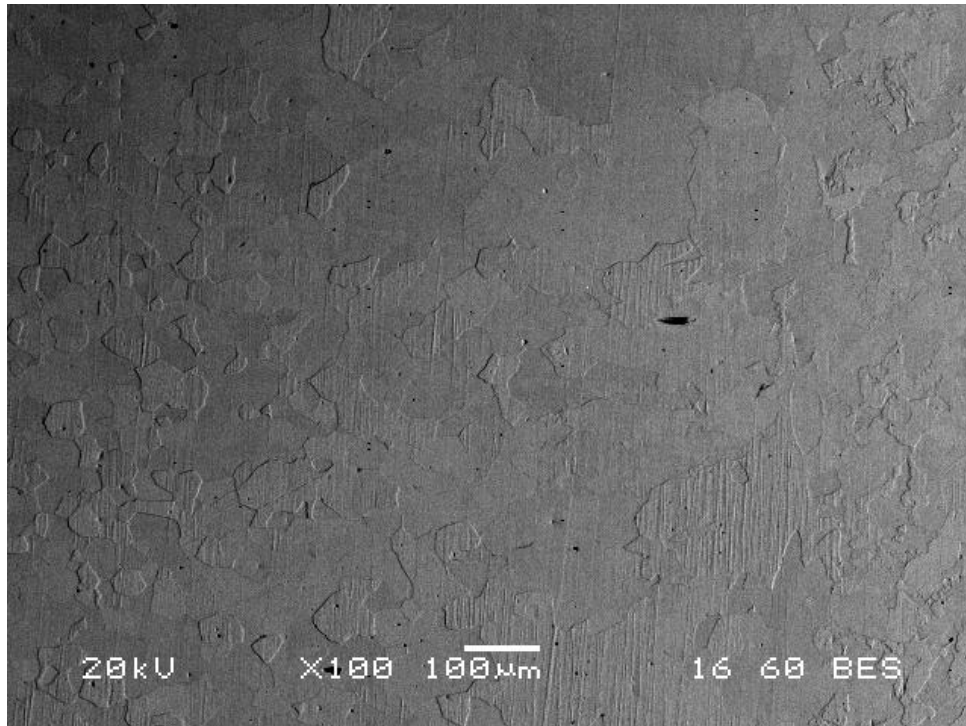


(b)

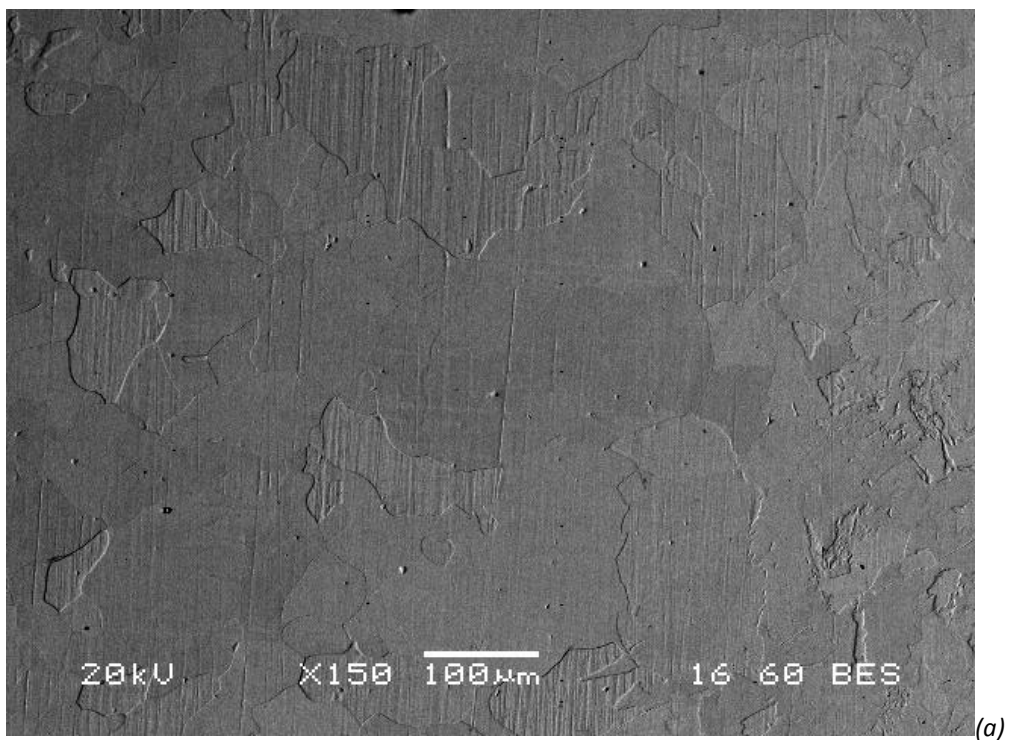
Εικόνα 13: (a) Δοκίμιο 30AF, x200, BES, μέταλλο βάση, (b) ενδεικτικές μετρήσεις διαμέτρων κόκκων.

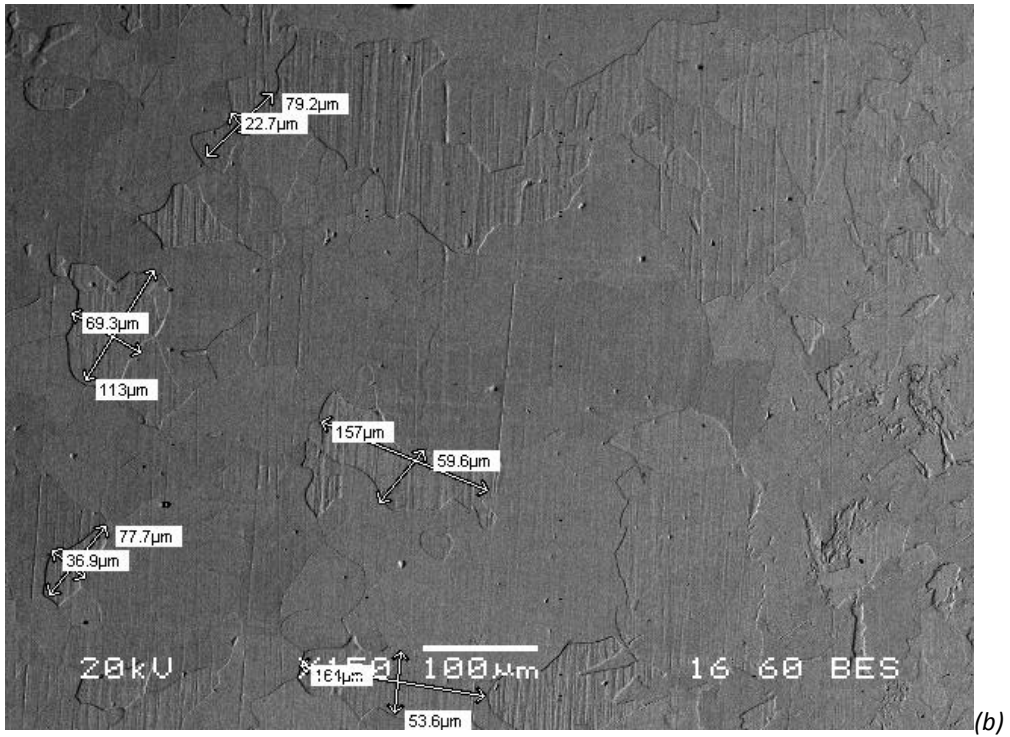


Εικόνα 14: Δοκίμιο 30AF, BES, (a) x100 και (b) x200 μεγέθυνση σε περιοχές του μετάλλου βάσης.



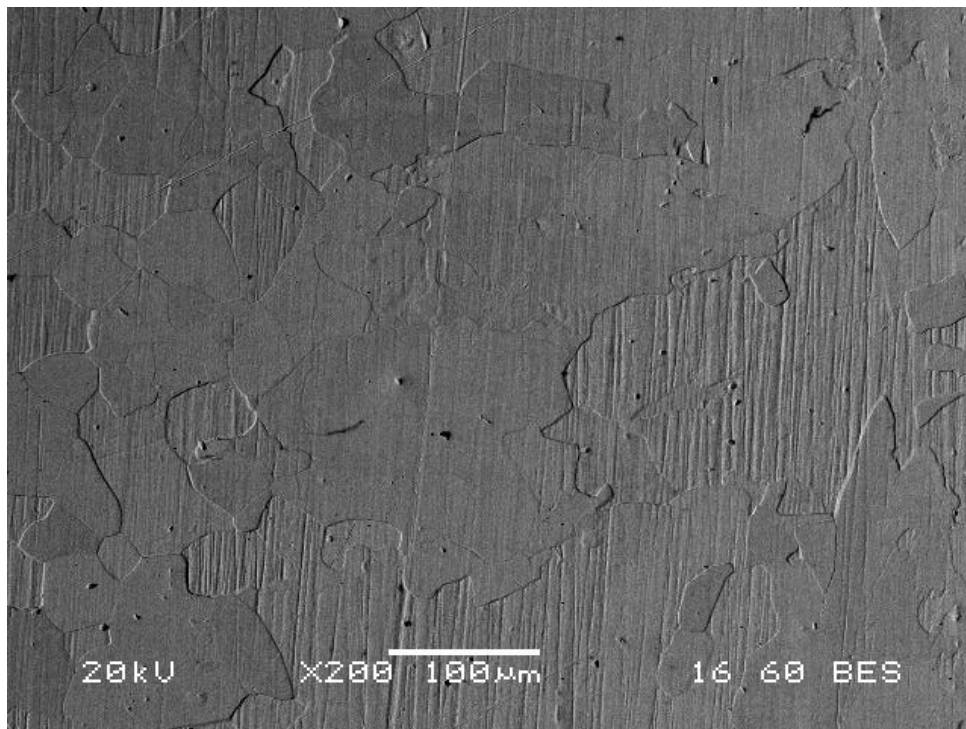
Εικόνα 15: Δοκίμιο 30AF, x100, BES, διεπιφάνεια μετάλλου βάσης (αριστερά, με τους εμφανώς μικρότερους κόκκους σε σχέση με τη ΘΕΖ) – Θερμικά επηρεασμένης ζώνης.



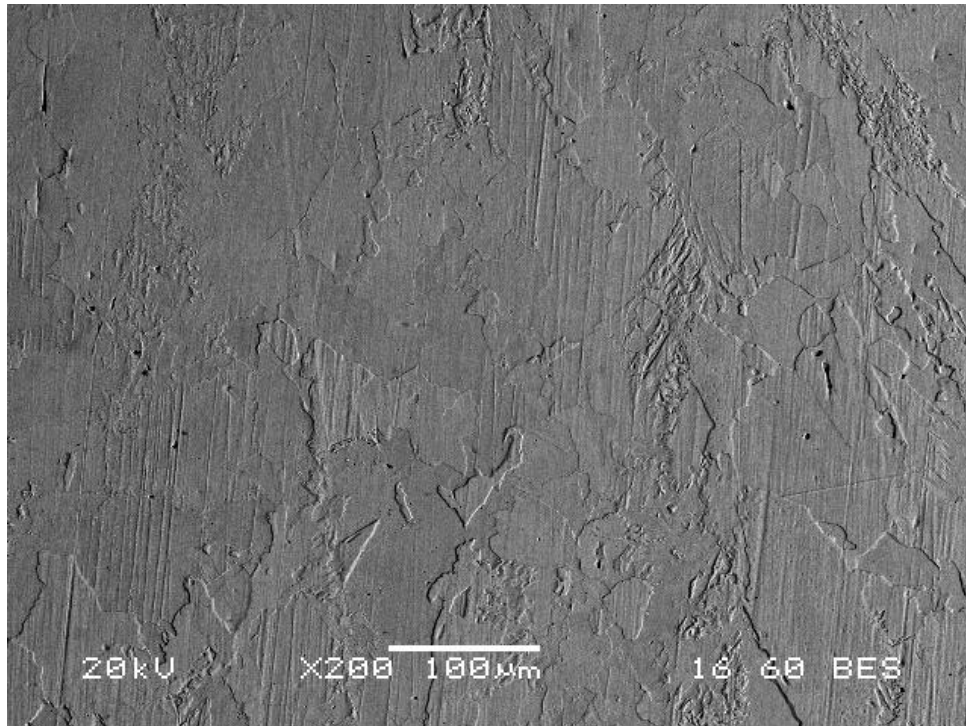


(b)

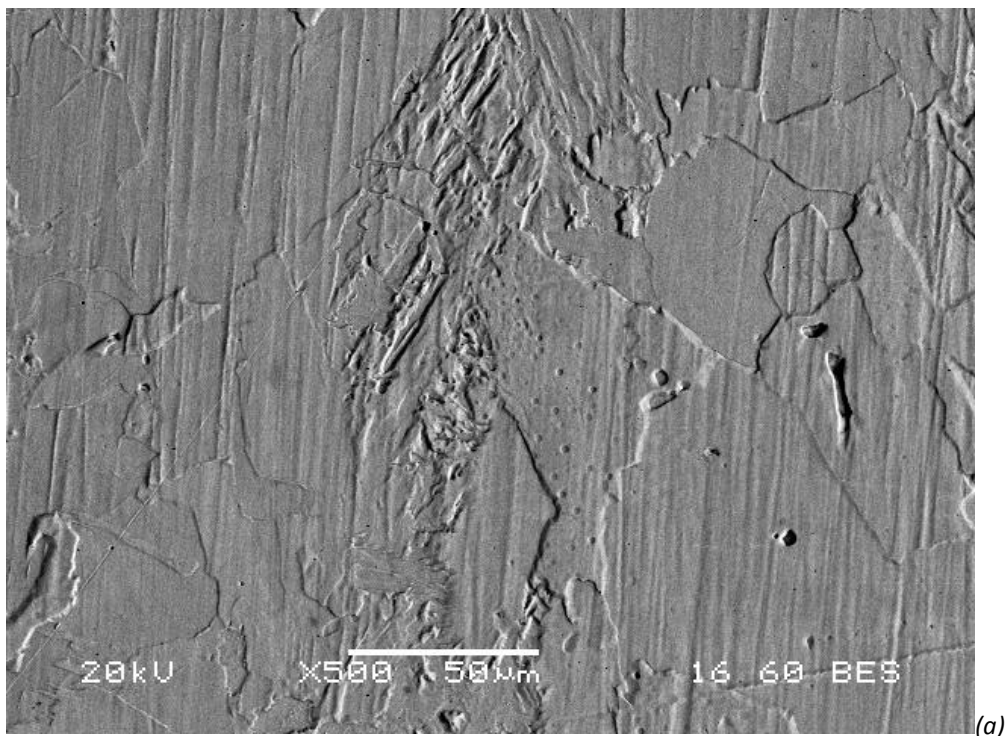
Εικόνα 16: (α) Δοκίμιο 30AF, BES, x150, ΘΕΖ και (β) ίδια περιοχή με ορισμένες δειγματοληπτικές μετρήσεις διαμέτρων των κόκκων.

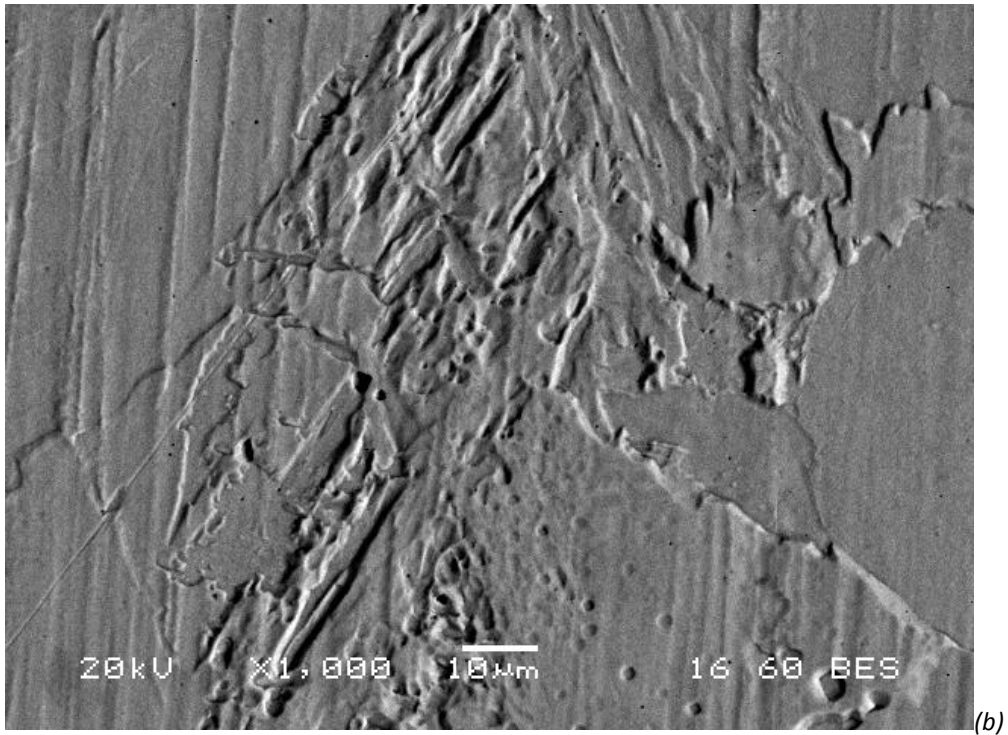


Εικόνα 17: Ίδιο δοκίμιο, ΘΕΖ, σε μεγαλύτερη μεγέθυνση (x200), BES.



Εικόνα 18 Δοκίμιο 30AF, x200, BES, διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ (αριστερό τμήμα, με τους εμφανώς μεγεθυμένους κόκκους) – ζώνη τήξης (δεξιό τμήμα, όπου ξεχωρίζουν οι μη-ομογενώς προσανατολισμένοι δενδρίτες).

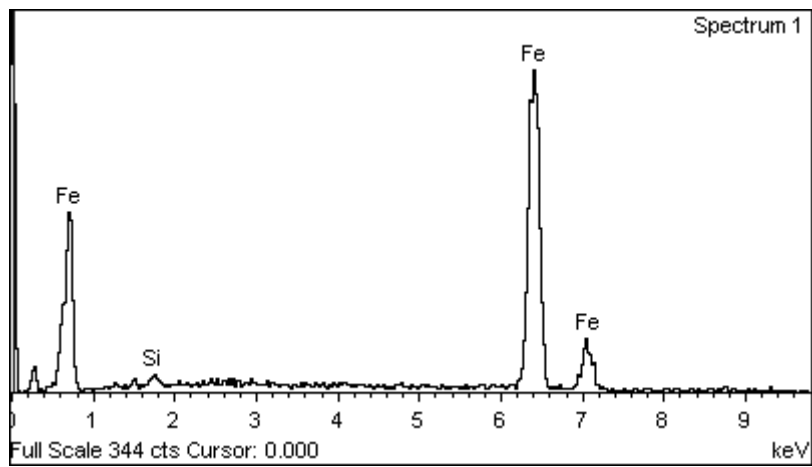
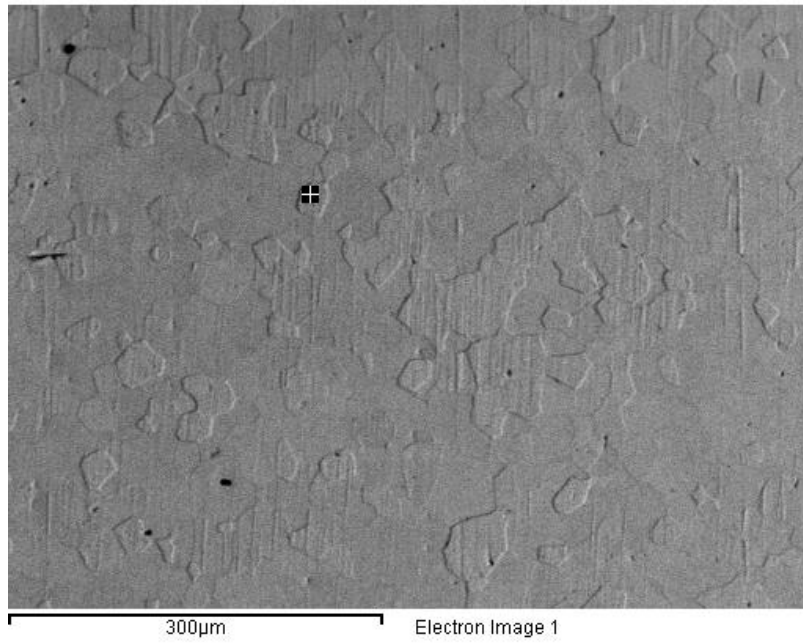




(b)

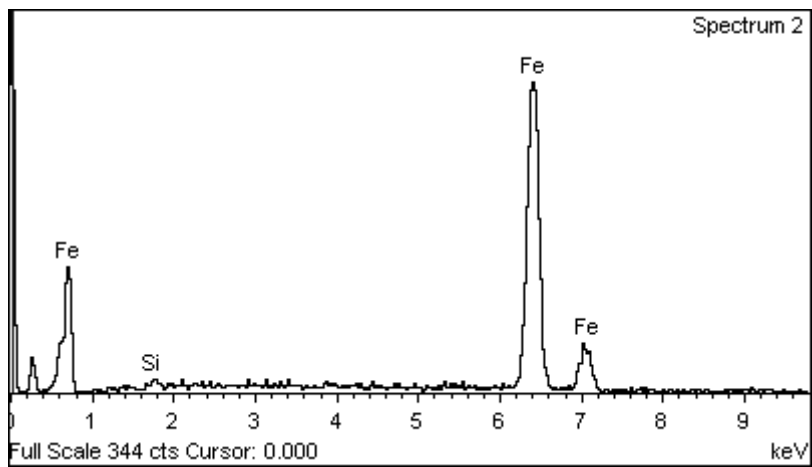
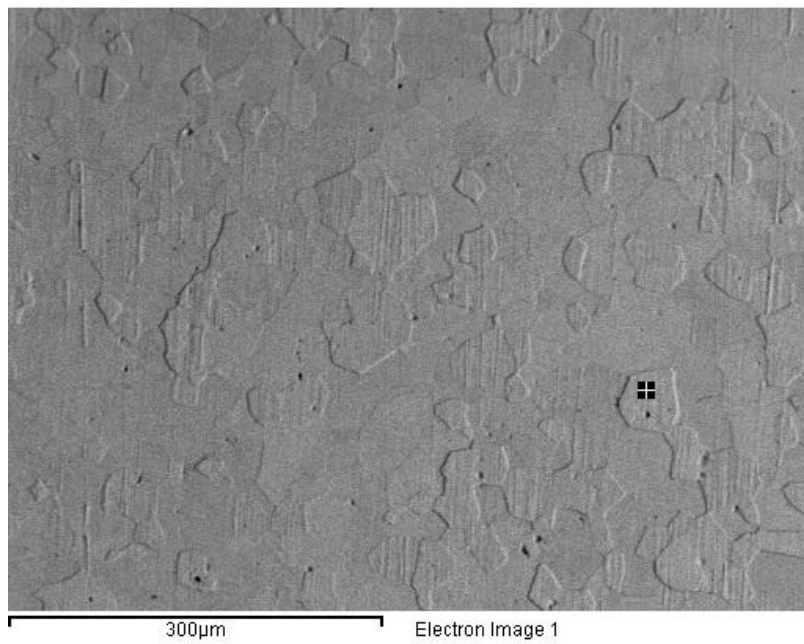
Εικόνα 19: Δοκίμιο 30AF, BES, ζώνη τήξης σε μεγέθυνση (a) x500 και (b) x1000.

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε όριο κόκκου:



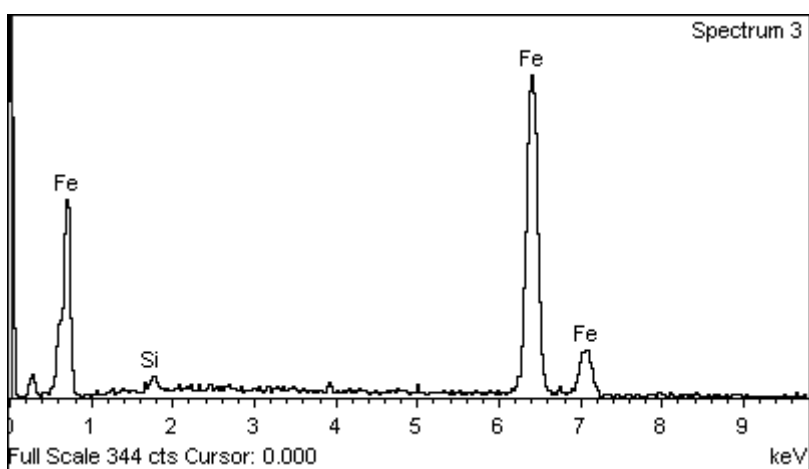
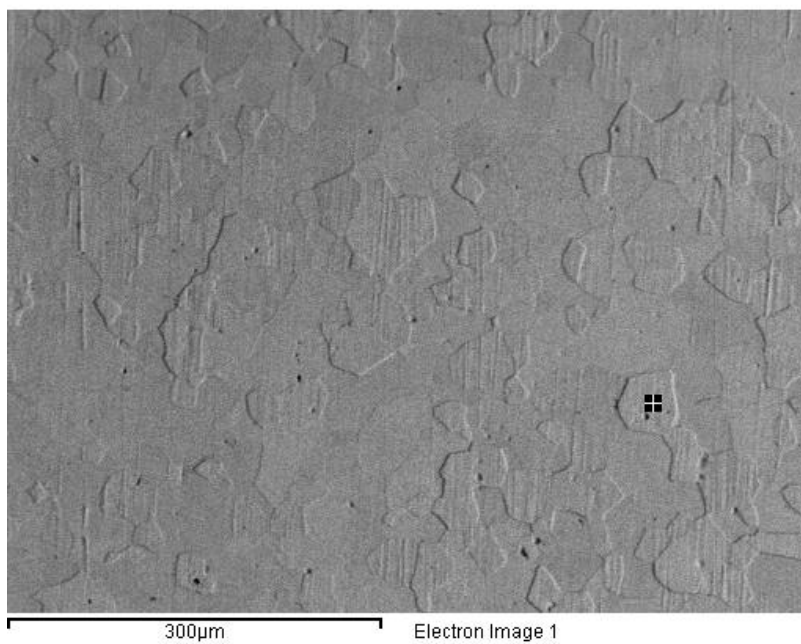
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.17	2.29
Fe K	98.83	97.71
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο στο εσωτερικό κόκκου:



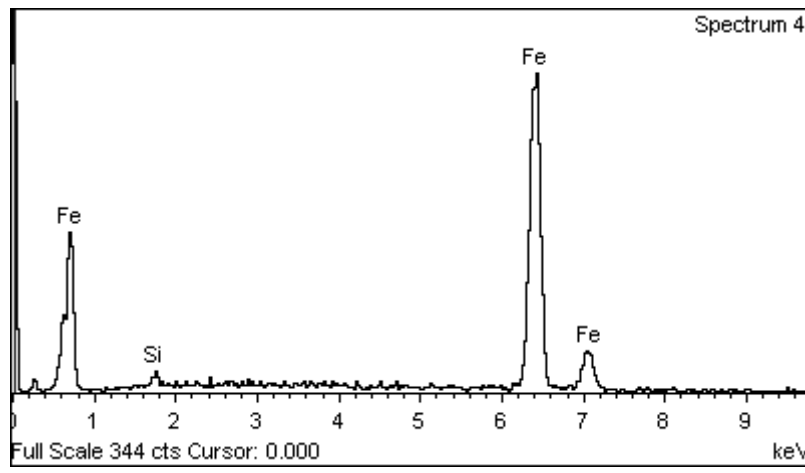
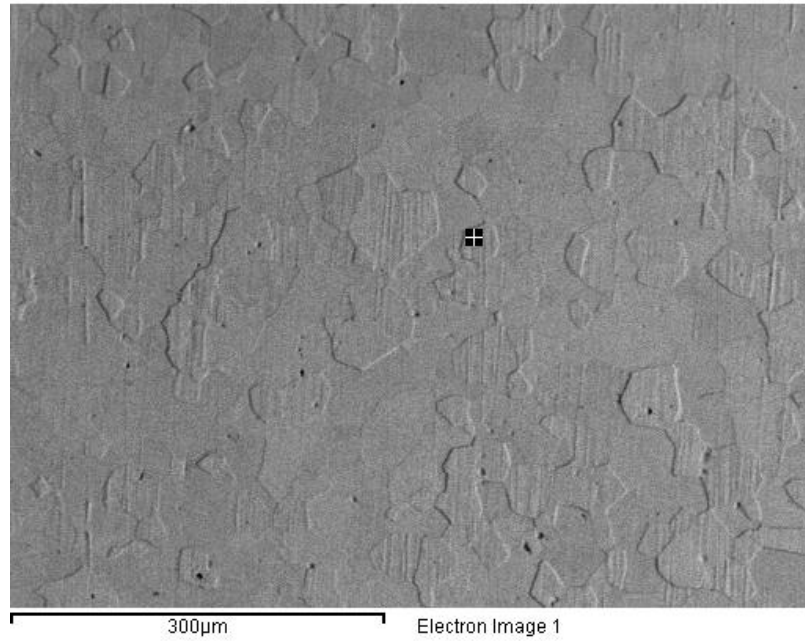
Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.54	1.07
Fe K	99.46	98.93
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο του κόκκου:



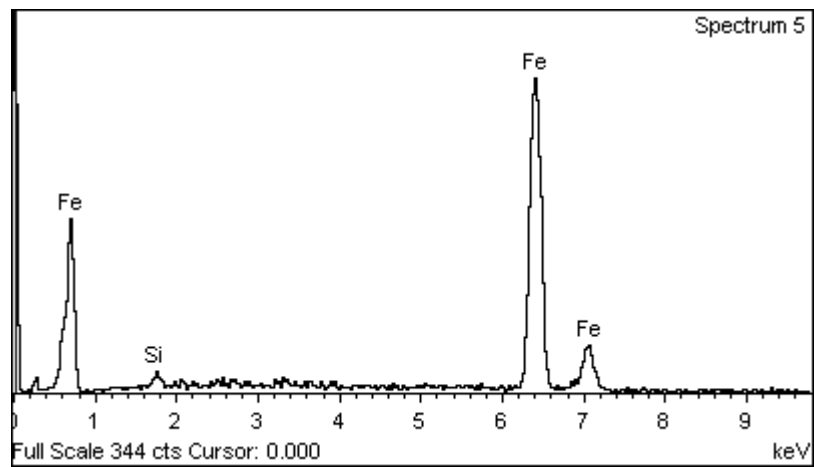
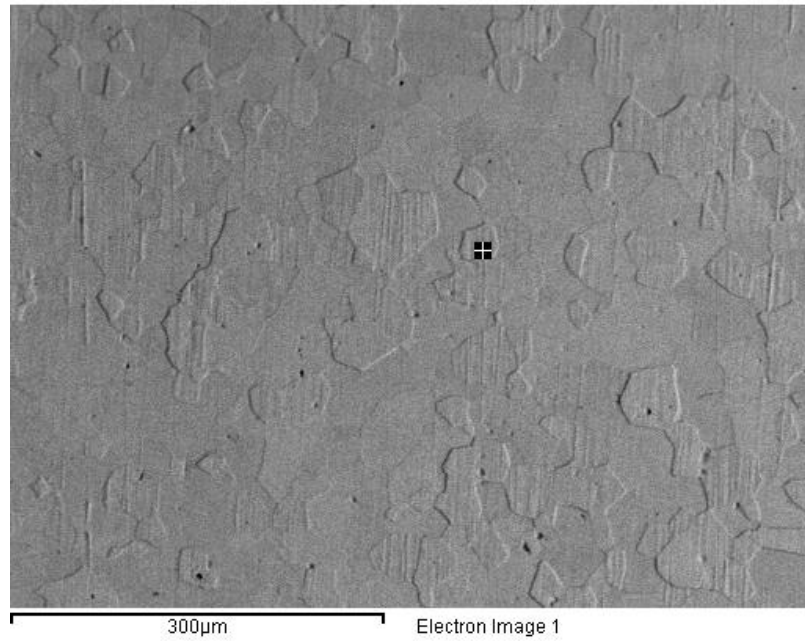
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.32	2.60
Fe K	98.68	97.40
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση πλησίον ορίου κόκκου:



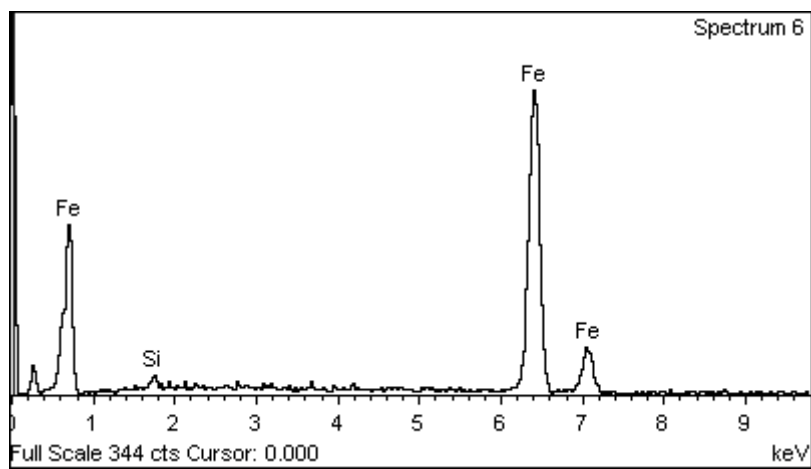
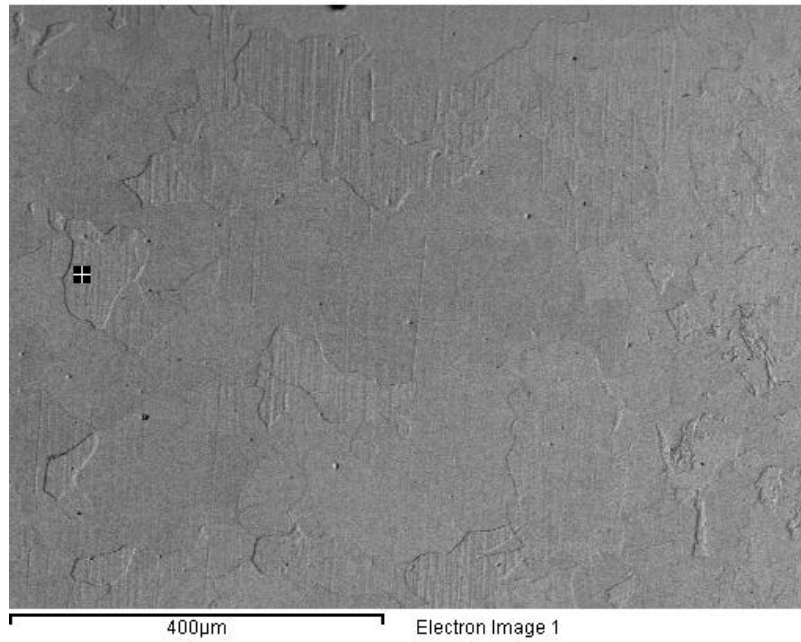
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.15	2.27
Fe K	98.85	97.73
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε όριο κόκκου:



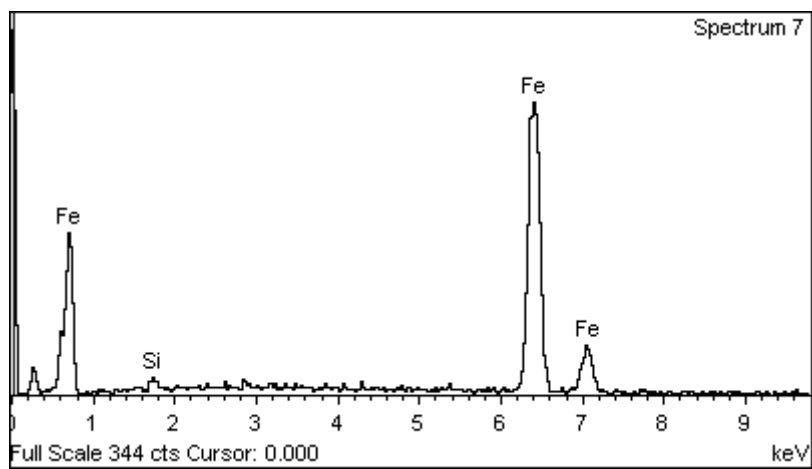
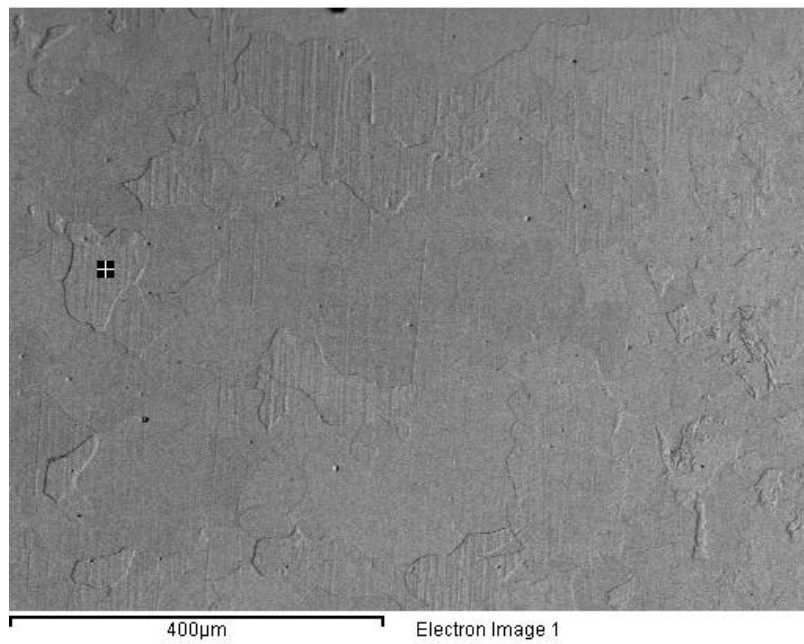
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.25	2.46
Fe K	98.75	97.54
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



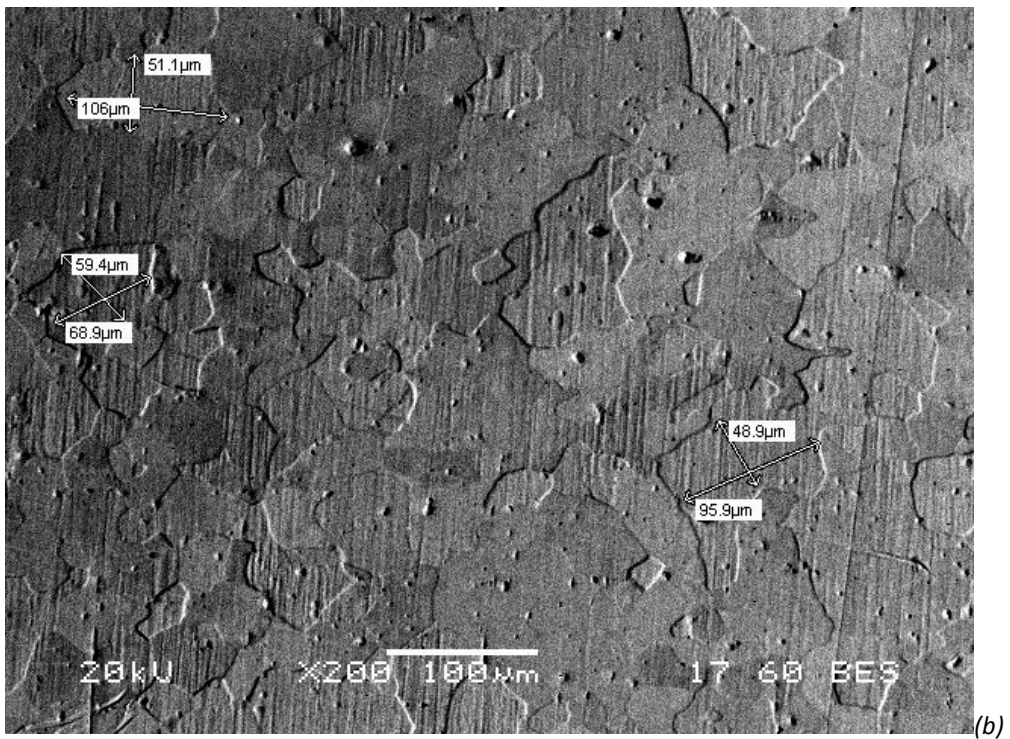
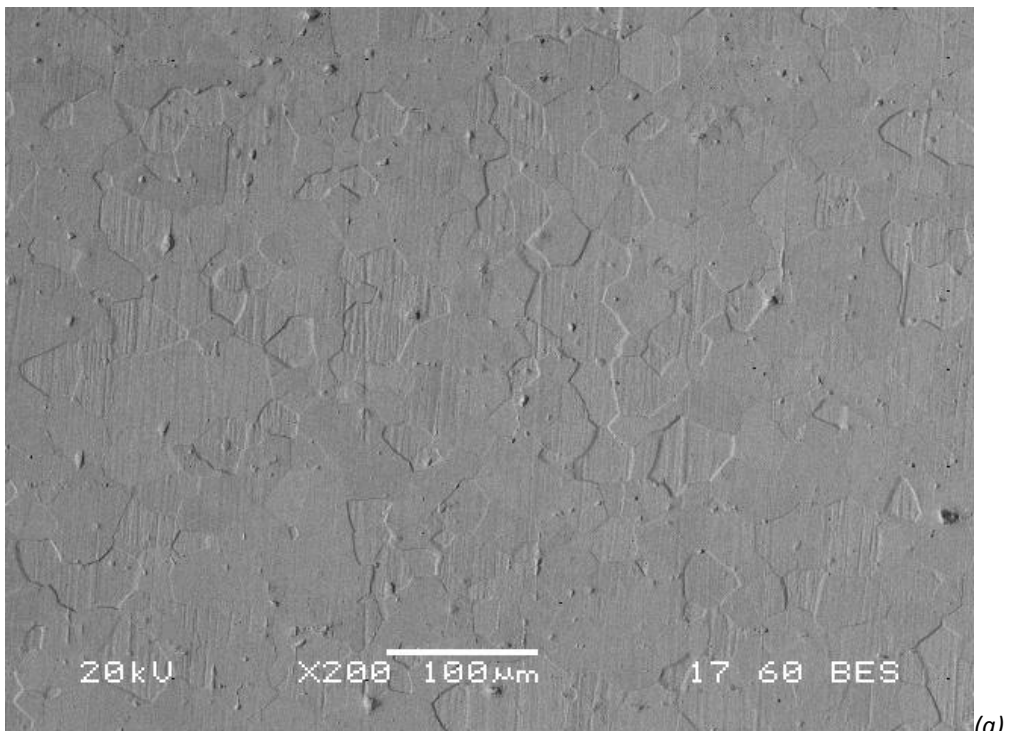
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.38	2.71
Fe K	98.62	97.29
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο του εσωτερικού του κόκκου:

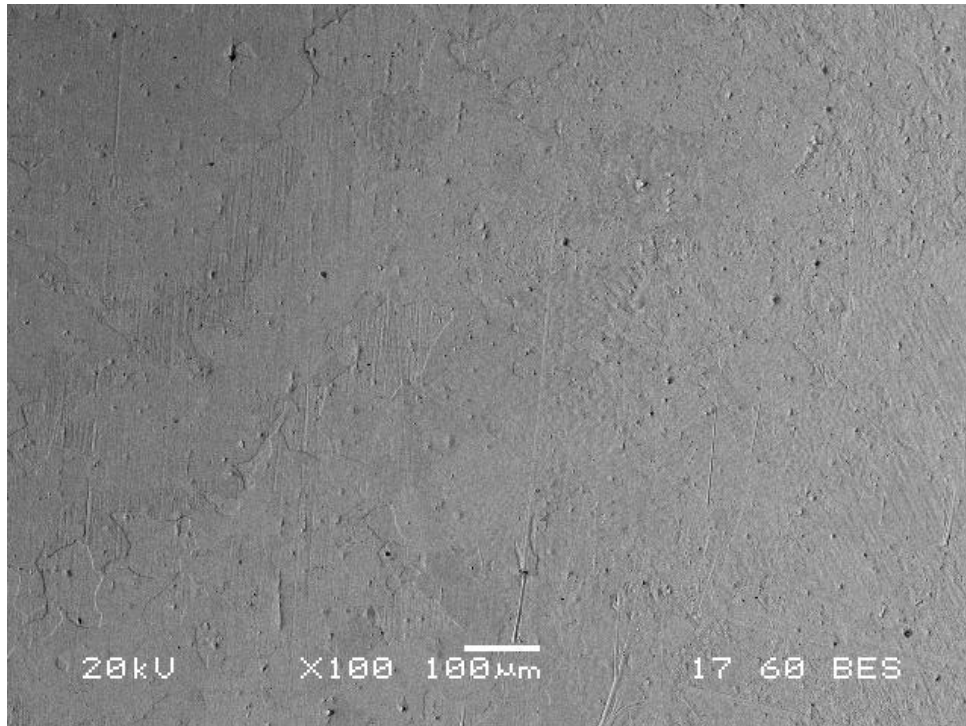


Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.12	2.20
Fe K	98.88	97.80
Totals	100.00	

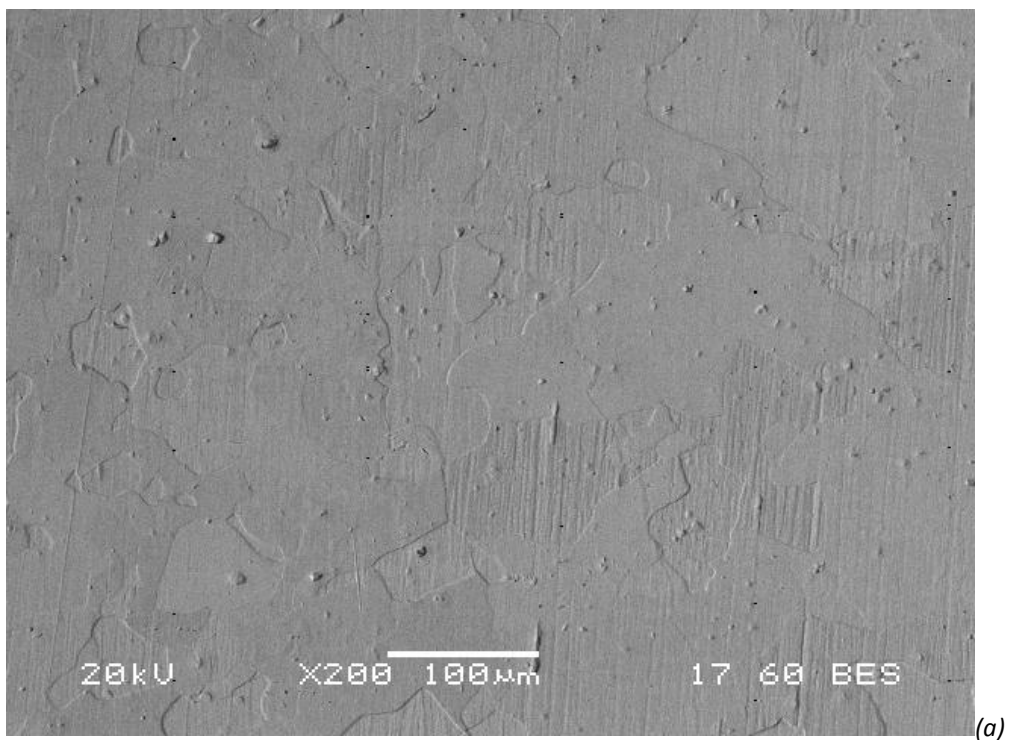
ΔΟΚΙΜΙΟ 20Α:

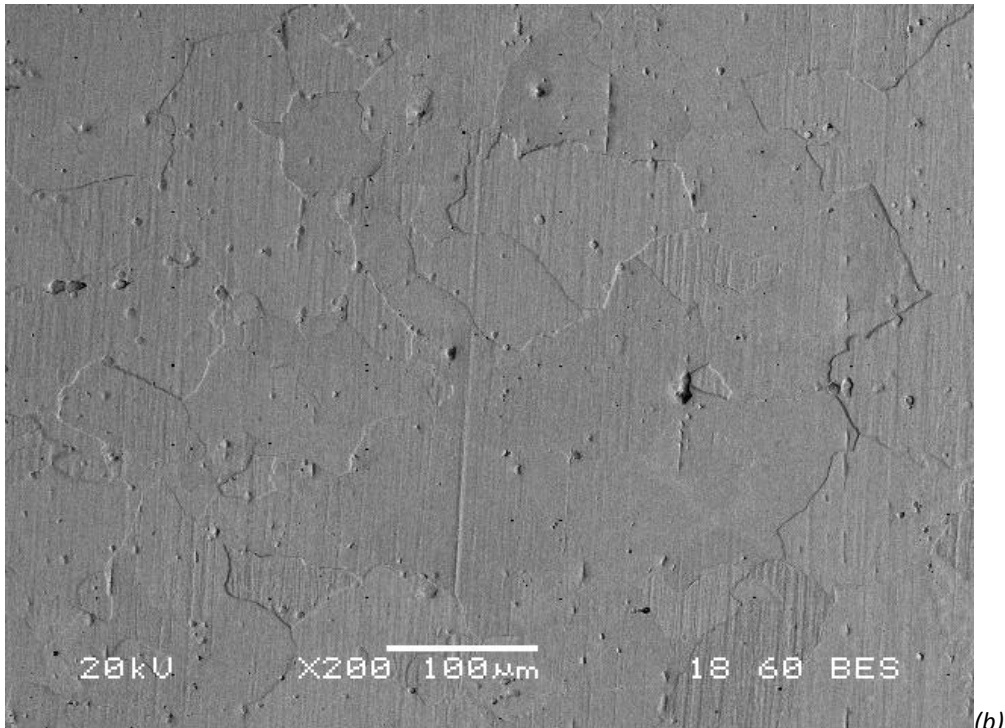


Εικόνα 20: Φωτογραφία σε BES δοκιμίου 40A, σε μεγέθυνση x200, (a) σε περιοχή του μετάλλου βάσης και (b) με δειγματοληπτικές μετρήσεις διαμέτρων των κόκκων.

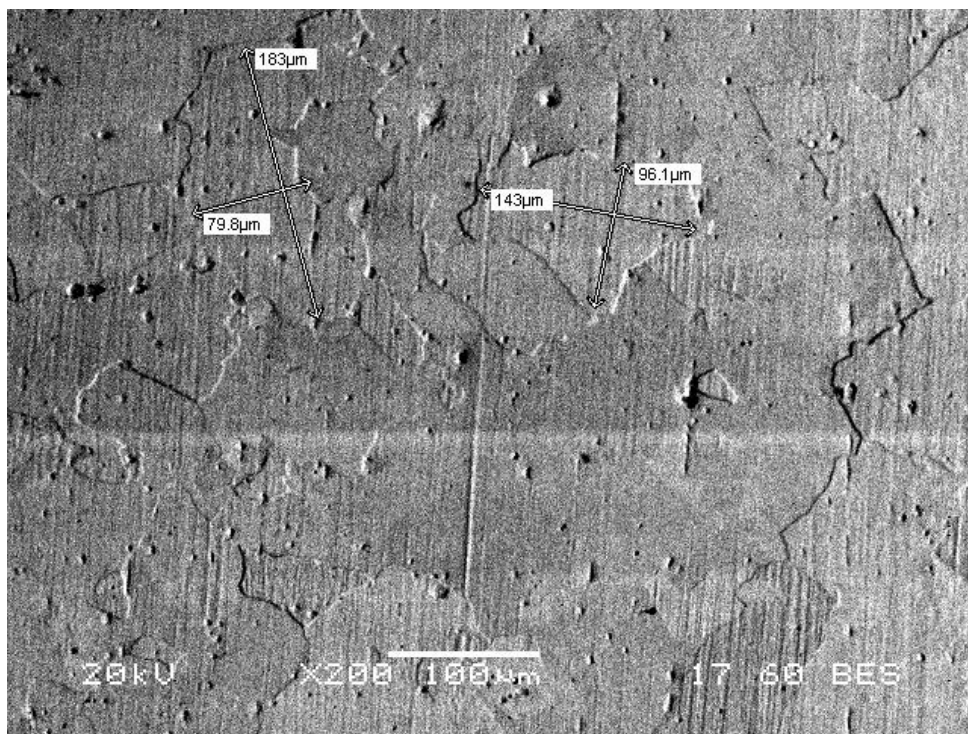


Εικόνα 21: BES, x100 της διεπιφάνειας του μετάλλου βάσης – ΘΕΖ (δεξιά και αριστερά αντίστοιχα στη φωτογραφία) του δοκιμίου 40Α.



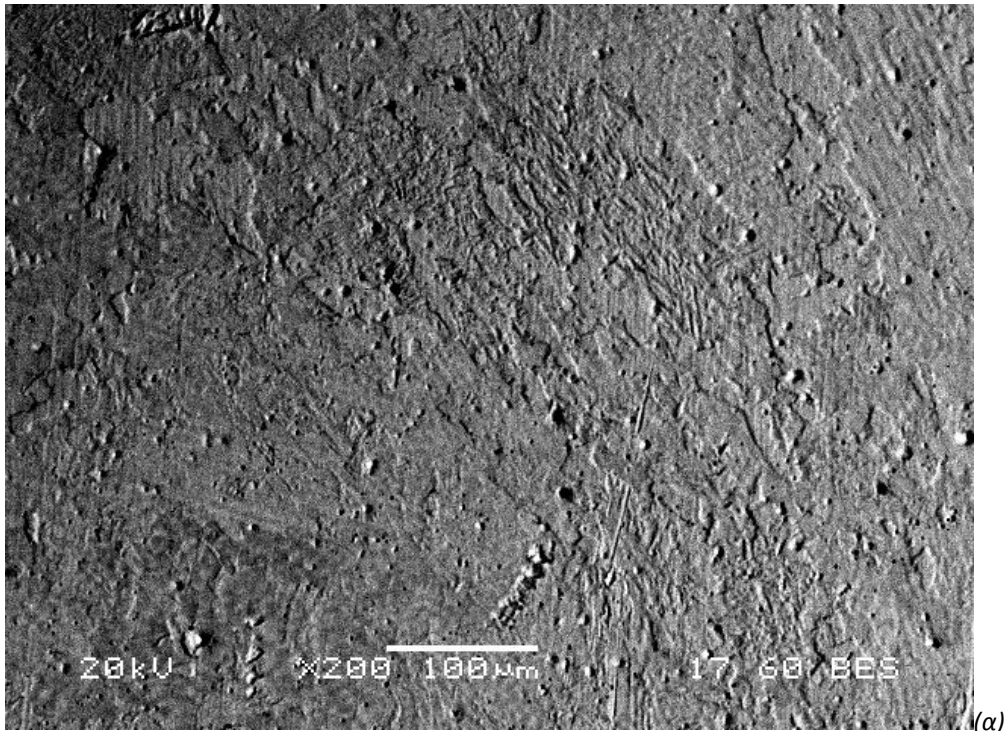


(b)

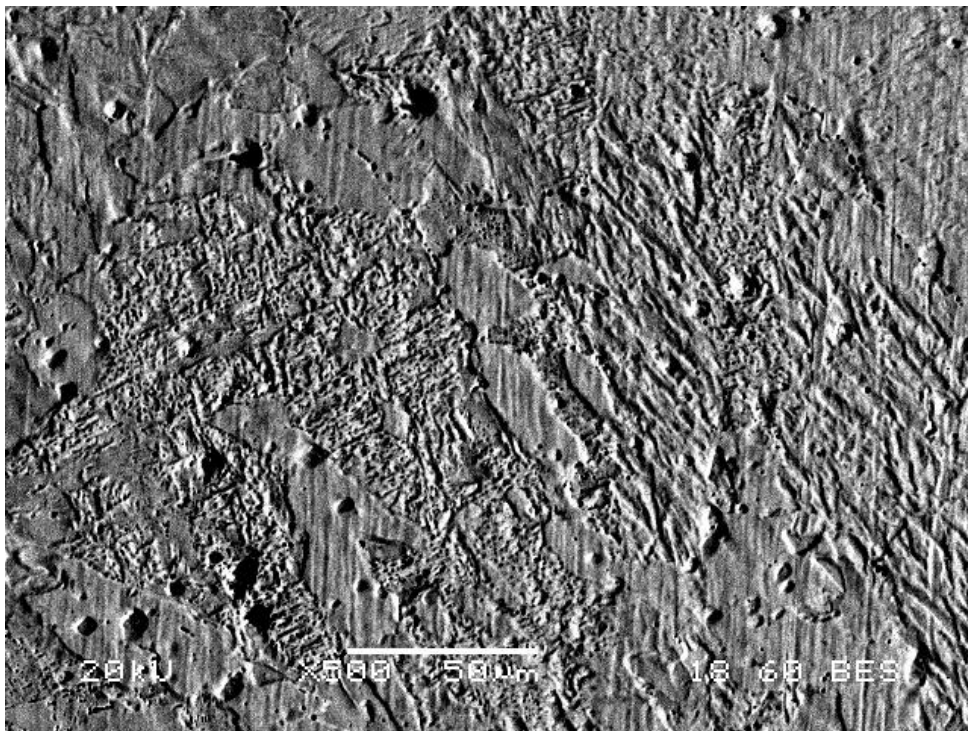


(c)

Εικόνα 22: (a) και (b) ΘΕΖ του δείγματος 40Α, ΒΕS, x200, (c) ενδεικτικές μετρήσεις διαμέτρων κόκκων αυτής.



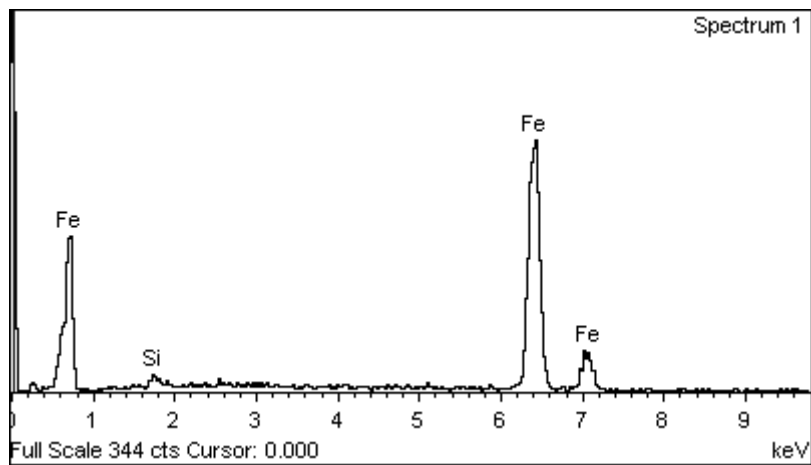
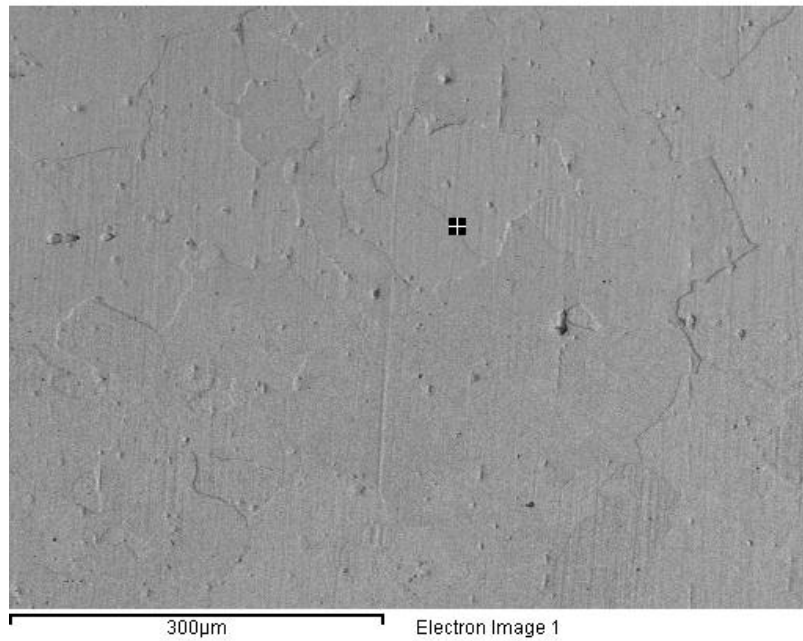
(a)



(b)

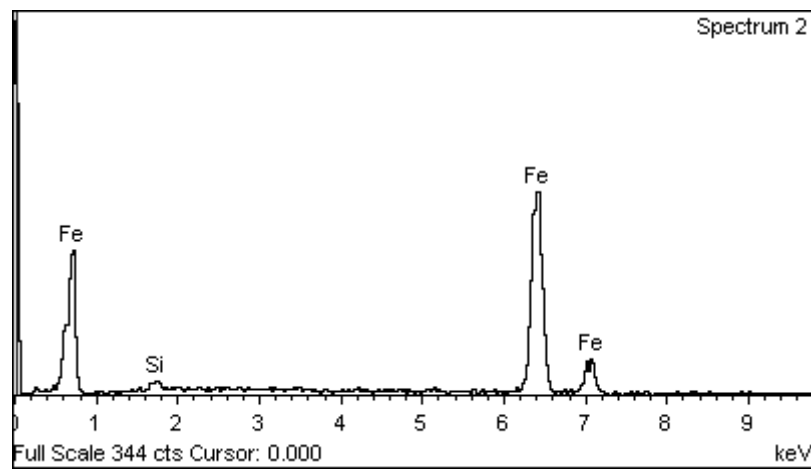
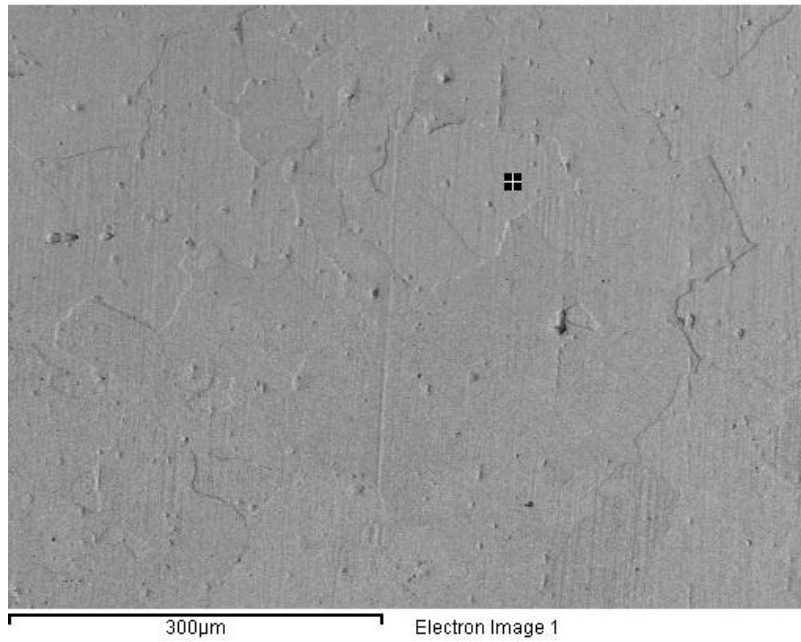
Εικόνα 23: Δενδριτικές ετερογενώς προσανατολισμένες οικογένειες στη ζώνη τήξης του δοκιμίου 40A, BES, σε (a) x200 και (b) x500 μεγέθυνση.

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



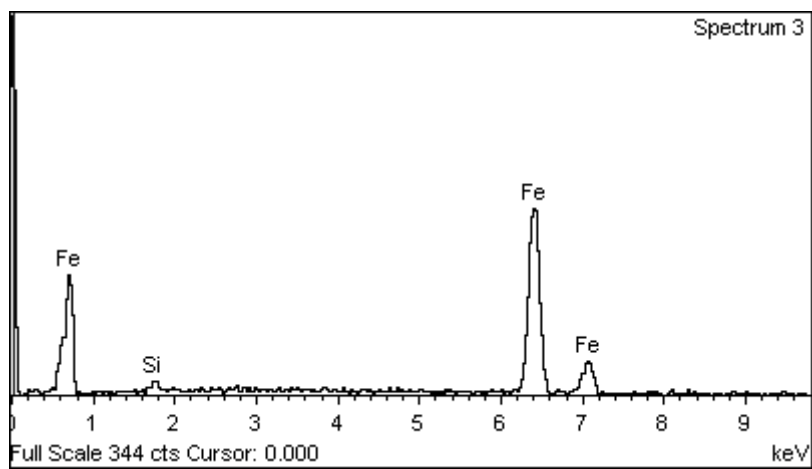
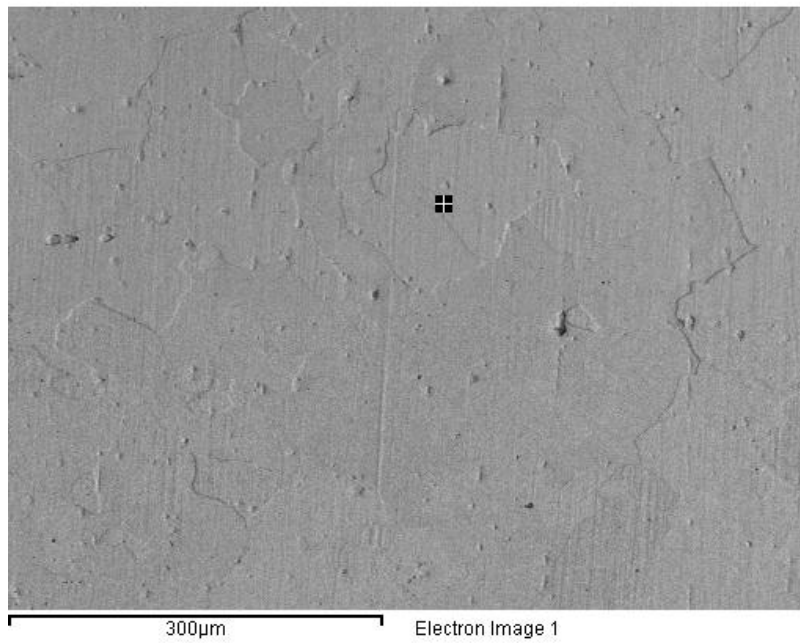
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.38	2.70
Fe K	98.62	97.30
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε εσωτερικό κόκκου:



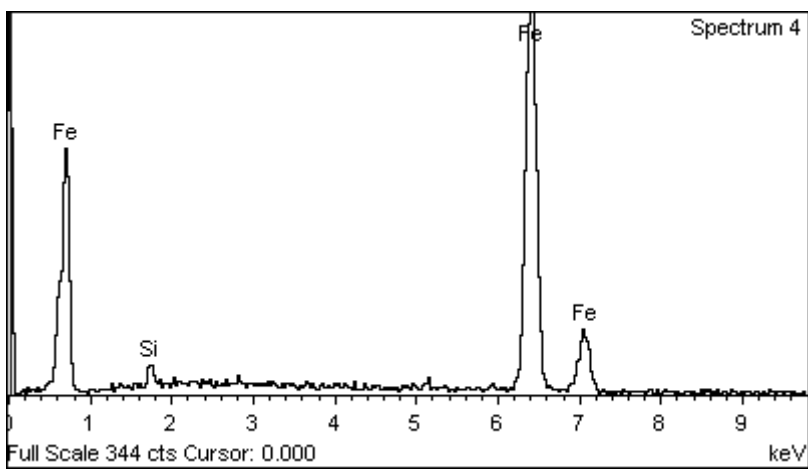
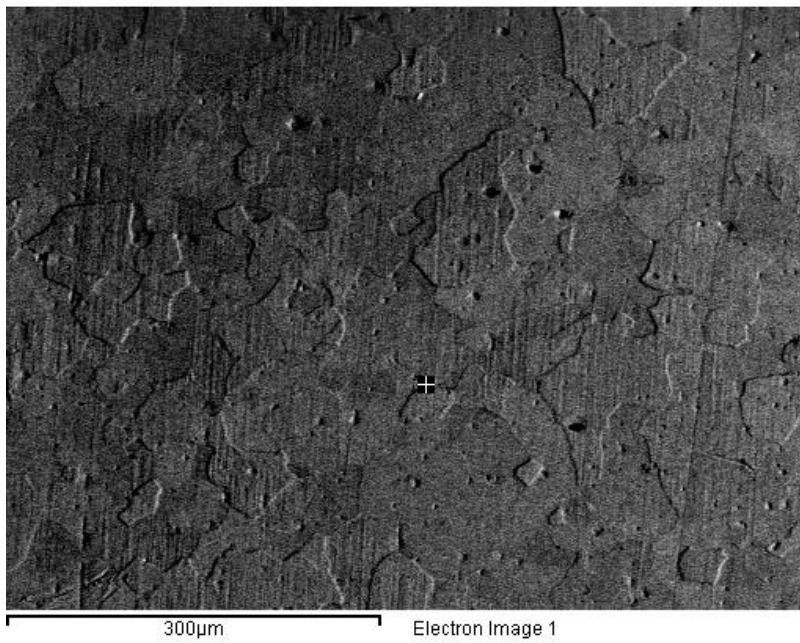
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.38	2.71
Fe K	98.62	97.29
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



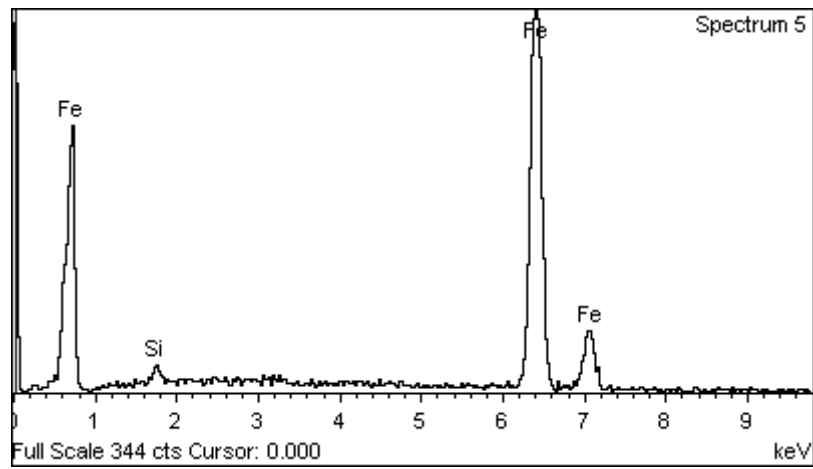
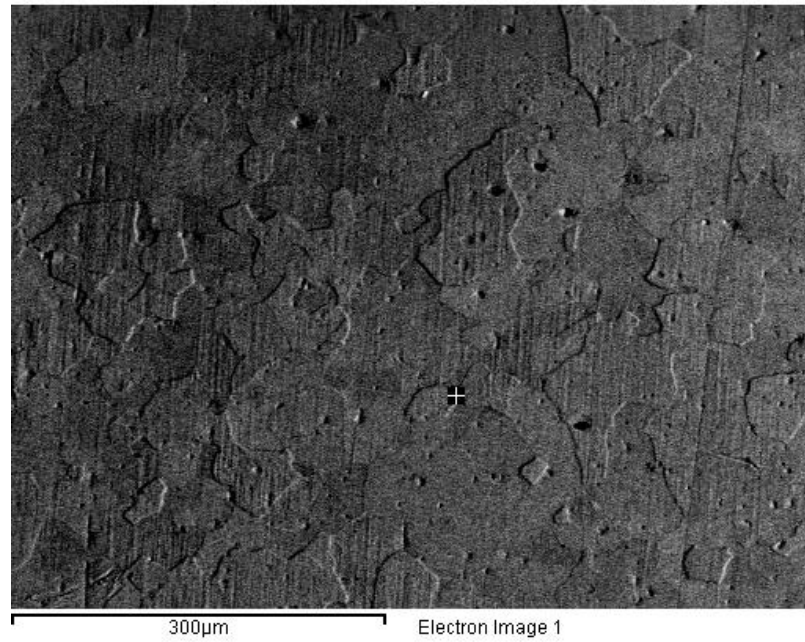
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.44	2.83
Fe K	98.56	97.17
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



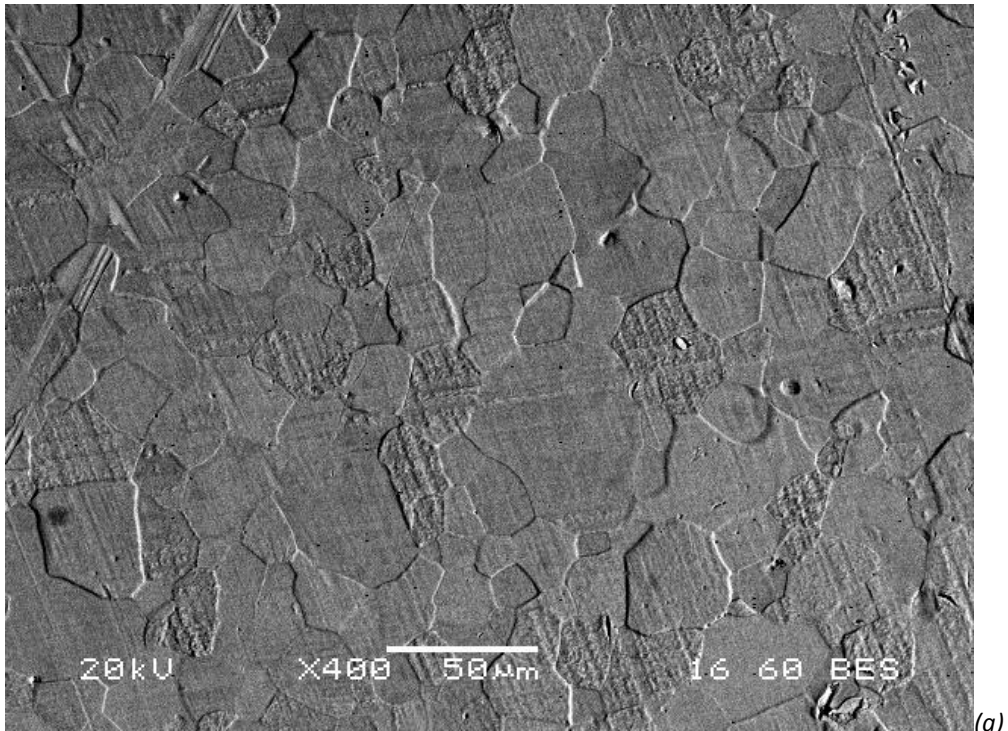
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.73	3.39
Fe K	98.27	96.61
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε κεντρικό σημείο στο εσωτερικό κόκκου:

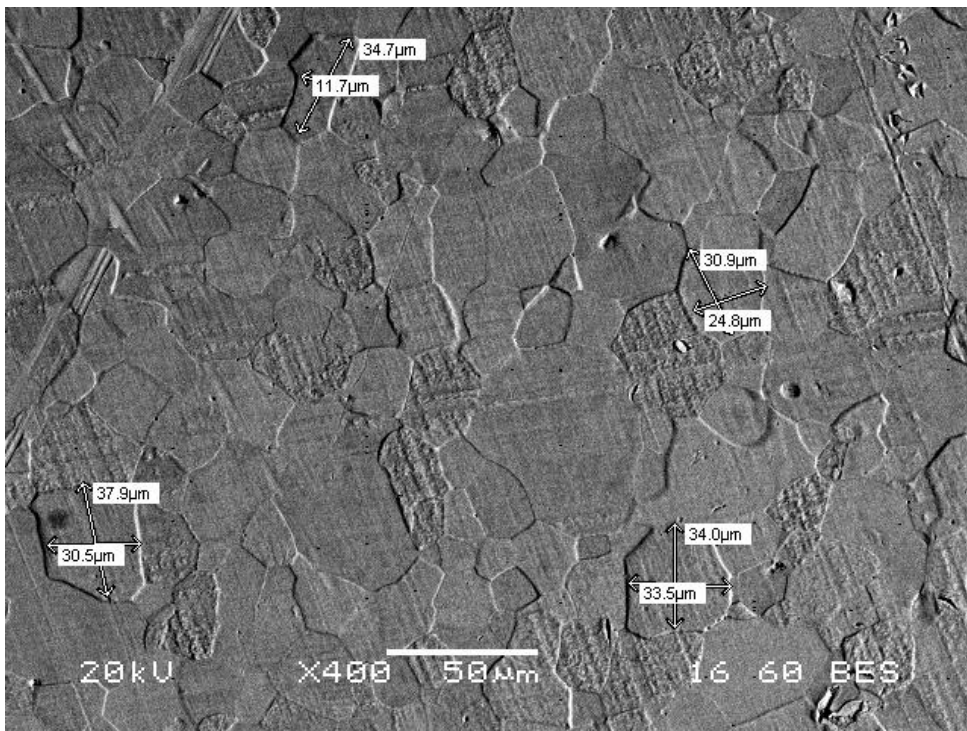


Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.20	2.35
Fe K	98.80	97.65
Totals	100.00	

ΔΟΚΙΜΙΟ 50A:

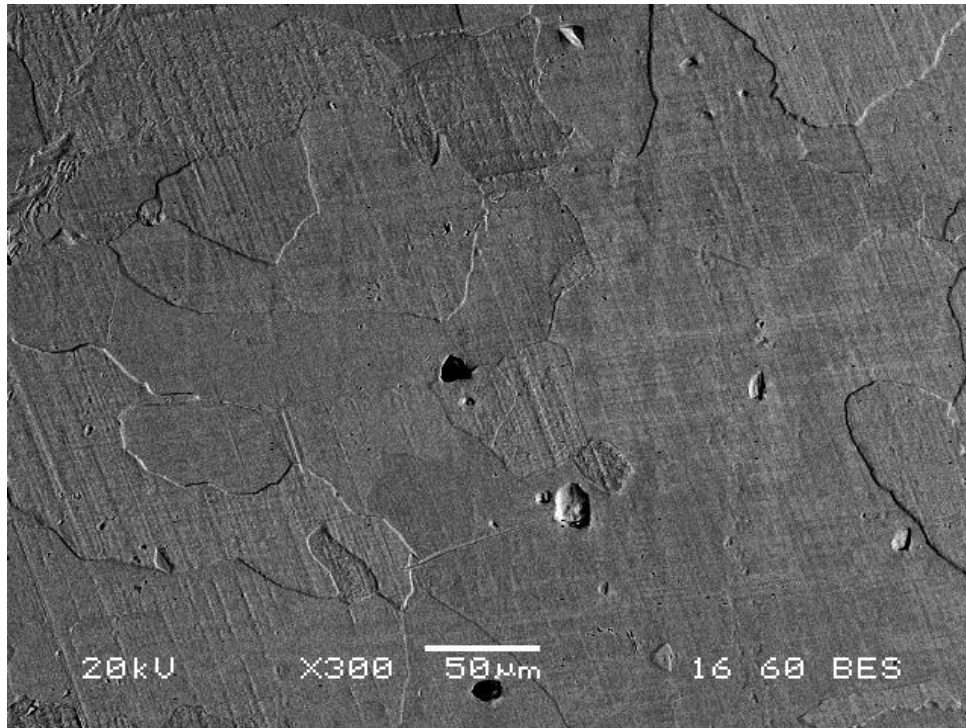


(a)

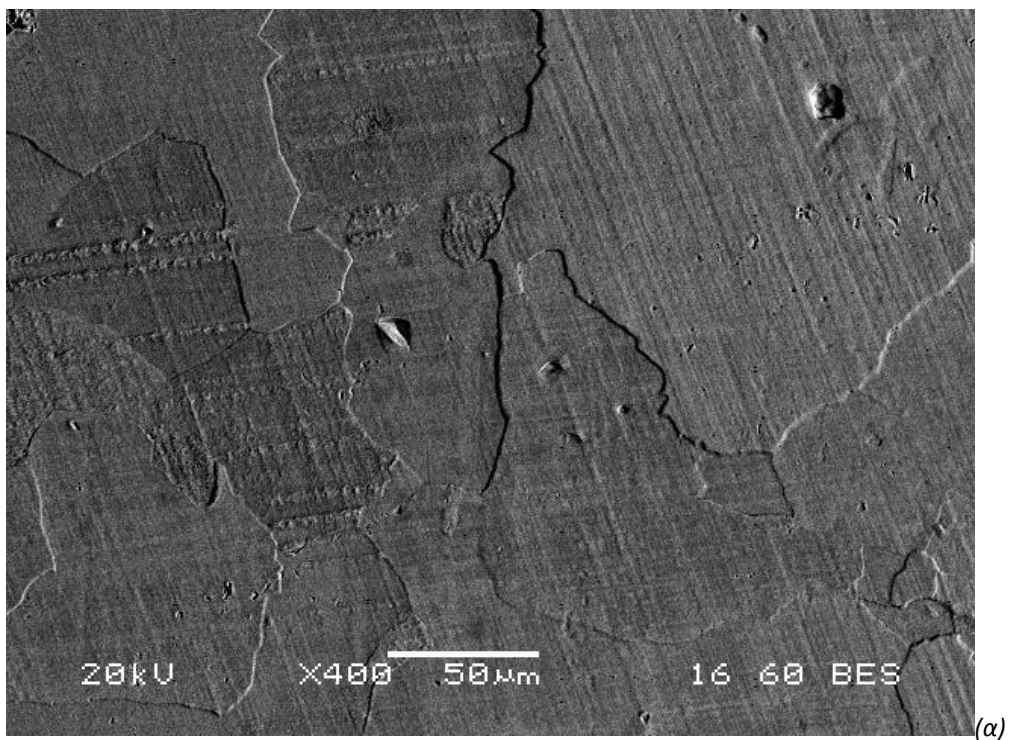


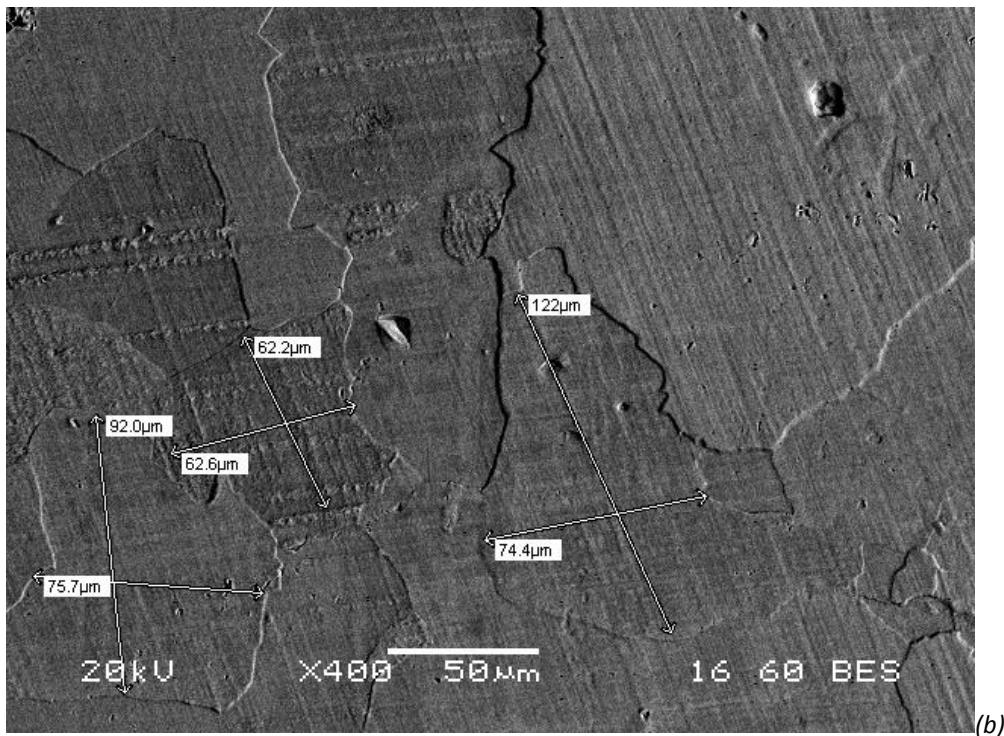
(b)

Εικόνα 24: (a) δοκίμιο 50A, BES, x400, περιοχή μετάλλου βάσης, (b) στην ίδια περιοχή δειγματοληπτικές μετρήσεις μεγέθους κόκκων.



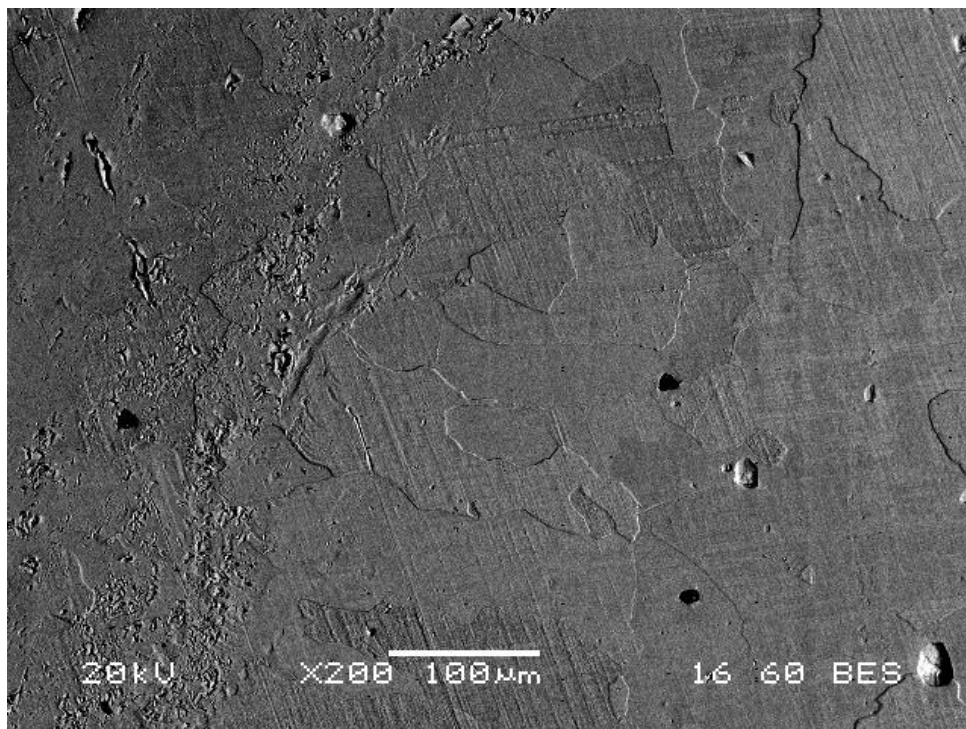
Εικόνα 25: ΘΕΖ του δοκιμίου 50Α, ΒΕΣ, μεγέθυνση x300.



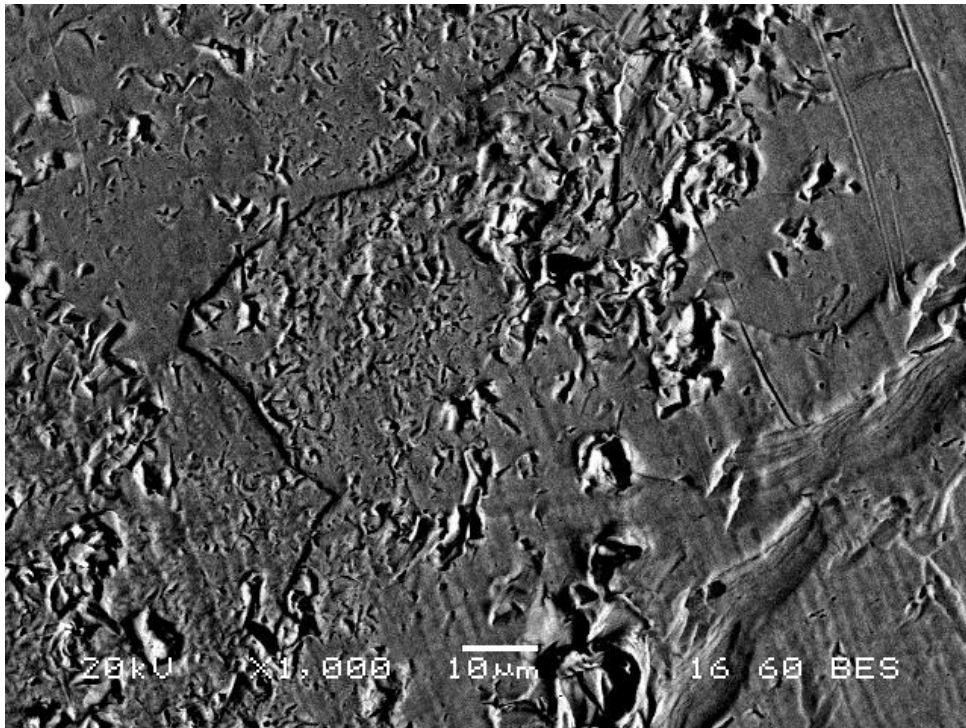


(b)

Εικόνα 26: (a) περιοχή ΘΕΖ δοκιμίου 50A (b) και δειγματοληπτικές μετρήσεις ορισμένων εμφανώς μεγεθυμένων κόκκων στην ίδια περιοχή. Και οι δύο φωτογραφίες λήφθηκαν με BES, σε μεγέθυνση x400.

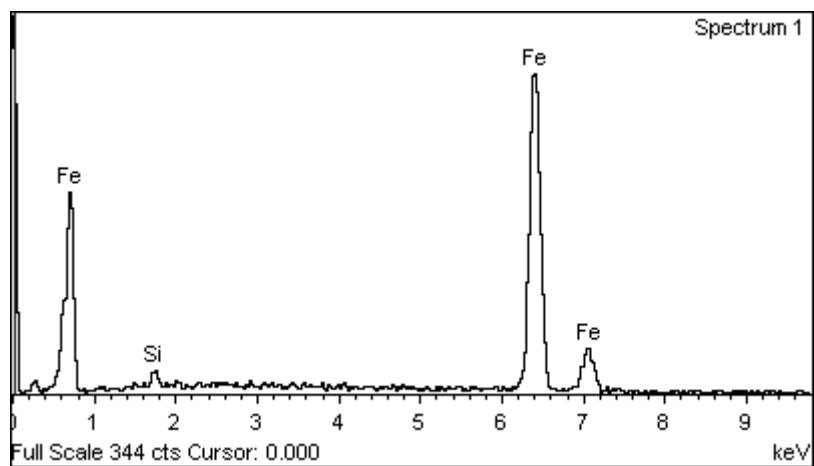
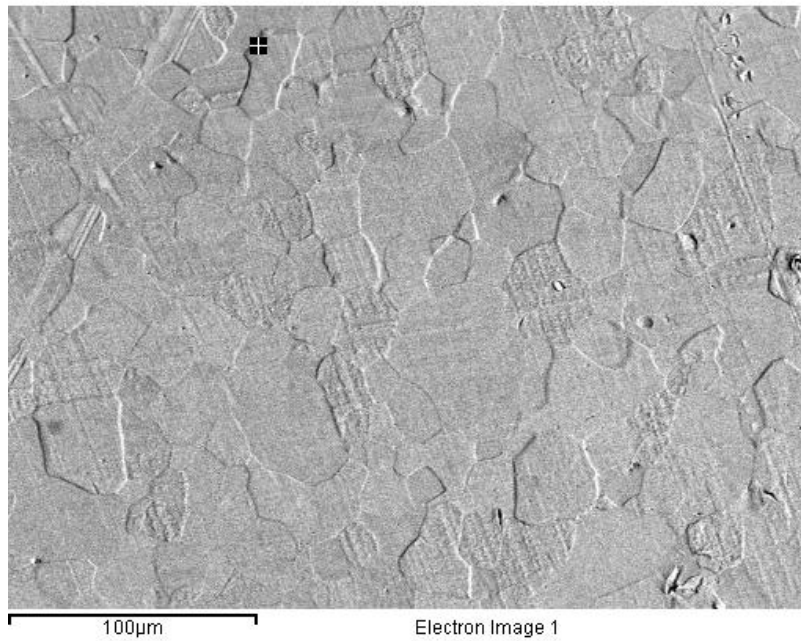


Εικόνα 27: Διεπιφάνεια ΘΕΖ και ζώνη τήξης στο δοκίμιο 50A, BES, x200. Οι δενδρίτες που μαρτυρούν την ζώνη τήξης ξεχωρίζουν, σε σχέση με τους ευμεγέθεις κόκκους της ΘΕΖ στο αριστερό τμήμα της φωτογραφίας.



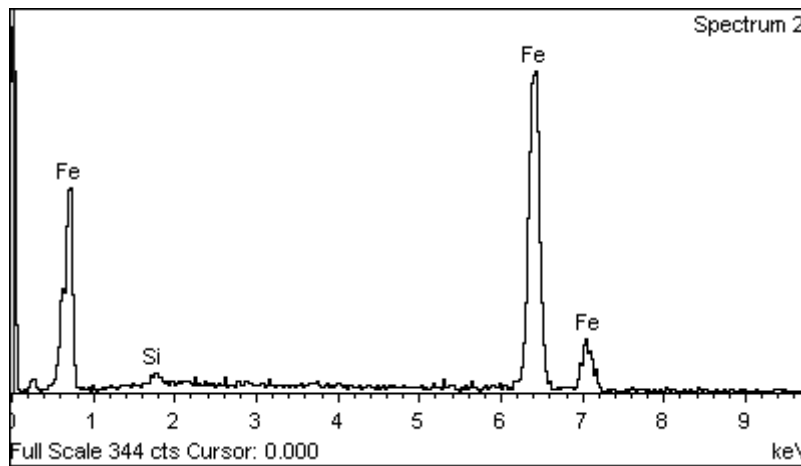
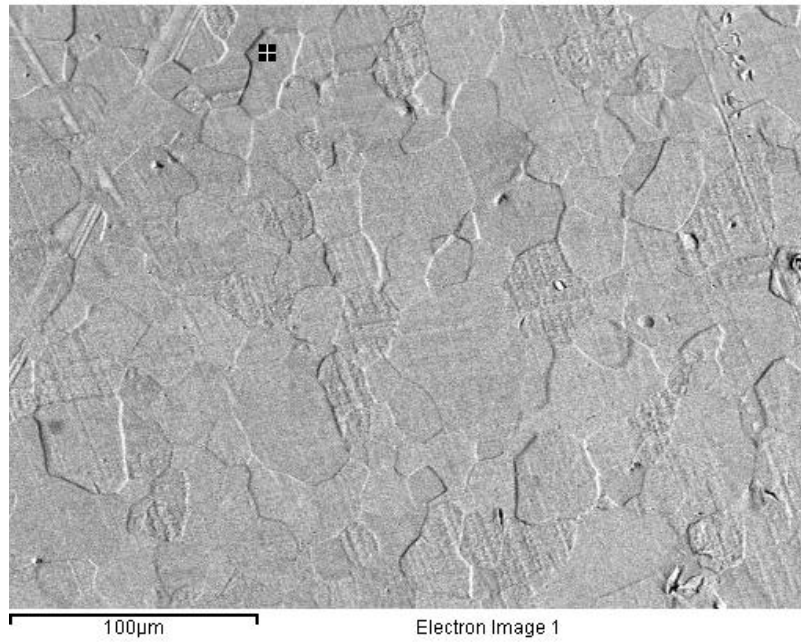
Εικόνα 28: Δοκίμο 50Α, ΒΕΣ, x1000, ζώνη τήξης.

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



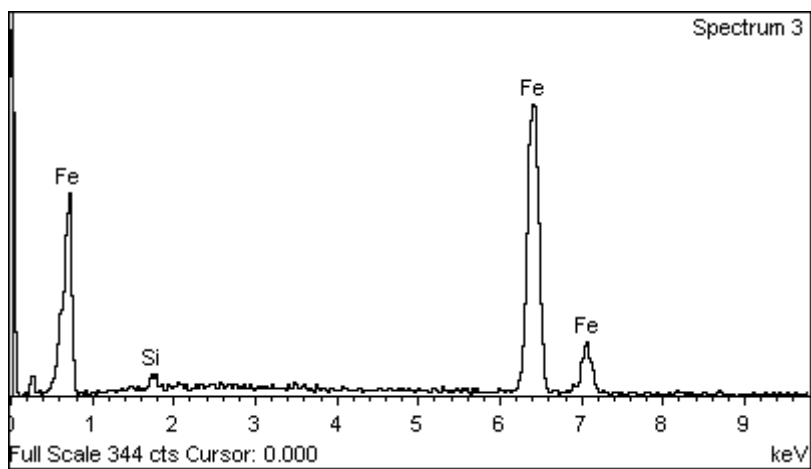
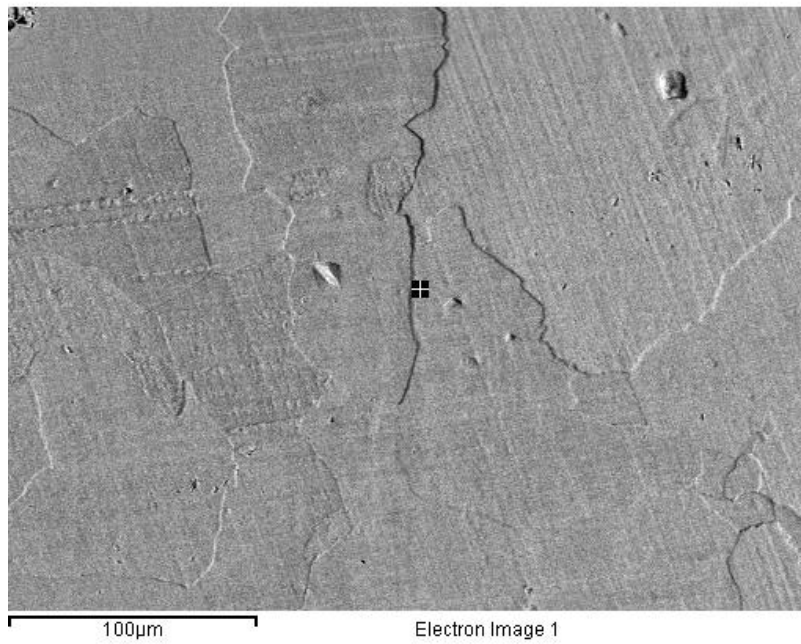
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.88	3.67
Fe K	98.12	96.33
Totals	100.00	

Μέταλλο βάσης, στοιχειακή ανάλυση σε εσωτερικό σημείο κόκκου:



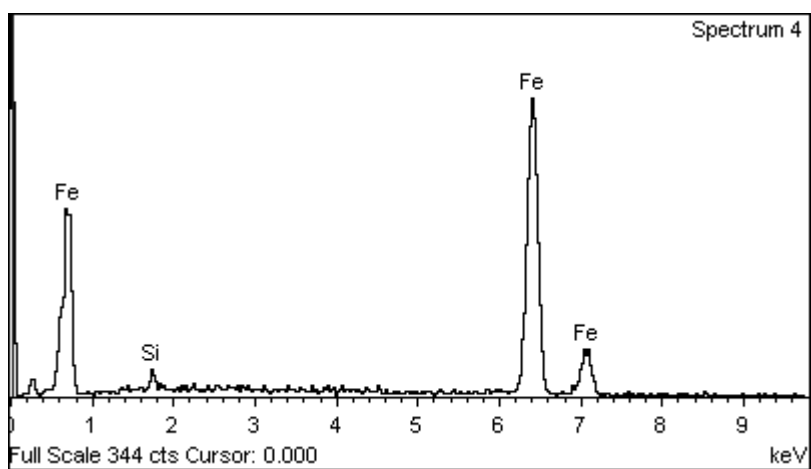
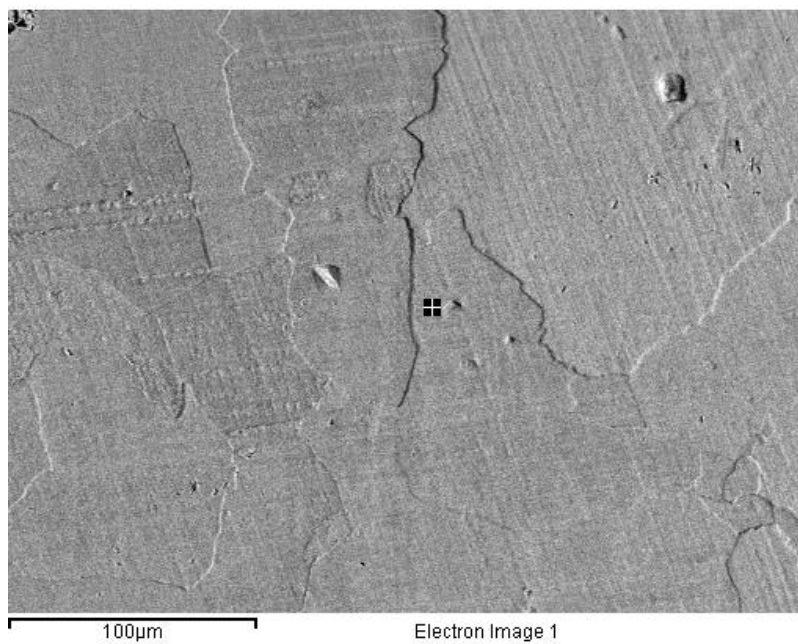
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.02	2.02
Fe K	98.98	97.98
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση πλησίον σε όριο κόκκου:



Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.66	3.26
Fe K	98.34	96.74
Totals	100.00	

ΘΕΖ, στοιχειακή ανάλυση σε εσωτερικό σημείο του κόκκου:



Element	Weight%	Atomic%
Si K	2.10	4.10
Fe K	97.90	95.90
Totals	100.00	

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

1. Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, S. O. Kasap, 2^η έκδοση, εκδόσεις Παπασωτηρίου.
2. Οι χάλυβες, Γ. Χ. Βοσνιάκος, Σημειώσεις μεταπτυχιακών μαθημάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2007
3. Μετασηματισμοί Φάσεων, Δρ. Γ. Φούρλαρης, Επ. Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας και Μετασηματισμού Φάσεων ΕΜΠ, Αθήνα 2008, ΜΜΜ, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών.
4. An introduction to Barkhausen noise and it's applications, a paper by Mark Willcox and Todd Mysak, Insight NDT.
5. Ανάπτυξη, προσομοίωση και εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών τεχνικών μη καταστροφικών δοκιμών σε μαγνητικές και μη μαγνητικές μεταλλικές επιφάνειες, Διδακτορική διατριβή του Κοσμά Ν. Κωσταντίνου, Μεταλλουργός Μηχανικός, Αθήνα 2009.
6. Συσχέτιση μικροδομής και μαγνητικών ιδιοτήτων σε μαλακούς χάλυβες, Μπάλλιου Αγγελική-Μαρία, 29 Σεπτεμβρίου 2009.
7. Ηλεκτρονική Μικροσκοπία και Μικροανάλυση, Δρ. Γ.Φούρλαρης, Αθήνα 2007, εκδόσεις ΕΜΠ.
8. Ferrosilicon, Great Soviet Encyclopedia.
9. K. H. J. Buschown et al, ed. Encyclopedia of Materials: Science & Technology, Elsevier, 2001, p.p. 4807 – 4808.
10. Single Ended vs Push Pull: The Deep, Dark Secrets of Output Transformers.
11. John Whincup, News Item Globe & Mail March 3rd, Federal Pioneer BAT, March 1983.
12. Beatty, Stabard Handbook for Electrical Engineers, 11th ed. P. 4 – 111.
13. Les Jump, Transformer Steel & Cores, Federal Pioneer BAT, March 1981.
14. Εισαγωγή στην Μεταλλουργία, την Τεχνολογία & τον Έλεγχο των Συγκολλήσεων, Γεωργίου Δημ. Παπαδημητρίου, Καθηγητή Ε.Μ.Π., Αθήνα 1990.
15. Barkhausen noise: Elementary signals, power laws and scaling relations, Djordje Spasojevic, Srdjan Bukvic, Sava Milosevic and H. Eugene Stanley, Faculty of Physics, University of Belgrade, Serbia, 1996.
16. Barkhausen effect measuring apparatus type MEB-2c, user manual, Mag-Lab s.c., Magnetic NDT, Poland.
17. <http://www.powerweldinc.com/filles/powerweld/catalog/PowerweldCatalog-Section4.pdf>.
18. http://www.dynaweld.com.au/pics/TIG_Gas_Rods.pdf.

Curriculum Vitae (CV)

Surname/First name: Petrakou Zoi

Address: 36 Thoukididou Str., 16452 Argyroupoli, Athens

Telephone: +30 210 9929240

Cell phone: +30 6970365378

E-mail: zoepetrakou@yahoo.gr

Nationality: Hellenic

Date of birth: 5 of November 1986

Place of birth: Rhodes

Gender: Female

Studies: 2001 -2004 in the 1st Secondary School in Ialysos, Rhodes. Graduation score 17.7/20.

Graduated on March, 2010 from the School of Mining and Metallurgical Engineering of the National Technical University of Athens (Master degree), with specialization in Materials Science and Engineering, with the score of 8,14/10.

Post – graduate studies on Science and Technology of Materials, Chemical Engineers Department, National Technical University of Athens. Graduation: July, 2012.

Personal skills and competences: Lower Diploma from University of Cambridge in English.

Proficiency Diploma from University of Michigan in English. Excellent level of reading, listening and speaking skills.

Mittelstufe Diploma in German from Goethe Institut. Good level of reading, listening and speaking skills.

HSK Basic Diploma in Chinese (mandarin dialect) from Hanban/ Confucius Institute and the HSK Center of Beijing Language and Culture University. Score: A. Studies for 6 years and they're ongoing.

Satisfactory knowledge of use of Microsoft Office (Power Point, Excel, Word ect). Ability of quick typing.

2D & 3D Drawing, with the use of AutoCAD (2008).

Work experience:

SIDENOR S.A., a steel products manufacturing Company in Thessaloniki, Greece for a month (15 of July 2008 to 15 of August 2008) on the project "Mechanical and geometrical characterization of steel products".

Publications :

"Determination of the degree of cold working in low carbon steel (mild steel) with the use of the method of Barkhausen Noise Analysis", Magnetic Measurements Conference, September 12 – 15, 2010, Prague, Czech Republic.

Personal interests:

Kendo – iaido –aikido –karate (Japanese martial arts)

Jogging

Study of the Chinese language - Calligraphy

Cinema

Literature

Music - self-taught playing classic guitar

Travels

References:

Professor E. Hristoforou, Laboratory of Physical Metallurgy, National TU of Athens, Greece, eh@metal.ntua.gr

