

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : 'ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER ΚΑΙ
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ'**

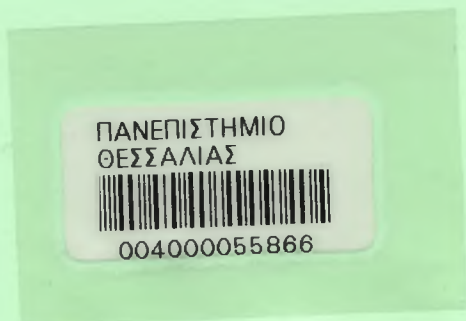
ΦΟΙΤΗΤΗΣ : ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΓΡ. Ν. ΧΑΙΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΣ , Επικουρος Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ 10 - 6 - 1996



αφ. εισ. 35 Π. Α.



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 1528/1
Ημερ. Εισ.: 12-09-1997
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
1996
ΒΛΑ



- ΠΕΡΙΛΗΨΗ -

Η τεχνική συγκόλλησης με laser είναι μια καινούργια μέθοδος που βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας στον Ελληνικό χώρο. Έτσι θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνει μια μελέτη της επιρροής της συγκόλλησης laser πάνω στις ιδιότητες των παραγόμενων υλικών, περισσότερο από την πλευρά της μεταλλογνωσίας, ώστε να πεισθεί ο ακαδημαϊκός και ο βιομηχανικός κλάδος για την δυνατότητα ανάπτυξης της τεχνικής συγκόλλησης με laser .

Εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν έχουν θεσπιστεί προδιαγραφές για την επιλογή των συνθηκών έπρεπε να βρεθούν εκείνες οι συνθήκες οι οποίες να δίδουν στη συγκόλληση του χάλυβα D36 την πλήρη διείσδυση, την μικροδομή και τις ιδιότητες που επιθυμούνται. Εξετάστηκαν 43 διαφορετικές συνθήκες και με βάση τα διάφορα κριτήρια επιλογής επιλέχθηκαν επτά. Έγινε μελέτη της μικροδομής των επιλεγμένων δοκιμίων και χαρτογράφηση της μικροδομής στις διάφορες περιοχές της συγκόλλησης. Κατόπιν έγινε η παραμετρική ανάλυση και η μελέτη της επιρροής των διαφόρων παραγόντων πάνω στη συγκόλληση laser. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού του θερμοκρασιακού πεδίου, τα οποία κωδικοποιήθηκαν σε γλώσσα Fortran για την ευκολότερη χρησιμοποίησή τους. Πάρθηκαν τα θερμοκρασιακά πεδία και έγινε σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά. Η ανακάλυψη σφαλμάτων στις συμβατικές μεθόδους αλλά και τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την εκτέλεση των συγκολλήσεων laser, διαπιστώθηκαν, εξετάστηκαν και προτάθηκαν λύσεις για την επίλυσή τους.

Το συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι οι συγκολλήσεις laser δεν είναι ένας αναπτυγμένος κλάδος και χρειάζεται αρκετή μελέτη και συγκέντρωση όλων των εργασιών που έχουν γίνει τόσο από πλευράς μελέτης της μικροδομής όσο και από την σκοπιά της παραμετρικής ανάλυσης. Η πραγματοποίηση της συγκόλλησης laser για την ένωση των δύο ελασμάτων είναι αρκετά δύσκολη, όταν όμως πραγματοποιηθεί τότε κάνοντας την σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους, φαίνεται ότι τα πλεονεκτήματα είναι αρκετά. Την παραμετρική ανάλυση που έγινε υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησής και για διαφορετικά υλικά με παρόμοια χημική σύσταση και με διαφορετικό πάχος ελάσματος. Με την ανάπτυξη των θερμοκρασιακών μοντέλων υπάρχει η εκ των προτέρων δυνατότητα εκτίμησης της διείσδυσης και του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης.

- ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ -

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απονεύμω στον επιβλέπων επίκουρο καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ.κ Γρ. Ν. Χαιδεμενόπουλο για την συμπαράσταση, την διάθεση και την καθοδήγησή του καθ' όλο το διάστημα εκπλήρωσης της μελέτης, καθώς και για την μεγάλη προσπάθεια που έκανε για να προβληθεί η εργασία τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στον βιομηχανικό χώρο. Επίσης θα πρέπει να απονεμηθούν ιδιαίτερες ευχαριστίες στην Άννα Ζερβάκη, υπεύθυνο της μονάδας laser της EBETAM, για την βοήθεια που προσέφερε στην εκπλήρωση της διπλωματικής εργασίας, αφού χωρίς την βοήθειά της δεν θα ήταν δυνατή η διεκπεραίωσή της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Μηχανικών Δοκιμών της EBETAM για την άμεση βοήθεια που παρείχαν.

Στους συμφοιτητές μου Αντώνη Κατσαμά και Αποστόλη Βασιλάκο πολλά ευχαριστώ για την αμέριστη βοήθεια αλλά και την άψογη συνεργασία την οποία είχαμε κατά την διάρκεια εκτέλεσης της μελέτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Υλικών για την συνεργασία του και ιδιαίτερα την κα Ελεάνα Παππά.

Τέλος ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απονεύμω στους μηχανικούς και εργαζόμενους των Ελληνικών Ναυπηγείων του Σκαραμαγκά για την συμπαράσταση και το ενδιαφέρον που έδειξαν κατά την παρουσία μου στα ναυπηγεία. Ευχαριστώ και τους καθηγητές της επιτροπής αξιολόγησης κ.κ. Γ.Πετρόπουλο και κ.κ Β.Μποντόζογλου για το ενδιαφέρον και την συμπαράσταση που παρείχαν.

- ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ -

■ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 1 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΝΩ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ LASER

■ 1.1 Εισαγωγή	17
■ 1.2 Συντελεστής τήξης.....	22
■ 1.3 Θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας.....	23
■ 1.4 Διατάξεις της κατεργασίας laser	25
■ 1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την συγκόλληση laser	28
■ 1.5.1 Ισχύς	28
■ 1.5.2 Πόλωση	30
■ 1.5.3 Μήκος κύματος	30
■ 1.5.4 Ταχύτητα συγκόλλησης	31
■ 1.5.5 Σημείο εστίασης	33
■ 1.5.6 Επιρροή ιδιοτήτων του υλικού	34
■ 1.6 Μέγιστη δυνατή διείδυση συγκόλλησης και καθαρότητα της ζώνης τήξης ...	36
■ 1.7 Ιδιότητες των παραγόμενων υλικών	37
■ 1.8 Εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος	38
■ 1.9 Μεταλλογνωσία της συγκόλλησης	39
■ 1.9.1 Ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας	39
■ 1.9.2 Στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης.....	40
■ 1.9.3 Αλλαγές στη μικροδομή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης	44
■ 1.9.4 Ρηγμάτωση της λίμνης συγκόλλησης κατά την στερεοποίηση	44
■ 1.9.5 Μετασχηματισμοί φάσεων - μικροδομή του χάλυβα D36	46
■ 1.9.6 Μικροδομή και μετασχηματισμοί φάσης στη λίμνη συγκόλλησης	48

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 2 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

■ 2.1 Εισαγωγή	51
■ 2.2 Συμβατικές συγκολλήσεις	51
■ 2.2.1 Μετωπικές συγκολλήσεις	53
■ 2.2.2 Συγκόλληση skip - back - step	53
■ 2.2.3 Συγκολλήσεις με διαμήκεις ενισχύσεις	54
■ 2.2.4 Συγκολλήσεις με προένταση	54
■ 2.2.5 Μετρήσεις θερμοκρασίας	54
■ 2.2.6 Μετρήσεις παραμένουσων τάσεων	55
■ 2.2.7 Μετρήσεις παραμορφώσεων	55
■ 2.3 Συγκολλήσεις LASER	56
■ 2.3.1 Εκτέλεση πειραματικών περασμάτων συγκολλήσεων laser	56
■ 2.3.2 Μέτρηση της ακτίνας της δέσμης	58
■ 2.3.3 Εκτέλεση ραφής συγκόλλησης laser- Τρόπος πρόσδεσης	60
■ 2.4 Τεστ εφελκυσμού	61
■ 2.4.1 Θεωρητική βάση του τεστ εφελκυσμού	61
■ 2.4.2 Πραγματικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων	62
■ 2.4.3 Εκτέλεση του τεστ εφελκυσμού	63
■ 2.5 Τεστ σκληρομέτρησης	65
■ 2.5.1 Θεωρητική βάση της σκληρομέτρησης	65
■ 2.5.2 Μέθοδος Vickers	65
■ 2.5.3 Μέθοδος Rockwell	66
■ 2.5.4 Εκτέλεση των σκληρομετρήσεων	67
■ 2.6 Μεταλλογραφίες	69
■ 2.6.1 Εισαγωγή	69
■ 2.6.2 Εκτέλεση μεταλλογραφιών	69

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 3 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

■ 3.1 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων	71
■ 3.2 Αποτελέσματα του τεστ εφελκυσμού	74
■ 3.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων δοκιμίου Νο1	74
■ 3.3 Μεταλλογραφικός έλεγχος	79
■ 3.3.1 Μακροσκοπία συμβατικών συγκολλήσεων	79
■ 3.3.2 Οπτική μικροσκοπία συμβατικών συγκολλήσεων	82
■ 3.4 Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων μετωπικών συγκολλήσεων (περίληψη ΠΑΒΕ)	
■ 3.4.1 Κατανομή θερμοκρασίας - Παραμένουσες τάσεις	87
■ 3.5 Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων συγκολλήσεων με προένταση	91
■ 3.6 Ανάλυση του σφάλματος που παρουσιάστηκε στο δοκίμιο Νο4 των συμβατικών συγκολλήσεων.....	91
■ 3.6.1 Αποτελέσματα μεταλλογραφίας	92
■ 3.6.2 Αποτελέσματα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας	94
■ 3.6.3 Αιτίες και τρόποι αποφυγής σφαλμάτων	95

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 4 : ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER

■ 4.1 Εισαγωγή	96
■ 4.2 Έλεγχος μακροδομής - Βήμα 1 ^ο	96
■ 4.3 Προφίλ σκληρότητας για τα επιλεγμένα δοκίμια	103
■ 4.4 Σύγκριση των μεγεθών της Θ.Ε.Ζ και της λίμνης συγκόλλησης	107
■ 4.5 Οπτική μικροσκοπία των δοκιμίων B5-B8-B9-B18-B24-B27-B28	109
■ 4.5.1 Δοκίμιο B5	109
■ 4.5.2 Δοκίμιο B8	109
■ 4.5.3 Δοκίμιο B9	111
■ 4.5.4 Δοκίμιο B18	112
■ 4.5.5 Δοκίμιο B24	115
■ 4.5.6 Δοκίμιο B27	116

■ 4.5.7 Δοκίμιο B28	117
■ 4.6 Ανάλυση της μικροδομής κατά την συγκόλληση laser - Συμπεράσματα	118
■ 4.6.1 Μελέτη των δοκιμίων της σειράς A (σημείο εστίασης +1mm)	118
■ 4.6.2 Ανάλυση των φαινομένων που παρατηρούνται κατά την συγκόλληση laser	122
■ 4.6.3 Χαρτογράφηση της μικροδομής της συγκόλλησης laser	125
■ 4.7 Εφαρμογή της τεχνικής laser για την συγκόλληση δύο ελασμάτων-Δημιουργούμενα προβλήματα	127

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 5 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER

■ 5.1 Πειραματικά αποτελέσματα	129
■ 5.2 Παραμετρική ανάλυση - Συμπεράσματα	131

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 6 : ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER

■ 6.1 Εισαγωγή	142
■ 6.2 Τρισδιάστατο μοντέλο θερμοκρασιακής κατανομής	142
■ 6.2.1 Ισοζύγιο ενέργειας της συγκόλλησης laser	142
■ Μαθηματική ανάλυση του προβλήματος της μετάδοσης θερμότητας στη συγκόλληση laser	144
■ 6.3 Εφαρμογή του τρισδιάστατου μοντέλου στη συγκόλληση του χάλυβα D36 και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα	149
■ 6.4 Μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού θερμοκρασιακής κατανομής	158
■ 6.5 Διάγραμμα ροής του κυρίου προγράμματος.....	162
■ 6.6 Περιγραφή του προγράμματος fortran (dip.for) για το μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο	171
■ 6.7 Εφαρμογή και ανάλυση του μονοδιάστατου μοντέλου	173
■ 6.8 Συμπεράσματα για τα δύο μοντέλα υπολογισμού του θερμοκρασιακού πεδίου...	179

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 7 : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 8 : ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

■ ΕΝΟΤΗΤΑ 9 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

■ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

- Προδιαγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στο τεστ εφελκυσμού των δοκιμίων Νο4 και Νο8 των συμβατικών συγκολλήσεων. Ονομαστικά διαγράμματα εφελκυσμού των δοκιμίων Νο4 - Νο8.
- Πίνακες που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή των σκληροτήτων στις διάφορες κλίμακες
- Προδιαγραφές των χημικών και των χρόνων προσβολής για τα διάφορα υλικά

■ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

- Πειραματικές μετρήσεις πάνω στα δοκίμια των συμβατικών μεθόδων που έγιναν στα εργαστήρια της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας συμπεριλαμβανομένου: Τεστ εφελκυσμού - σκληρομέτρηση - δοκιμή κρούσης

■ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

- Λίστα του προγράμματος fortran (dip.for) για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου. Μονοδιάστατο μοντέλο (1-D)
- Λίστες των προγραμμάτων fortran που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατανομής θερμότητας με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο (3-D)
- Αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων όπως αυτά δόθηκαν με βάση τα προγράμματα . Κάποια από τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των διαγραμμάτων που χρησιμοποιούνται στο 6^ο κεφάλαιο

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1. Πίνακας 1.1 : Πυκνότητες ενέργειας διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης
2. Πίνακας 1.2 : Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή απόδοσης της συγκόλλησης για διάφορες μεθόδους συγκόλλησης
3. Πίνακας 1.3 : Βασικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης laser
4. Πίνακας 1.4 : Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης
5. Πίνακας 1.5 : Συντελεστής τήξης και απορρόφησης για διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση laser
6. Πίνακας 1.6 : Ευαισθησία στη ρηγμάτωση βασικών μεταλλικών κραμάτων
7. Πίνακας 1.7 : Χαρακτηριστικά συγκολλήσεων laser για διάφορα συστήματα κραμάτων
8. Πίνακας 2.1 : Πειραματικά δεδομένα της 1^{ης} σειράς πειραμάτων.
9. Πίνακας 2.2 : Πειραματικά δεδομένα της 2^{ης} σειράς πειραμάτων.
10. Πίνακας 2.3 : Διάμετροι των ακτινών της δέσμης για τις διάφορες συνθήκες
11. Πίνακας 3.1 : Αποτελέσματα μετρήσεων σκληρότητας σύμφωνα με την προδιαγραφή
12. Πίνακας 3.2 : Μετατροπή των τιμών από ονομαστικές σε πραγματικές
13. Πίνακας 3.3 Συνοπτικά αποτελέσματα μετατροπής των ονομαστικών τιμών σε πραγματικές
14. Πίνακας 3.4 : Βοηθητικές μετρήσεις για την εύκολη μετατροπή των ονομαστικών τιμών σε πραγματικές τιμές
15. Πίνακας 3.5 : Συνθήκες μετωπικών συγκολλήσεων
16. Πίνακας 3.6 : Γωνιακή παρανόρφωση
17. Πίνακας 3.7 : Βελτίωση καμπτικών παραμορφώσεων για βελτίωση της επιλεχθείσας μεθόδου για διάφορες μετωπικές συγκολλήσεις
18. Πίνακας 4.1 : Κατανομή δοκιμίων με βάση την μέση σκληρότητα
19. Πίνακας 4.2 : Σύγκριση των μεγεθών της Θ.Ε.Ζ και της λίμνης συγκόλλησης για τα δοκίμια που επιλέχθηκαν από το βήμα 1
20. Πίνακας 5.1 : Πειραματικά αποτελέσματα των παραμέτρων της συγκόλλησης
21. Πίνακας 5.2 : Πειραματικά αποτελέσματα για την διεύθυνση της ζώνης τήξης κατά το πάχος του υλικού
22. Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης για το δοκίμιο B1 στο σημείο (0,01,0,0019,0)

23. Πίνακας 6.2 : Δεδομένα και ιδιότητες για τον χάλυβα D36 και για την συγκόλληση laser
24. Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης για το δοκίμιο B2 στο σημείο όπου $y=0.0017$
25. Πίνακας 6.4 : Πειραματικά αποτελέσματα της 2^{ης} σειράς των συγκολλήσεων (όπως αυτά καταγράφηκαν με την βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου)
26. Πίνακας 6.5 : Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της αναλυτικής λύσης και των πειραμάτων για το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης ($z=0$)
27. Πίνακας 6.6 : Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για την διείσδυση
28. Πίνακας 6.7 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων για την 1^η σειρά δοκιμών (σημείο εστίασης= +1mm)
29. Πίνακας 6.8 : Σύγκριση του μονοδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για τα διάφορα δοκίμια (συγκεκριμένος λόγος $Q/60u$)
30. Πίνακας 6.9 : Ρυθμοί ψύξης για διάφορα δοκίμια σε συνάρτηση με τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας
31. Πίνακας 7.1 : Σύγκριση των μεγεθών της Θ.Ε.Ζ και της λίμνης συγκόλλησης για τις δύο μεθόδους συγκόλλησης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1. Σχήμα 1.1 : Βιομηχανικές εφαρμογές των Nd-YAG Lasers
2. Σχήμα 1.2 : Βιομηχανικές εφαρμογές των CO₂ lasers
3. Σχήμα 1.3 : Γενικές διατάξεις κατεργασίας της συγκόλλησης laser
4. Σχήμα 1.4 : Οι δύο μορφές της συγκόλλησης
5. Σχήμα 1.5 : Ταχύτητα συγκόλλησης σε συνάρτηση με την ισχύ για Ti-6Al-4V και για Eccose C15 Laser
6. Σχήμα 1.6 : Ταχύτητα συγκόλλησης / διείδυση για εφαρμογή σε laser CO₂.
7. Σχήμα 1.7 : Επίδραση της πόλωσης της δέσμης πάνω στη δομή της συγκόλλησης
8. Σχήμα 1.8 : Μορφές συγκολλήσεων εξαρτώμενες από την ταχύτητα
9. Σχήμα 1.9 : Διαγράμματα του δημιουργούμενου προφίλ συναρτήσει της ταχύτητας και του υλικού συγκόλλησης
10. Σχήμα 1.10 : Διάμετρος δέσμης σε συνάρτηση με την απόσταση από τον φακό
11. Σχήμα 1.11 : Θεωρητική θέση του σημείου εστίασης μέσα στο κομμάτι για μέγιστη διείδυση (με σταθερή ισχύ)
12. Σχήμα 1.12 : Θεωρούμενη ζώνη συγκόλλησης
13. Σχήμα 1.13 : Τύποι στερεοποίησης
14. Σχήμα 1.14 : Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της δομής κτά την διάρκεια της στερεοποίησης
15. Σχήμα 1.15 : Μορφές της λίμνης συγκόλλησης για διάφορες ταχύτητες συγκόλλησης σε χάλυβα με χαμηλό ποσοστό άνθρακα
16. Σχήμα 1.16 : Τομή του διαγράμματος Fe-C όπου φαίνεται η περιττική αντίδραση
17. Σχήμα 1.17 : Μια καμπύλη TTT για έναν υποευθηκτοειδή χάλυβα
18. Σχήμα 1.18 : Τυπικές μικροδομές της λίμνης συγκόλλησης σε χάλυβες
19. Σχήμα 1.19 : Βελονοειδής φερρίτης
20. Σχήμα 1.20 : Λαμελική δομή, φερρίτης με ευθηγραμμισμένο μαρτενσίτη
21. Σχήμα 2.1 : Σχηματική παρουσίαση της συγκόλλησης MIG
22. Σχήμα 2.2 : Κατεύθυνση συγκόλλησης και μορφή παραμορφωμένου δοκιμίου
23. Σχήμα 2.3 : Μέθοδος συγκόλλησης Skip-back-Step
24. Σχήμα 2.4 : Συγκόλληση με προένταση

25. Σχήμα 2.5 : Σχηματική μορφή της κατανομής Gauss
26. Σχήμα 2.6 : Σχηματική παράσταση του τρόπου πρόσδεσης για την συγκόλληση ελασμάτων 250x250mm
27. Σχήμα 2.7 : Γεωμετρική μορφή του δοκιμίου εφελκυσμού
28. Σχήμα 2.8 : Πραγματική επιφάνεια θραύσης
29. Σχήμα 2.9 : Γεωμετρική μορφή της μεθόδου Vickers
30. Σχήμα 2.10 : Γεωμετρική μορφή της μεθόδου Rockwell
31. Σχήμα 3.1 : Σκληρομετρήσεις κατά Rockwell B σύμφωνα με την προδιαγραφή
32. Σχήμα 3.3 : Προφίλ σκληρότητας των συμβατικών συγκολλήσεων
33. Σχήμα 3.4 : Ονομαστικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων
34. Σχήμα 3.5 : Διάγραμμα πραγματικών τάσεων παραμορφώσεων
35. Σχήμα 3.6 : Δοκίμιο Νο8 συμβατικών συγκολλήσεων
36. Σχήμα 3.7 : Δοκίμιο Νο8 10 φορές μεγέθυνση
37. Σχήμα 3.8 : Δοκίμιο Νο8 10 φορές μεγέθυνση (διαφορετική περιοχή)
38. Σχήμα 3.9 : Δοκίμιο Νο8 20 φορές μεγέθυνση
39. Σχήμα 3.10 : Δοκίμιο Νο4 συμβατικών συγκολλήσεων
40. Σχήμα 3.11 : Δοκίμιο Νο4 10 φορές μεγέθυνση
41. Σχήμα 3.12 : Δοκίμιο Νο4 20 φορές μεγέθυνση
42. Σχήμα 3.13 : Δοκίμιο Νο4 30 φορές μεγέθυνση
43. Σχήμα 3.14 : Δοκίμιο Νο4- Μέταλλο βάσης (500 X)
44. Σχήμα 3.15 : Δοκίμιο Νο4 - Μέταλλο συγκόλλησης (100 X- 50 X)
45. Σχήμα 3.16 : Δοκίμιο Νο4 - Όρια τήξης (100 X)
46. Σχήμα 3.17 : Δοκίμιο Νο4 -Αρχή της ζώνης τήξης (500X)
47. Σχήμα 3.18 : Δοκίμιο Νο8 -α) Ζώνη τήξης β) λίμνη συγκόλλησης (500 X)
48. Σχήμα 3.19 : Δοκίμιο Νο4 - α) Όρια της ζώνης τήξης β) λίμνη συγκόλλησης (500 X)
49. Σχήμα 3.21 : Κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της συγκόλλησης στο δοκίμιο Νο7
50. Σχήμα 3.22 : Κατανομή της θερμοκρασίας κατά το πλάτος της συγκόλλησης στο μέσο περίπου του δοκιμίου Νο7
51. Σχήμα 3.23 : Μέγιστη καμπτική παραμόρφωση συναρτήση του μήκους των δοκιμίων
52. Σχήμα 3.24 : Καμπτική παραμόρφωση στο δοκίμιο Νο7
53. Σχήμα 3.25 Τοποθεσία δημιουργίας του σφάλματος

54. Σχήμα 3.26 : Οπτική μικροσκοπία του σφάλματος
55. Σχήμα 3.27 : Ηλεκτρονική μικροσκοπία του σφάλματος
56. Σχήμα 4.1 : Περιοχές συγκόλλησης σύμφωνα με την προδιαγραφή του ΕΛΟΤ
57. Σχήμα 4.2 : Μακροφωτογραφία της Α σειράς δοκιμίων
58. Σχήμα 4.3 : Δοκίμιο Β4 - 6x (πλήρης διείσδυση)
59. Σχήμα 4.4 : Δοκίμιο Β5 - 6x (πλήρης διείσδυση)
60. Σχήμα 4.5 : Δοκίμιο Β8 - 6x (πλήρης διείσδυση)
61. Σχήμα 4.6: Δοκίμιο Β9 - 6x (πλήρης διείσδυση)
62. Σχήμα 4.7: Δοκίμιο Β14 - 6x (πλήρης διείσδυση)
63. Σχήμα 4.8 : Δοκίμιο Β17 - 6x (πλήρης διείσδυση)
64. Σχήμα 4.9 : Δοκίμιο Β18 - 6x (πλήρης διείσδυση)
65. Σχήμα 4.10 : Δοκίμιο Β24 - 6x (πλήρης διείσδυση)
66. Σχήμα 4.11 : Δοκίμιο Β27 - 6x (πλήρης διείσδυση)
67. Σχήμα 4.12 : Δοκίμιο Β28 - 6x (πλήρης διείσδυση)
68. Σχήμα 4.13 : Δοκίμιο Β7 - Β23 - 6x ('drop-out')
69. Σχήμα 4.14 : Δοκίμιο Β2 - 6x (ατελής διείσδυση)
70. Σχήμα 4.14 : Προφίλ σκληρότητας για τα δοκίμια Β4 και Β5
71. Σχήμα 4.15 : Προφίλ σκληρότητας για τα δοκίμια Β8 και Β14
72. Σχήμα 4.16 : Προφίλ σκληρότητας για τα δοκίμια Β17 - Β18 - Β24
73. Σχήμα 4.17 : Προφίλ σκληρότητας για τα δοκίμια Β27 - Β28 -Β9
74. Σχήμα 4.18 : Δοκίμιο Β5 - Μικροσκοπικός έλεγχος
75. Σχήμα 4.19 : Δοκίμιο Β8 - Μικροσκοπικός έλεγχος
76. Σχήμα 4.20 : Δοκίμιο Β9 - Έλεγχος της μικροδομής
77. Σχήμα 4.21 : Δημιουργία των διαφόρων φάσεων μέσα στο εσωτερικό ενός κόκκου
78. Σχήμα 4.22 : Δοκίμιο Β18 - α) Μετάβαση από την Θ.Ε.Ζ στη λίμνη συγκόλλησης b)-c)-
d) λίμνη συγκόλλησης
79. Σχήμα 4.23 : Δοκίμιο Β24 -Έλεγχος μικροδομής
80. Σχήμα 4.24 : Μικροδομή του δοκιμίου Β27
81. Σχήμα 4.25 : Μικροδομή του δοκιμίου Β28
82. Σχήμα 4.26 : Δοκίμιο Α4 (σημείο εστίασης = +1mm)
83. Σχήμα 4.27 : Δοκίμιο Α9 -Μεγαλύτερη δυνατή διείσδυση με σημείο εστίασης +1mm
84. Σχήμα 4.28 : Δημιουργούμενη μικροδομή στα δοκίμια με σημείο εστίασης +1mm

85. Σχήμα 4.29 : Δοκίμιο A8 - Μη χρησιμοποίηση προστατευτικού αερίου
86. Σχήμα 4.30 : Δοκίμιο A11 - Χρησιμοποίηση αζώτου ως προστατευτικό αέριο
87. Σχήμα 4.31 : Δοκίμιο B4 α) Ανακρυστάλλωση της Θ.Ε.Ζ β)- γ) Λίμνη συγκόλλησης
88. Σχήμα 4.32 : Χαρακτηριστικές δομές των δοκιμίων B4 - B14 - B17
89. Σχήμα 4.33 : Χαρτογράφηση της μικροδομής που εμφανίστηκε στις διάφορες περιοχές συγκόλλησης
90. Σχήμα 4.34 : Σχηματική παράσταση της διαφυγής μιας μεγάλης ποσότητας της προσπίπτουσας ενέργειας στο περιβάλλον
91. Σχήμα 4.35 : Εφαρμογή συνθηκών όμοιων με αυτές του δοκιμίου B4, για την συγκόλληση δύο διαφορετικών ελασμάτων
92. Σχήμα 5.1 : Διάγραμμα Σημείου Εστίασης - Διείσδυσης για σταθερό λόγο Q/60u
93. Σχήμα 5.2 : Σημείο Εστίασης και επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης
94. Σχήμα 5.3 : Επιρροή του λόγου Q/60u πάνω στη διείσδυση της λίμνης συγκόλλησης
95. Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα Σημείου Εστίασης - πλάτους λίμνης συγκόλλησης για σταθερό λόγο Q/60u
96. Σχήμα 5.5 : Πλάτος της Θ.Ε.Ζ σε συνάρτηση με το σημείο εστίασης και τον λόγο Q/60u
97. Σχήμα 5.6 : Επιρροή του λόγου Q/60u στο πλάτος της λίμνης συγκόλλησης
98. Σχήμα 5.7 : Επιρροή του λόγου Q/60u στο μέγεθος της Θ.Ε.Ζ
99. Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα ποσοστιαίας διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα της δέσμης για ισχύ Q= 1140 Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης
100. Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα ποσοστιαίας διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα της δέσμης για ισχύ Q= 1500 Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης
101. Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα ποσοστιαίας διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα της δέσμης για ισχύ Q= 1680 Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης
102. Σχήμα 5.11 : Διάγραμμα του πλάτους της ζώνης τήξης και της Θ.Ε.Ζ για Q=1500 Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης
103. Σχήμα 5.12 : Επιρροή του μεγέθους της λίμνης συγκόλλησης, του πλάτους της Θ.Ε.Ζ και του λόγου Q/60u στη μέση σκληρότητα της περιοχής συγκόλλησης
104. Σχήμα 6.1 : Ισοζύγιο ενέργειας για την συγκόλληση laser
105. Σχήμα 6.2 : Ανάλυση της συνάρτησης F για την ροή θερμότητας σε ημίαιπρο στερεό και για κινούμενη πηγή θερμότητας
106. Σχήμα 6.3 : Θερμοκρασιακό πεδίο του δοκιμίου B5 καθώς απομακρυνόμαστε κατά την διεύθυνση του πλάτους του ελάσματος

- 107.Σχήμα 6.4 : Θερμοκρασιακό πεδίο του δοκιμίου B5 καθώς κινείται η δέσμη με ταχύτητα 400mm/min, σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές
- 108.Σχήμα 6.5 : Μορφή της λίμνης συγκόλλησης
- 109.Σχήμα 6.6 : Παράδειγμα θερμοκρασιακής κατανομής του δοκιμίου B1
- 110.Σχήμα 6.7 : Παράδειγμα θερμοκρασιακής κατανομής του δοκιμίου B2
- 111.Σχήμα 6.8 : Αιτία απόκλισης του αναλυτικού μοντέλου από την πραγματική λύση στα δοκίμια όπου έχουμε πλήρη διείσδυση
- 112.Σχήμα 6.9 : Η δέσμη laser κινούμενη με ταχύτητα u προς την κατεύθυνση x επάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου
- 113.Σχήμα 6.10 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B4 - $Q/60u= 7,5$
- 114.Σχήμα 6.11 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B5 - $Q/60u= 3,75$
- 115.Σχήμα 6.12 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B8 - $Q/60u= 4,2$
- 116.Σχήμα 6.13 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B9 - $Q/60u= 2,8$
- 117.Σχήμα 6.14 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B17 - $Q/60u= 8,4$
- 118.Σχήμα 6.15 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο A1 - $Q/60u= 1,425$
- 119.Σχήμα 6.16 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο A4 - $Q/60u= 14,25$
- 120.Σχήμα 6.17 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο A9 - $Q/60u= 7,5$
- 121.Σχήμα 6.18 : Σύγκριση του τρισδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης στο σημείο $z=0$
- 122.Σχήμα 6.19 : Σύγκριση του τρισδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για την διείσδυση της λίμνης συγκόλλησης
- 123.Σχήμα 6.20 : Σύγκριση του μονοδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για την διείσδυση της λίμνης συγκόλλησης
- 124.Σχήμα 7.1 : Σύγκριση των προφίλ σκληρότητας μεταξύ των συμβατικών συγκολλήσεων και των συγκολλήσεων laser Μακροσκοπική σύγκριση των δύο μεθόδων συγκόλλησης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική εργασία ήταν μια συνέχεια ενός προγράμματος ΠΑΒΕ, στο οποίο συμμετείχε το Εργαστήριο Υλικών και η EBETAM και ο πρώτος στόχος ήταν να μελετηθούν οι υπάρχουσες συγκολλήσεις - οι οποίες έγιναν με την μέθοδο M.I.G - περισσότερο από την σκοπιά της μεταλλογνωσίας. Έγινε μακροσκοπική και μικροσκοπική μελέτη στα δοκίμια Νο8 και Νο4. Ξεκινώντας από την μελέτη της μακροδομής φαίνεται η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και η λίμνη συγκόλλησης και μπορεί με εύκολο τρόπο να μετρηθεί το μέγεθός τους. Με βάση τις μακροφωτογραφίες και την μελέτη από το στερεοσκόπιο μπορούμε να διαπιστώσουμε κατά πόσο υπάρχουν πόροι και εγκλείσματα σε μια τυχαία τομή της συγκόλλησης. Φάνηκε η ύπαρξη πόρων και διαφόρων σφαλμάτων τα οποία προσδίδουν στην κατασκευή μικρότερη αντοχή. Από την μέτρηση των σκληροτήτων αντιλαμβάνεται κανείς το μέγεθος της Θερμικά Επηρεαζόμενης Ζώνης και της λίμνης συγκόλλησης και ανάλογα με την τιμή των σκληροτήτων μπορεί να διαπιστωθεί πόσο υψηλός ήταν ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας κατά την διαδικασία. Τα διάφορα προφίλ σκληρότητας έγιναν σε βάθος 1mm από την επιφάνεια, ξεκινώντας από το μέταλλο βάσης και καταλήγοντας πάλι στο μέταλλο βάσης με βήμα 0.5mm . Κατόπιν έγινε η μελέτη της μικροδομής και η εύρεση των διαφόρων φάσεων που δημιουργήθηκαν κατά την ψύξη της λίμνης συγκόλλησης. Παρουσιάζονται όλες εκείνες οι φωτογραφίες που δίνουν την πλήρη εικόνα για την κατανόηση της μικροδομής. Έτσι τελειώνει η μελέτη των συμβατικών μεθόδων, που έγινε στο Εργαστήριο Υλικών. Βέβαια υπάρχει και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από το προηγούμενο ΠΑΒΕ, όπου φαίνονται οι παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις και μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι όσο αυξάνει το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης αυξάνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις.

Ο δεύτερος στόχος ήταν η μελέτη των συγκολλήσεων laser. Στην Ελλάδα δεν υπήρχε αλλά και ούτε υπάρχει η εμπειρία πραγματοποίησης μιας συγκόλλησης με την τεχνική laser. Η αναζήτηση πληροφοριών ήταν δύσκολη διότι έπρεπε να βρεθούν πληροφορίες για συγκόλληση υλικού με παρόμοια σύσταση με τον χάλυβα D36 και για πάχος συγκόλλησης 4mm. Εκτός αυτού θα έπρεπε οι πληροφορίες να αναφέρονται σε κατανομή της δέσμης laser 'Gaussian' και η διάμετρος της δέσμης να είναι κοντά στο 1mm (Οι δυνατότητες του μηχανήματος laser της EBETAM αναγκάζουν την εκτέλεση των συγκολλήσεων με μικρή ακτίνα διότι η μέγιστη ισχύς είναι 1750Watt). Έτσι έγιναν 43

‘περάσματα’ για να βρεθούν οι κατάλληλες συνθήκες ώστε να υπάρχει πλήρης διείσδυση. Κατόπιν έγινε ο απαραίτητος μεταλλογραφικός έλεγχος δηλαδή κοπή, εγκιβωτισμός, χημική προσβολή, φωτογράφιση ώστε να διαπιστωθεί η ύπαρξη πλήρους διείσδυσης. Τα δοκίμια τα οποία πληρούσαν τις προϋποθέσεις εξετάστηκαν μικροσκοπικά και έγιναν τα προφίλ σκληρότητας. Από την μικροσκοπική μελέτη διαπιστώθηκε η ύπαρξη διαφόρων φάσεων στις περιοχές που επηρεάστηκαν από την πρόσδοση θερμότητας.

Αναγκαία ήταν και η μελέτη της επιρροής των διαφόρων παραμέτρων στη συγκόλληση και ειδικότερα στο μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης, της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης αλλά και στη δημιουργούμενη σκληρότητα των περιοχών αυτών. Με βάση την παραμετρική ανάλυση μπορεί να γίνει αντιληπτή η συγκόλληση laser και να συνδεθεί η επιρροή των παραμέτρων με την δημιουργία της μικροδομής στη λίμνη συγκόλλησης. Βέβαια όλα τα παραπάνω είναι αλληλένδετα με το δημιουργούμενο θερμοκρασιακό πεδίο. Έτσι, για να υπάρχει πλήρης κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε μια συγκόλληση, θεωρήθηκε αναγκαίο να αναπτυχθούν δύο θερμοκρασιακά μοντέλα. Το 1^ο στηρίζεται σε μια δημοσίευση του M.Ashby και είναι μονοδιάστατο. Το 2^ο έχει ως βάση την ανάλυση του K.Masubuchi και είναι τρισδιάστατο.

Τελικά η μελέτη έχει ως στόχο την σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων συγκόλλησης και μια ενδεχόμενη πρόταση για περαιτέρω έρευνα. Βέβαια μια σύγκριση δεν μπορεί να είναι πλήρης αν δεν πραγματοποιηθεί η συγκόλληση, πράγμα το οποίο δεν έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, για πολλούς και διάφορους λόγους. Ένας από τους λόγους αυτούς είναι και η δυσκολία επαφής των δύο ελασμάτων πριν αρχίσει η συγκόλληση. Ίσως εδώ θα πρέπει να εστιαστεί το ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα και να βρεθούν εκείνες οι ιδιοσκευές που να διευκολύνουν την συγκόλληση.




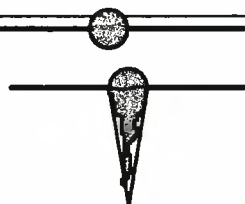
1.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση περιέχει όλες εκείνες τις πληροφορίες για τα μέχρι τώρα αποτελέσματα πάνω στις συγκολλήσεις Laser. Όσο αναφορά τις συμβατικές μεθόδους, οι γνώσεις πάνω στις συγκολλήσεις είναι γνωστές και ευρέως διαδεδομένες και δεν χρειάζεται μια πρόσθετη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εστιασμένη δέσμη Laser είναι μία από τις υψηλότερες πηγές πυκνότητας ενέργειας, που είναι διαθέσιμες - σήμερα - στη βιομηχανία. Είναι όμοια με την δέσμη ηλεκτρονίων όσο αφορά την πυκνότητα ενέργειας. Αυτές οι δύο μέθοδοι αντιπροσωπεύουν ένα μέρος της ανάπτυξης καινούργιας τεχνολογίας υψηλών πηγών πυκνότητας ενέργειας. Στο πίνακα 1.1 [1] είναι εμφανής η διαφορά που παρουσιάζουν αυτές οι μέθοδοι, συγκρινόμενες με τις συμβατικές μεθόδους, για την διαδικασία της συγκόλλησης.

Πίνακας 1.1: Πυκνότητες ενέργειας διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης

ΜΕΘΟΔΟΣ	Ένταση πηγής Θερμότητας W^2/m	Προφίλ της ζώνης τήξης
Συγκόλληση τόξου με σκόνη προστασίας (FLUX SHIELDED ARC WELDING)	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Συγκόλληση τόξου με αέριο προστασίας (GAS SHIELDED ARC WELDING)	$5 \times 10^6 - 10^8$	
ΠΛΑΣΜΑ (PLASMA)	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	
ΔΕΣΜΗ LASER ή ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (Laser or electron beam)	$10^{10} - 10^{12}$	

Σ' αυτές τις υψηλές πυκνότητες ενέργειας όλα τα υλικά τήκονται εάν υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης της προσπίπτουσας ενέργειας. Έτσι κατά την συγκόλληση - και κατά συνέπεια κατά την εξάτμιση - με την εστιασμένη δέσμη Laser δημιουργείται μια οπή. Αυτή η οπή συμπεριφέρεται σαν ένα μέλαν σώμα και δημιουργείται μέσα στη λίμνη συγκόλλησης (περιοχή τήξης) και γύρω της υπάρχει τηγμένο μέταλλο. Το αποτέλεσμα είναι αυτό που αποκαλούμε συγκόλληση 'μαύρης οπής' (keyhole weld). Χαρακτηρίζεται από μια παράλληλη ζώνη τήξης με περιορισμένο πλάτος. Η συγκόλληση Laser είναι εξαρτώμενη από την διεύθυνση και η ενέργεια χρησιμοποιείται μόνο στα σημεία της διεπιφάνειας που πρέπει να τηθούν ώστε να γίνει η κόλληση και όχι για την τήξη της γύρω περιοχής. Ένας τρόπος καθορισμού της απόδοσης μιας μεθόδου συγκόλλησης είναι ο συντελεστής απόδοσης της συγκόλλησης (joining efficiency). Πρόκειται για έναν προσεγγιστικό συντελεστή γι' αυτό και οι μονάδες του είναι: mm^2 που κολλήθηκαν / KJ που προσδόθηκαν. Αυτός ο συντελεστής ορίζεται ως εξής:

$$\frac{V t}{P}$$

όπου : V..... εγκάρσια ταχύτητα

t..... πάχος που συγκολλήθηκε

P..... προσπίπτουσα ενέργεια

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται ορισμένες χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή απόδοσης της συγκόλλησης [1].

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή απόδοσης συγκόλλησης για διάφορες μεθόδους συγκόλλησης.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	Προσεγγιστικός συντελεστής απόδοσης συγκόλλησης (mm^2/KJ)
Oxy Acetylene Flame	0,2-0,5
Manual Metal Arc (M.M.A)	2-3
Tungsten Inert Gas (T.I.G)	0,8-2
Submerged Arc Welding (S.A.W)	4-10
High Frequency Resistance Welding	65-100
Electron Beam (E.B)	20-30
Laser	15-25

Όσο υψηλότερη τιμή έχει ο συντελεστής απόδοσης της συγκόλλησης τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται για άσκοπη θέρμανση, η οποία με την σειρά της δημιουργεί παραμορφώσεις και μια μεγάλη (σε πλάτος) θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Άραγε αυτός ο συντελεστής είναι ένας παράγοντας με την βοήθεια του οποίου είναι δυνατόν να συγκριθούν οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης; Πως μπορούν να συγκριθούν οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης και να διαχωρίστουν ποιές πλεονεκτούν και ποιες μειονεκτούν; Σύμφωνα με τα μέχρι τώρα αποτελέσματα και δημοσιεύσεις τα βασικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της συγκόλλησης Laser παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.3 [1].

Πίνακας 1.3 : Βασικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης Laser

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΣΧΟΛΙΟ
Υψηλή πυκνότητα ενέργειας-συγκόλληση Keyhole	Μικρότερη παραμόρφωση (ανάλογα με το πάχος του ελάσματος)
Μεθοδος υψηλης ταχυτητας	Χαμηλότερο κόστος
Συγκόλληση σε ατμοσφαιρική πίεση	Σε αντίθεση με την συγκόλληση EB
Δεν παράγονται Ακτίνες Χ	Σε αντίθεση με την συγκόλληση EB
Δεν έχουμε πρόσθεση υλικού (αυτογενής συγκόλληση)	Δεν απαιτείται καθαρισμός της συγκολλημένης επιφάνειας
Στενή ραφή συγκόλλησης (narrow weld)	Μικρότερη παραμόρφωση
Χαρακτηριστικά μικρή Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (Θ.Ε.Ζ)	Μπορούν να συγκολληθούν υλικά ευαίσθητα στη θερμοκρασία
Πιθανότητα συγκόλλησης με μεγάλη ακρίβεια	Μπορούν να συγκολληθούν λεπτά και χοντρά ελάσματα
Πολύ καλό προφίλ της δέσμης συγκόλλησης	Δεν είναι απαραίτητος ο καθαρισμός της επιφάνειας
Αμελητέα (ή μηδενική) μόλυνση- εισαγωγή ξένων σωματιδίων - (contamination)	Σε αντίθεση με την συγκόλληση EB
Απότομο και γρήγορο ξεκίνημα/ σταμάτημα	Εξαρτάται αποκλειστικά από την προστασία του αερίου
Μερικά υλικά συγκολλούνται πολύ δύσκολα	Σε αντίθεση με τις μεθόδους τόξου
Επικολία αυτοματισμού	Αλουμίνιο
Μοίρασμα της δέσμης και σε άλλους χρήστες	Χαρακτηριστική ικανότητα της μεθόδου Laser
	Χαρακτηριστική ικανότητα της μεθόδου Laser

Επίσης ο Πίνακας 1.4 δίνει την σύγκριση των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης όσο αναφορά την ποιότητα της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, της διείσδυσης,....., κ.τ.λ.

Πίνακας 1.4: Σύγκριση των διαφόρων μεθόδων συγκόλλησης

Ποιότητα	Laser	EB	TIG	Resistance	Ultrasoni c
Ρυθμός	O.K	O.K	NO	O.K	NO
Χαμηλή πρόσδοση θερμότητας	O.K	O.K	NO	O.K	O.K
Μικρή Θ.Ε.Ζ	O.K	O.K	NO	-	O.K
Εμφάνιση (προφίλ) της δέσμης	O.K	O.K	NO	-	O.K
Simple fixturing	O.K	NO	NO	-	-
Αξιοπιστία εξοπλισμού	O.K	-	O.K	O.K	-
Βαθιά διείσδυση	NO	O.K	-	NO	-
Συγκόλληση στον αέρα	O.K	NO	-	O.K	-
Συγκόλληση μαγνητικών υλικών	O.K	NO	O.K	O.K	O.K
Συγκόλληση υλικών υψηλής ανακλαστικότητας	NO	O.K	O.K	O.K	O.K
Συγκόλληση υλικών ευαίσθητων στη θερμοκρασία	O.K	O.K	NO	NO	O.K
Πρόσβαση στη σύνδεση	O.K	-	-	NO	NO
Περιβάλλον, Θόρυβος, Αναθυμιάσεις	O.K	O.K	NO	NO	NO
Κόστος εξοπλισμού	NO	NO	O.K	-	-
Κόστος λειτουργίας	-	-	-	-	-

Από τους παραπάνω πίνακες φαίνεται ότι η συγκόλληση Laser μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως : μικρή Θ.Ε.Ζ , υψηλή ταχύτητα,, κτλ. Όμως τα σχήματα 1.1 και 1.2 δείχνουν ότι μόνο το 17% και 14% από τις εφαρμογές των Laser Nd- YAG και CO₂ αντίστοιχα, αντιστοιχούν στη συγκόλληση. Γενικότερα σήμερα η τεχνολογία Laser δεν έχει διεισδύσει στην αγορά διότι δεν έχουν αναπτυχθεί και εφευρεθεί εκείνα τα μηχανήματα και εκείνες οι συνθήκες ώστε να είναι οικονομικά συμφέρουσα. Εξάλλου, συγκρινόμενη με την μέθοδο TIG, μπορεί η τεχνική συγκόλλησης Laser να υπερτερεί σε πολλά σημεία όμως εκεί

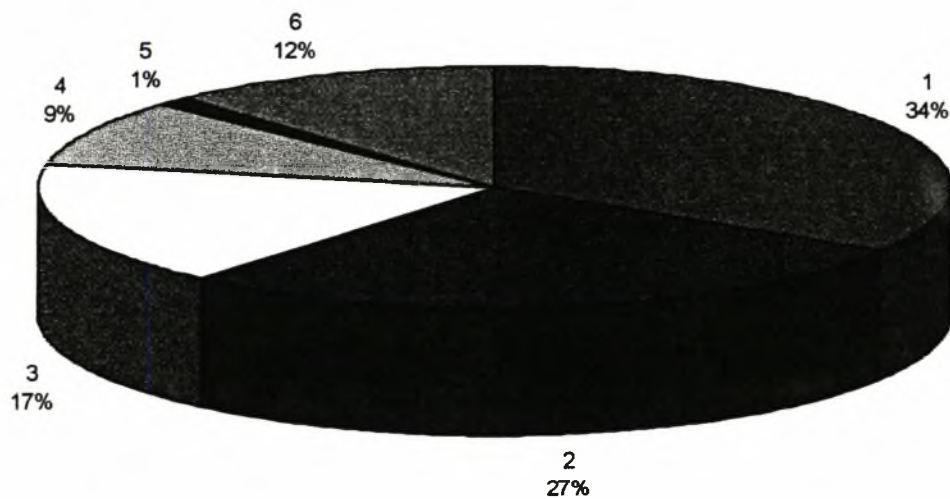
που μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος TIG, η μέθοδος συγκόλλησης Laser αδυνατεί να εφαρμοσθεί -προς το παρόν- .

Το πεδίο εφαρμογής της συγκόλλησης Laser είναι εκείνο όπου συγκολλούνται υλικά ευαίσθητα στη θερμοκρασία π.χ : Διαφράγματα με ηλεκτρονικά στοιχεία, βηματοδότες καρδιάς. Μια άλλη περιοχή εφαρμογών είναι η μαγνητική συγκόλληση των υλικών, όπως για παράδειγμα στα εργαλεία των αυτοκινήτων κ.α.

Η ταχύτητα και η απλότητα της μεθόδου την καθιστούν ως την μελλοντική μέθοδο συγκόλλησης. Μεγάλη έρευνα γίνεται γύρω από το πεδίο της συγκόλλησης Laser ώστε να μπορέσει στο μέλλον να εφαρμοσθεί στην αυτοκινητοβιομηχανία, στα εργοστάσια κατασκευής οικιακού εξοπλισμού, στην αεροπορική βιομηχανία και όπου αλλού το απαιτούν οι συνθήκες. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1.4 η μέθοδος Laser υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων συγκόλλησης και η ποιότητα των παραγόμενων συγκολλήσεων είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Σχήμα 1.1:

Βιομηχανικές εφαρμογές των Nd-YAG Lasers



1..... Χάραξη

2.....Μαρκάρισμα

3.....Συγκόλληση

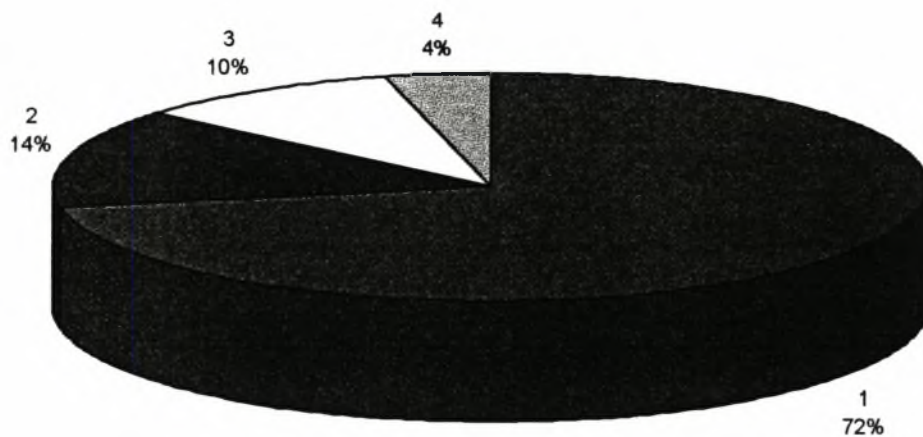
4.....Κοπή

5.....Soldering

6.....Trimming

Σχήμα 1.2 :

Βιομηχανικές εφαρμογές των CO₂ lasers



1..... Κοπή μετάλλων

2..... Συγκόλληση

3..... Διάφορες κοπές

4..... Άλλες κατεργασίες

1.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΗΞΗΣ

Ο συντελεστής τήξης είναι κάτι ανάλογο με τον συντελεστή απορρόφησης. Πρόκειται για μια θεμελιώδη παράμετρο της συγκόλλησης και καθορίζεται με έναν απλό τρόπο. Είναι ο λόγος της ενέργειας η οποία απαιτείται για να λιώσει το υλικό προς την συνολική ενέργεια που παραλαμβάνεται από το κομμάτι. Η διαφορά μεταξύ των δύο ενεργειών παριστάνει τις απώλειες που έχουμε λόγω αγωγής αντανάκλασης και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Ο συντελεστής αυτός δίδεται από την σχέση.

$$\eta_m = (\rho A V) (C_{pm})(T_m)/P$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού (Kg/m³)

A.... το εμβαδόν της ζώνης τήξης (m²)

C_{pm} η μέση τιμή της ειδικής θερμότητας (J/ Kg.°C)

V..... η ταχύτητα της δέσμης (m/sec)

T_m η θερμοκρασία τήξης (°C)

P..... η προσπίπτουσα ενέργεια του laser (Watt)

Κάνοντας μεταλλογραφία σε μια τομή μπορούμε να εμφανίσουμε την ζώνη τήξης και να μετρήσουμε το εμβαδόν της. Χρησιμοποιώντας τους δύο συντελεστές πάρθηκε :

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_a$$

Ο συντελεστής η παριστάνει ένα κλάσμα της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την δημιουργία υγρού μετάλλου και προάγει έναν τρόπο προ υπολογισμού της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος της δέσμης για μια συγκόλληση.

Χαμηλός συντελεστής τήξης σημαίνει μικρή μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας του laser σε θερμότητα πάνω στο κομμάτι. Χαμηλός συντελεστή τήξης συναντούμε σε υλικά με υψηλό σημείο τήξης.

1.3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όταν αναφέρθηκε συγκόλληση laser υψηλής ισχύος πρόκειται για μια συγκόλληση η οποία οροθετείται ως συγκόλληση ‘keyhole’. Η συγκόλληση ‘keyhole’ εξαρτάται από την ισχύ της δέσμης (η οποία πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1kW), από την επιφάνεια της δέσμης και από την εξασφάλιση σωστής εστίασης. Ένας παράγων που εξασφαλίζει το μοντέλο της συγκόλλησης ‘keyhole’ είναι η συνεχής επίτευξη πρόσπτωσης μιας πυκνότητας ενέργειας, πάνω στο κομμάτι, της τάξης από $0,5 \times 10^6$ έως 5×10^7 W/cm². Σε υψηλότερες τιμές της ισχύος δεν είναι δυνατή η συγκόλληση ‘keyhole’ αφού έχουμε υπερβολική τήξη (ίσως και εξάτμιση) και δεν είναι δυνατή η ομαλή συγκόλληση.

Η μετάβαση από την αγωγή στην μορφή συγκόλλησης ‘keyhole’ λαμβάνει χώρα σε υψηλές τιμές της ισχύος, μεγαλύτερες από 1kW. Εκτός από τα υλικά υψηλής ανακλαστικότητας στην επιφάνεια του μετάλλου η υψηλή ενέργεια δημιουργεί μια τοπική τήξη και εξάτμιση και κατ’ επέκταση μια κοιλότητα. Με μια σχετική κίνηση μεταξύ της εστιασμένης δέσμης και του κομματιού η δημιουργούμενη ‘μαύρη τρύπα’ σταθεροποιείται και κινείται διαμέσου του υλικού, περιβαλλόμενη από μια λίμνη συγκόλλησης (τήξης), σχήματος σταγόνας. Το υγρό μέταλλο κατευθύνεται προς την ‘μαύρη τρύπα’ και στη συνέχεια στερεοποιείται σε μια χαρακτηριστική μορφή σχήματος ‘V’. Η γωνία των ισόθερμων στερεοποίησης (η γωνία του ‘V’) μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας της δέσμης.

Εξάλλου υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι εμποδίζουν την δημιουργία της ‘keyhole’. Ο πρώτος είναι ότι η ‘keyhole’ επιτρέπει την απευθείας μετάδοση

της ενέργειας της δέσμης στο υλικό. Η παραδοσιακή συγκόλληση τήξης χαρακτηρίζεται από την εναπόθεση και την μετάδοση της επιφανειακής ενέργειας στο υλικό μέσω αγωγής. Αυτό επιφέρει μια, κατά προσέγγιση, ημισφαιρική λίμνη συγκόλλησης ως αποτέλεσμα της ομοιόμορφης θερμικής ροής στο θεωρούμενο ισοτροπικό υλικό. Έτσι όταν το βάθος της ‘keyhole’ δεν είναι ίσο με την απαιτούμενη πλήρη διείσδυση τότε, ασχέτως με την προσπίπτουσα ενέργεια, ίσως να μην έχουμε πλήρη διείσδυση και να δημιουργηθεί το λεγόμενο ‘Humping’ (βλέπε παράγραφο 1.5.4). Η μορφή της ‘keyhole’ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σημείο εστίασης, το οποίο πρέπει να είναι μέσα στο υλικό, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή μορφή της ‘keyhole’.

Το μέγεθος και η μορφή της ‘keyhole’ καθορίζουν τον λόγο του βάθους με το πλάτος της ζώνης τήξης. Ο επιθυμητός λόγος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 2 και 10 [2]. Βέβαια η απαιτούμενη τιμή του λόγου εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος και το είδος της συγκόλλησης.

Ο δεύτερος λόγος ανακοπής της πλήρους διείσδυσης είναι η ανακλαστικότητα. Η ‘keyhole’ επιφέρει μια γεωμετρική παγίδευση της ενέργειας που ακτινοβολείται. Η ανακλαστικότητα της δημιουργούμενης κοιλότητας δίδεται από την σχέση [2] :

$$E \equiv \varepsilon \cdot \left(\frac{1 + (1 - \varepsilon) \cdot \{(s / S - (s / S_0))\}}{\varepsilon \cdot [1 - (s / S)] + (s / S)} \right)$$

όπου:

E.....η ανακλαστικότητα της δημιουργούμενης κοιλότητας

εη ανακλαστικότητα της επιφάνειας

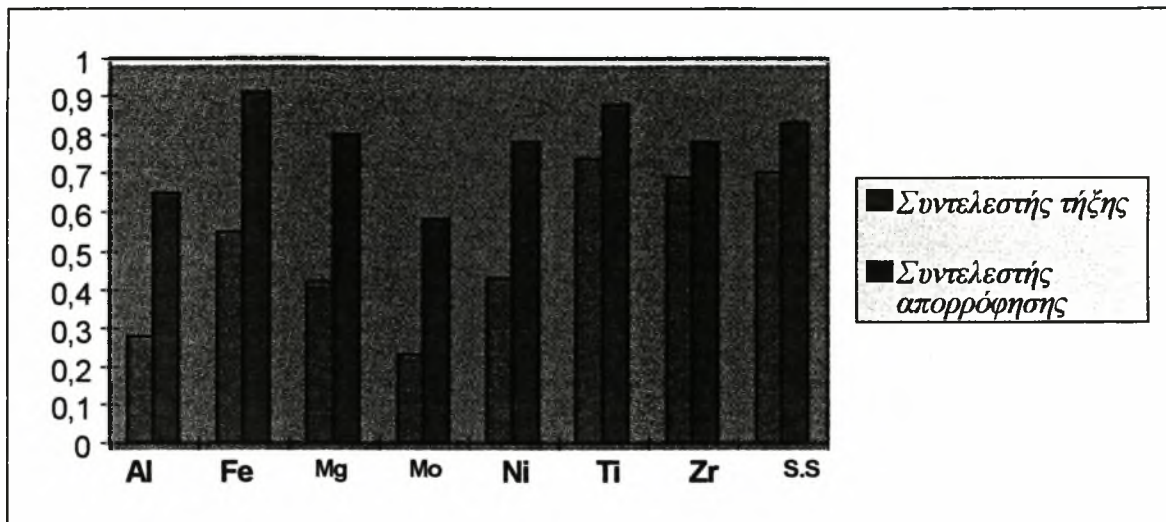
s..... η επιφάνεια της οπής

S.....η επιφάνεια της κοιλότητας

S₀ η επιφάνεια μιας σφαίρας με διάμετρο ίση με το βάθος της κοιλότητας.

Ανάλογα με το σχήμα της κοιλότητας και την τιμή του E μπορούμε να βρούμε τον λόγο Βάθος / Πλάτος της ζώνης τήξης. Βλέπουμε ότι η ανακλαστικότητα του υλικού παίζει σημαντικότερο ρόλο στην μορφή και το μέγεθος της δημιουργούμενης ζώνης τήξης.

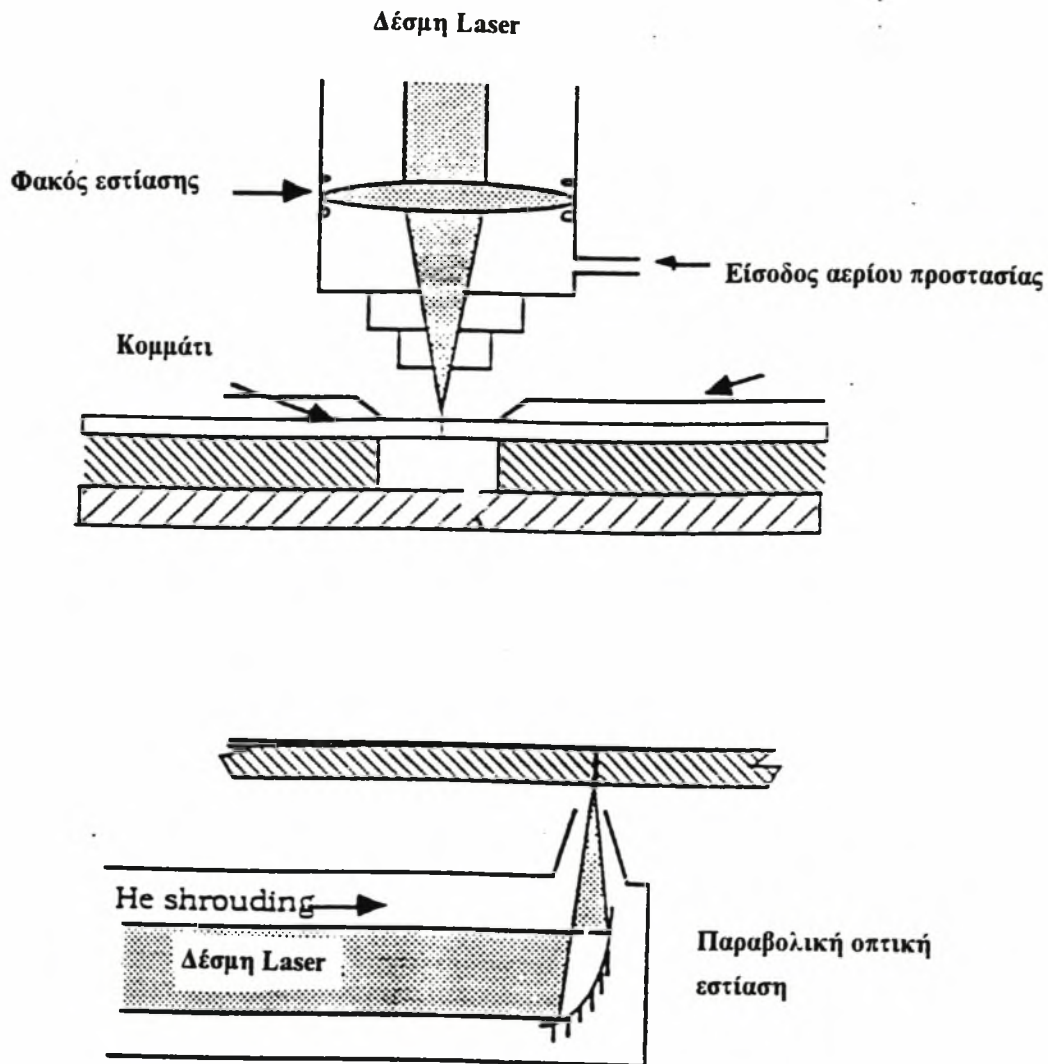
Στον πίνακα 1.5 φαίνεται ο συντελεστής τήξης και απορρόφησης διαφόρων υλικών. Φαίνεται ότι το αλουμίνιο και το μολυβδαίνιο έχουν χαμηλούς συντελεστές και η απορρόφηση της προσπίπτουσας ενέργειας είναι χαμηλή. Επίσης τέτοιου είδους υλικά είναι δύσκολο να συγκολληθούν ειδικά όταν το πάχος του ελάσματος είναι μεγάλο.



Πίνακας 1.5. : Συντελεστές τήξης και απορρόφησης για διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση laser [2]

1.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ LASER

Όπως ακριβώς στις διάφορες κατεργασίες με Laser έτσι και στην συγκόλληση μια, τελικώς, εστιασμένη δέσμη χρησιμοποιείται για να επιτύχουμε την επιθυμητή διεύθυνση. Βέβαια στη συγκόλληση η εστιασμένη δέσμη είναι πλατύτερη σε σχέση με τις διάφορες κατεργασίες (κοπή) και γι' αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μεγαλύτερη αξιοπιστία. Μια γενική διάταξη για τις συγκολλήσεις laser φαίνεται στο σχήμα 1.3 όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε την δυνατότητα χρησιμοποίησης της μεθόδου σε διαφορετικές εφαρμογές. Όπως σε κάθε επιστήμη έτσι και εδώ, η καλύτερη χρησιμοποίηση των πλεονεκτημάτων εφαρμογής της τεχνικής του laser εξαρτάται από την εμπειρία των χρηστών. Οι οπτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την εστίαση της δέσμης είναι εξαιρετικά περίπλοκες και ξεφεύγουν από το αντικείμενο του συγκεκριμένου θέματος. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι απαιτείται προστασία των διατάξεων αυτών διότι η ανακλαστικότητα των υλικών δημιουργεί προβλήματα. Ιδιαίτερα όταν τα υλικά είναι πολύ αντανακλαστικά, ένα μέρος της ενέργειας - που προσδίδεται στο κομμάτι - αντανακλάται προς τα πίσω με άμεσο αποτέλεσμα τον κίνδυνο καταστροφής των διαφόρων διατάξεων.

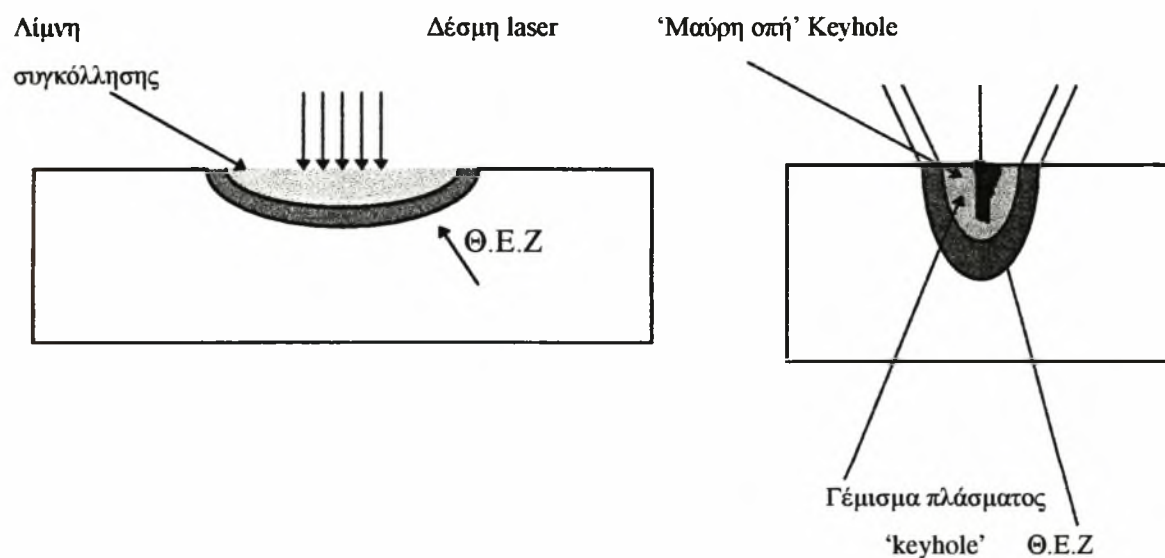


Σχήμα 1.3 : Γενικές διατάξεις κατεργασίας της συγκόλλησης laser

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4 υπάρχουν δύο τρόποι συγκόλλησης laser. Ο 1ος τρόπος είναι η συγκόλληση με συνοριακή αγωγή (conduction limited welding) και συμβαίνει όταν η πυκνότητα ενέργειας είναι ανεπαρκής για να επιφέρει τήξη στη συγκεκριμένη ταχύτητα και στο συγκεκριμένο υλικό. Στη λίμνη συγκόλλησης που δημιουργείται, αναπτύσσονται ισχυρές αναδεδυόμενες δυνάμεις λόγω του γεγονότος ότι η περιοχή τήξης είναι μικρή. Στον συμβατικό τρόπο συγκόλλησης 'keyhole' υπάρχει ένας συγκεκριμένος λόγος ενέργειας ανά μονάδα μήκους για τον οποίο έχουμε τήξη. Λόγω της τήξης δημιουργείται μια μαύρη οπή στην λίμνη συγκόλλησης η οποία σταθεροποιείται. Η δημιουργούμενη οπή συμπεριφέρεται οπτικά σαν ένα μαύρο σώμα -μέλαν σώμα- και έτσι η ακτινοβολία μπαίνει μέσα στο σώμα

και αναπαράγεται προτού αντανακλαστεί. Κατά συνέπεια όλη η προσπίπτουσα ενέργεια απορροφείται από το υλικό. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό ανάλογα με την ανακλαστικότητα του υλικού. Στα υλικά με υψηλή ανακλαστικότητα το πρόβλημα είναι η εκκίνηση δημιουργίας αυτής της τρύπας. Από την στιγμή αυτή και μετέπειτα η απορροφητικότητα του υλικού μεταβαίνει από το 3% στο 98%. Βέβαια η συμπεριφορά αυτή μπορεί να καταστρέψει το υλικό (λόγω απότομης αλλαγής της ανακλαστικότητας).

Στις συγκολλήσεις Keyhole θέτονται δύο βασικά ερωτήματα. Το πρώτο είναι η δομή του ρευστού και πώς αυτή επηρεάζει την γεωμετρία της ψυγμένης σταγόνας συγκόλλησης (με άμεσο αποτέλεσμα στη τελική δομή του υλικού). Το δεύτερο είναι η μηχανική της απορρόφησης μέσα στη τρύπα η οποία είναι δυνατόν να επηρεάσει την δομή του ρευστού καθώς και την παγίδευση πορώδους μέσα στη περιοχή συγκόλλησης. Απάντηση σε τέτοιου είδους ερωτήματα δεν πρόκειται να δώσουμε, στα πλαίσια της διπλωματικής, αφού σκοπός μας είναι να πραγματοποιήσουμε μια σωστή συγκόλληση. Παρακάτω θα αναλύσουμε όλους τους παράγοντες που επιδρούν στη συγκόλληση Laser.

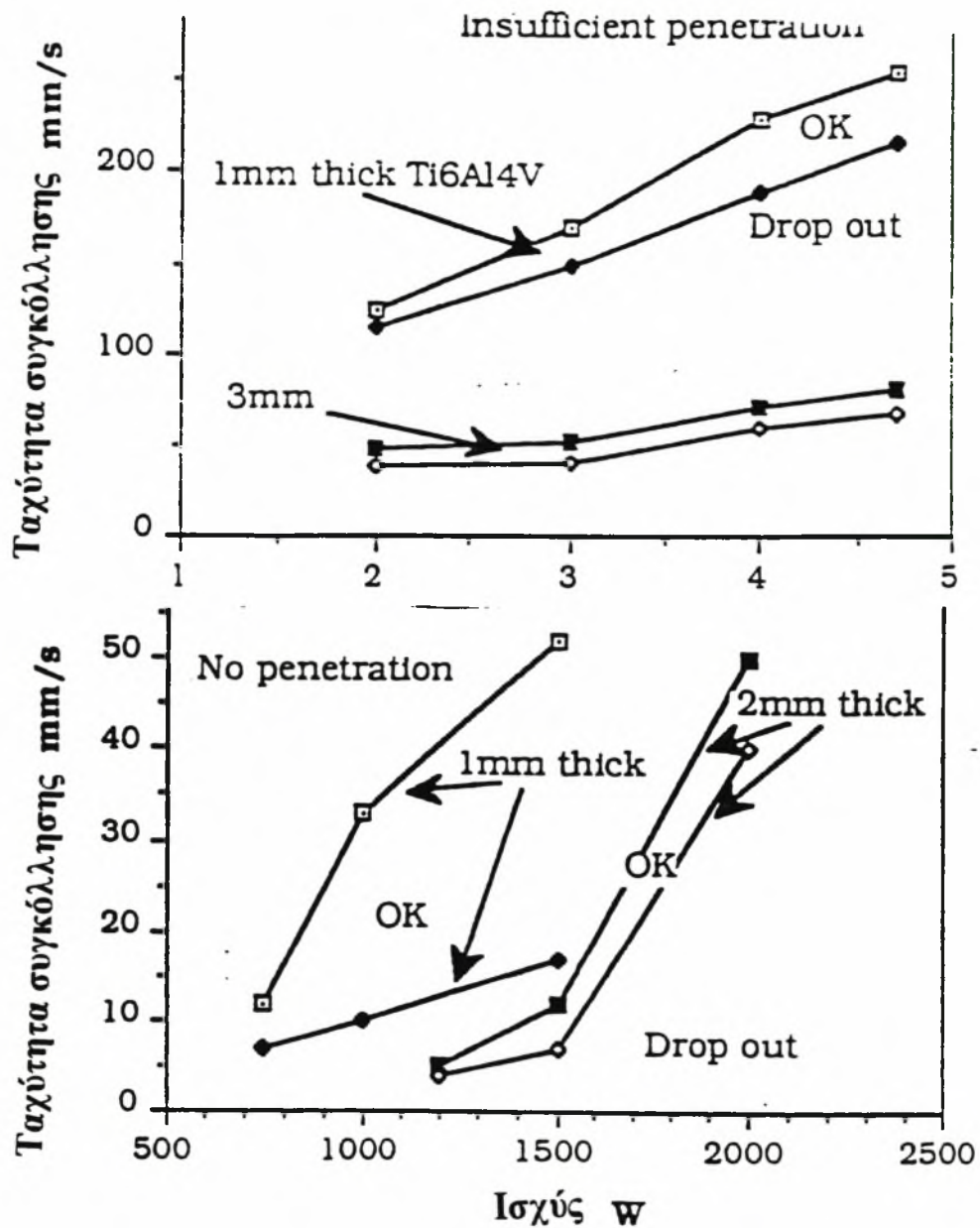


Σχήμα 1.4 : Οι δύο μορφές συγκόλλησης [1]

1.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER

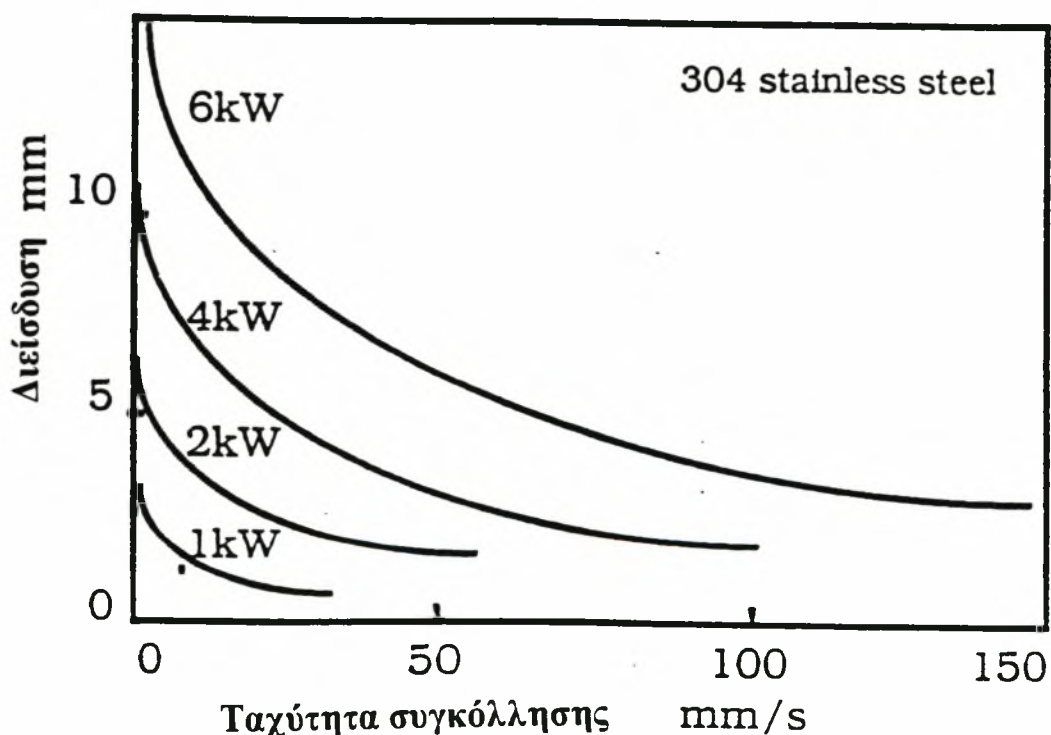
1.5.1 ΙΣΧΥΣ

Στη συγκόλληση Laser υπάρχουν δύο βασικά σημεία τα οποία θέλουν ιδιαίτερη προσοχή: Η στέριση της διείδυσης και το λεγόμενο 'Drop out' - το μέταλλο έλιωσε περισσότερο από ότι έπρεπε με αποτέλεσμα την καθίζησή του -είναι προβλήματα που πρέπει να αποφευχθούν.



Σχήμα 1.5: Ταχύτητα συγκόλλησης σε συνάρτηση με την ισχύ για Ti-6Al-4V και για Eccose CL5 Laser [1].

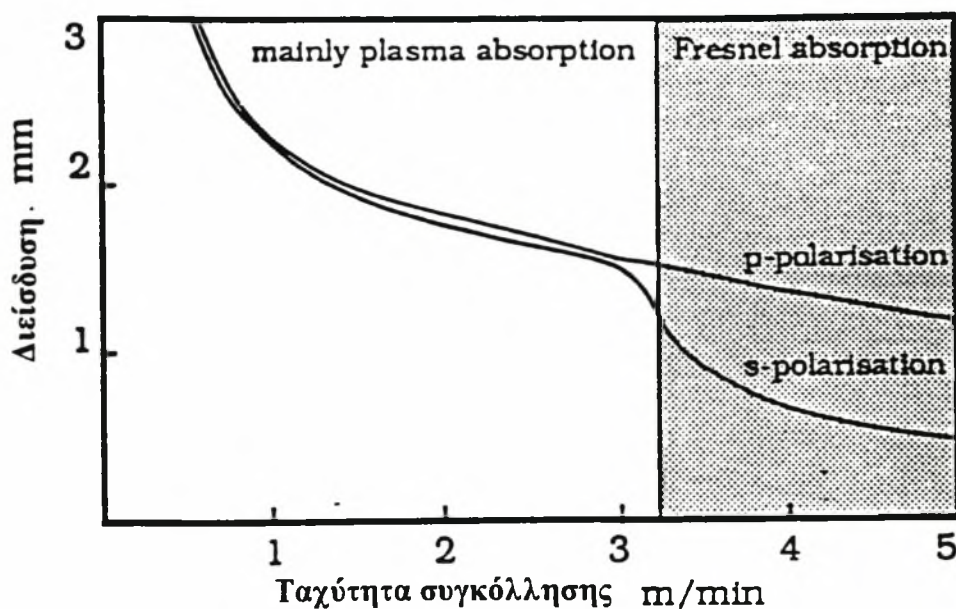
Τα διαγράμματα του σχήματος 1.6 μας δίνουν την δυνατότητα επιλογής της ταχύτητας και της ισχύος ώστε να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα. Η δημιουργία όμως σωστής συγκόλλησης είναι εξάρτηση πολλών παραμέτρων όπως είναι το πάχος του υλικού, το είδος του υλικού, γι' αυτό είναι άσκοπο να μιλάμε από τώρα για ποιοτικά καλή συγκόλληση. Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι για συγκεκριμένο πάχος η μέγιστη δυνατή ταχύτητα της συγκόλλησης αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος. Αυτό που πρέπει να προσεχθεί είναι ότι για περισσότερη ισχύ, (δυνατότητες της μηχανής) οι δυνατότητες συγκόλλησης είναι περισσότερες αφού για κάθε πάχος απαιτείται μια ελάχιστη ισχύ ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Όσο αναφορά την επίτευξη της επιθυμητής διείσδυσης, κρατώντας σταθερή την ισχύ, έχουμε αύξηση του βάθους διείσδυσης με μείωση της ταχύτητας συγκόλλησης. Ενώ με σταθερή την ταχύτητα συγκόλλησης, η αύξηση της ισχύος επιφέρει αύξηση του βάθους διείσδυσης. Όλα τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται παραστατικά στο σχήμα 1.6 [1].



Σχήμα 1.6 : Ταχύτητα συγκόλλησης / διείσδυσης για εφαρμογή σε Laser CO₂

1.5.2. ΠΟΛΩΣΗ (POLARISATION)

Από μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι η πόλωση δεν έχει καμία επιρροή στη συγκόλληση Laser αφού η δέσμη απορροφάται μέσα στην 'keyhole' και έτσι η πόλωση θα είναι ανεξάρτητη από το επίπεδο πόλωσης. Κατά κύριο λόγο αυτό φαίνεται σωστό όμως κάποιοι λόγοι δημιουργούν κάποια απόκλιση από την παραπάνω θεώρηση. Το σχήμα 1.7 [1] δείχνει την επίδραση της πόλωσης πάνω στη διείσδυση. Οι δημιουργούμενες ζώνες τήξης είναι πλατύτερες στη περίπτωση της πόλωσης 's' (s-polarisation). Ο λόγος είναι ότι η απορρόφηση χωρίζεται σε 2 μηχανισμούς. Σε χαμηλές ταχύτητες επικρατεί η απορρόφηση πλάσματος. Σε υψηλές ταχύτητες η απορρόφηση Fresnel (απορρόφηση μέσω αντανάκλασης στην επιφάνεια) είναι επικρατέστερη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Επίδραση της πόλωσης της δέσμης πάνω στη δομή της συγκόλλησης.

1.5.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

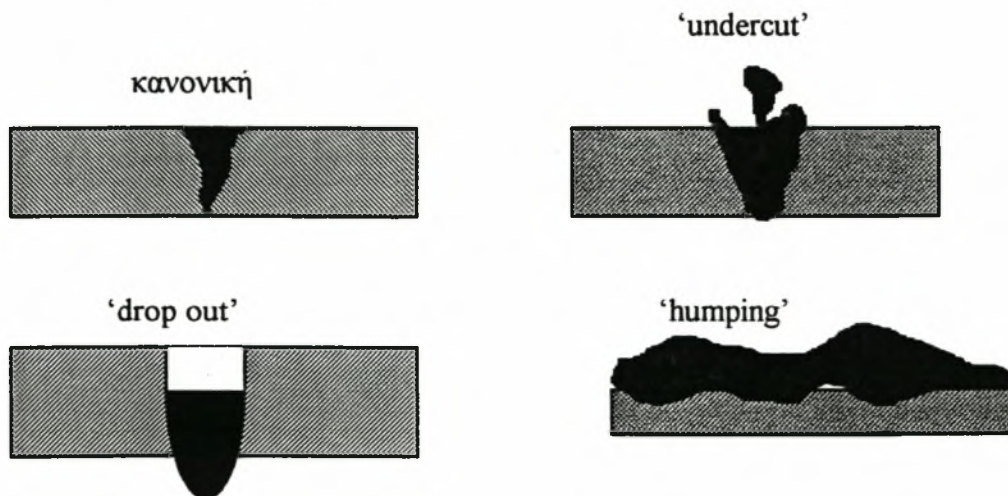
Το μήκος κύματος ελάχιστα επηρεάζει την συγκόλληση Laser και οι διαφορές που παρατηρούνται αν χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά μήκη κύματος είναι αμελητέες [1].

1.5.4.ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η επιρροή της ταχύτητας περιγράφηκε στη παράγραφο περιγραφής της ισχύος και τα προηγούμενα διαγράμματα δίνουν μια πλήρη εικόνα. Επιπροσθέτως υπάρχουν και κάποιες άλλες επιρροές

α. Επιρροή της ταχύτητας στη λίμνη συγκόλλησης και στο σχήμα της ραφής:

Καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα, το σχήμα και το μέγεθος της δημιουργούμενης ρευστοποιημένης λίμνης συγκόλλησης θα αλλάζει. Στο σχήμα 1.8 φαίνονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις ανάλογα με την ταχύτητα συγκόλλησης (κρατώντας πάντα σταθερή την ισχύ). Σε χαμηλές ταχύτητες η λίμνη είναι μεγάλη και πλατιά και το αποτέλεσμα είναι το λεγόμενο 'Humping', το οποίο δημιουργείται αν η διάμετρος της δέσμης είναι αρκετά μεγάλη. Όταν η διάμετρος είναι μικρή τότε δημιουργείται το λεγόμενο 'drop out' το οποίο εμφανίζεται πιο εύκολα στα λεπτά ελάσματα. Στις υψηλότερες ταχύτητες η ισχυρή ροή του υλικού από το κέντρο της συγκόλλησης προς την πίσω μεριά της 'keyhole' δεν αφήνει χρόνο για ανακατανομή και έτσι ψύχεται και αφήνει ένα υπόσκαμα στη κάτω πλευρά της συγκόλλησης, αυτό που αποκαλούμε 'undercut'. Βέβαια εάν ρυθμιστεί κατάλληλα η ταχύτητα τότε υπάρχει η δυνατότητα να αποφευχθούν τα ανεπιθύμητα σφάλματα. Υπάρχει πάντοτε μια περιοχή όπου υπάρχουν τα σωστά αποτελέσματα, όμως θα πρέπει να βρεθεί και το βάθος διεύθυνσης. Στο σχήμα 1.9 φαίνεται αυτή η περιοχή για διάφορα είδη χαλύβων [1].

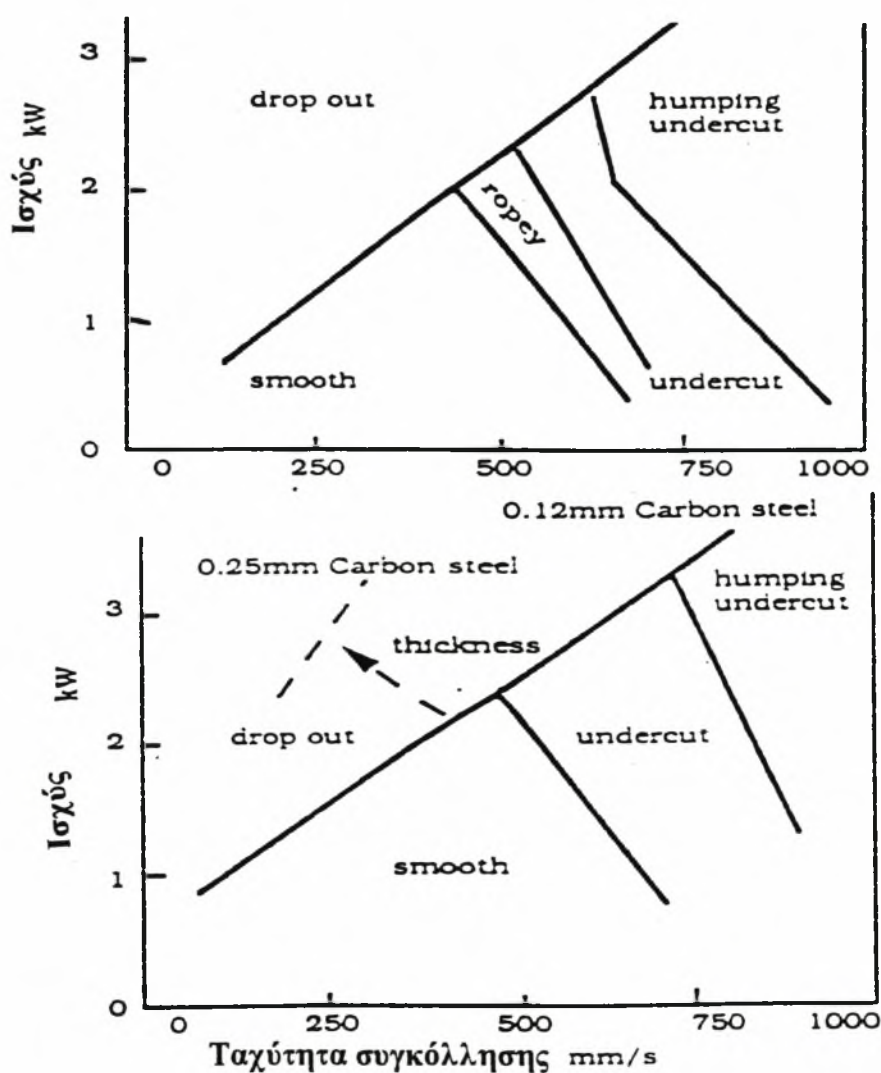


Σχήμα 1.8: Μορφές συγκολλήσεων εξαρτώμενες από την ταχύτητα

β. *Επιρροή της ταχύτητας πάνω στη ρύθμιση προστασίας*

Μια θεωρητική προσέγγιση του Gratzke [1] δίνεται από τη σχέση : $L=(3r^2 u)/ 2a$ όπου L..... ‘μήκος της λίμνης συγκόλλησης’, για μια πηγή θερμότητας Gaussian. Φαίνεται ότι με αύξηση της ταχύτητας έχουμε αύξηση της ‘λίμνης συγκόλλησης’ Τα αποτελέσματα αυτά διαφέρουν από τα αποτελέσματα που δημοσίευσε ο Takeda, ο οποίος υποστηρίζει το αντίθετο. Επομένως εδώ υπάρχει ένα πεδίο για έρευνα.

Πάντως με αύξηση της ταχύτητας το τηγμένο (ή θερμό) μέταλλο εκτείνεται περισσότερο πίσω από το σημείο συγκόλλησης (πιτσιλάει). Συνήθως τα προστατευτικά αέρια χρησιμοποιούνται για την αποφυγή της μόλυνσης από τον ατμοσφαιρικό αέρα και η υψηλή ταχύτητα άλλοτε επιφέρει θετικά αποτελέσματα (μικρότερη λίμνη συγκόλλησης) και άλλοτε επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα (μείωση της προστασίας αφού το αέριο δεν προλαβαίνει να προστατεύσει την γύρω περιοχή).



Σχήμα 1.9: Διαγράμματα του δημιουργούμενου προφίλ συναρτήσει της ταχύτητας και του υλικού συγκόλλησης

1.5.5 ΣΗΜΕΙΟ ΕΣΤΙΑΣΗΣ

Σύμφωνα με πολλές δημοσιεύσεις, το σημείο εστίασης πρέπει να είναι 1mm κάτω από την επιφάνεια του ελάσματος ώστε να έχουμε πλήρη διείσδυση. Ουσιαστικά πρέπει να έχουμε μια πυκνότητα ενέργειας η οποία να είναι ικανή να δημιουργήσει την 'keyhole' και στη συνέχεια θα πρέπει να εστιάσουμε την δέσμη μας σε τέτοιο βάθος ώστε να έχουμε ικανοποιητική διείσδυση. Οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι το βάθος εστίασης και το μέγεθος της δέσμης (διάμετρος).

Βάθος Εστίασης: $Z_f = \pm 15,7 F^2$ για μήκος κύματος ακτινοβολίας 10,6μm

Ελάχιστη διάμετρος της δέσμης: $d_{min} = 2,4 (2\rho+1+L) (F\lambda)$ ή $d_{min} = 80 F \mu\text{m}$

όπου: λ μήκος κύματος

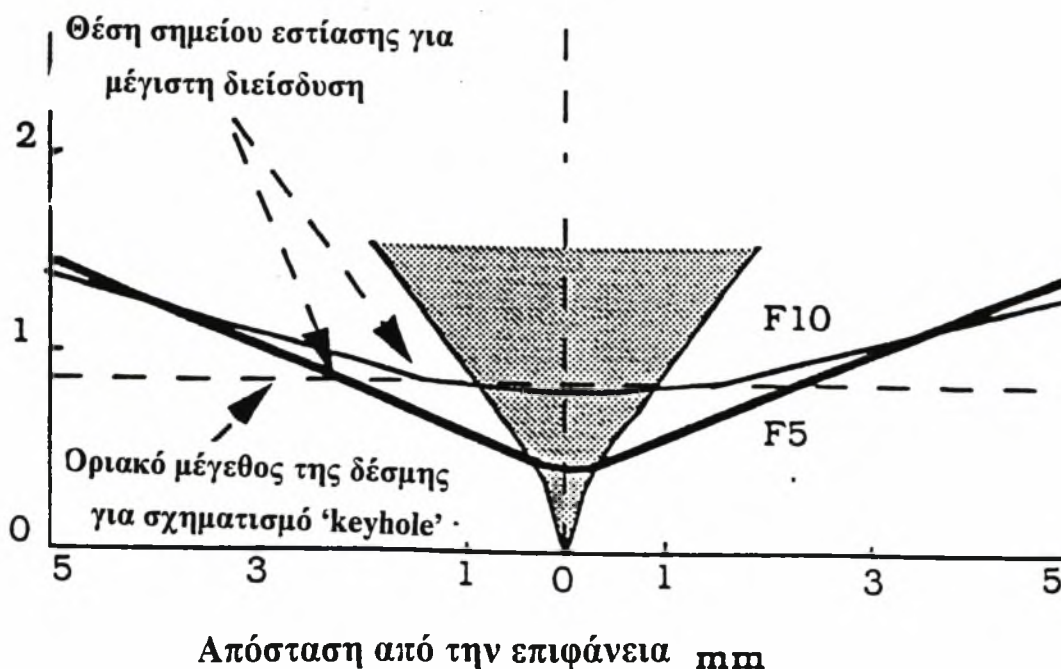
ρπαράγοντας θέσης $1-(2f/s_2)$

f μήκος εστίασης του φακού

s_2 απόσταση από τον φακό

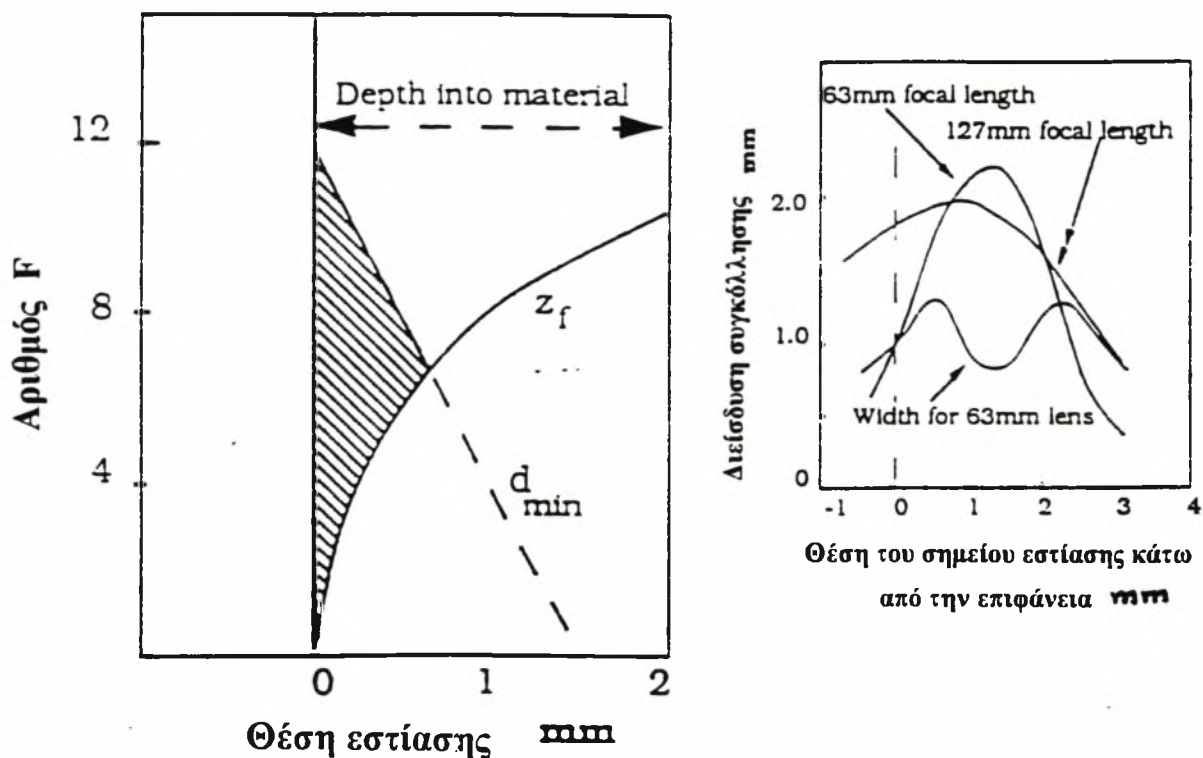
$F=f/D_L$ Diameter of the top hat beam mode on lens

Στο σχήμα 1.10 παρουσιάζεται η εξάρτηση της διαμέτρου της δέσμης από την απόσταση από τον φακό για συγκεκριμένους αριθμούς F. Η διαγραμματισμένη περιοχή δείχνει την σχέση μεταξύ του βάθους διείσδυσης και της ελάχιστης διαμέτρου d_{min} . Η οριζόντια γραμμή δείχνει την απαιτούμενη πυκνότητα ενέργειας για την δημιουργία της keyhole. Συνεπώς θα πρέπει να βρισκόμαστε κάτω από την γραμμή αυτή.



Σχήμα 1.10 : Διάμετρος δέσμης σε συνάρτηση με την απόσταση από τον φακό [1]

Στο σχήμα 1.11 τα διαγράμματα δείχνουν τη θέση του σημείου εστίασης και την καλύτερη περιοχή (διαγραμμισμένη) από άποψης διείσδυσης. Όπως φαίνεται επιβεβαιώνεται η αρχική εκτίμηση ότι για βάθος εστίασης 1mm, μέσα στο έλασμα έχουμε την μέγιστη δυνατή διείσδυση. Βέβαια όλα τα διαγράμματα αναφέρονται για σταθερή ισχύ, αφού μια μικρή αλλαγή στην ισχύ αλλάζει όλα τα δεδομένα.



Σχήμα 1.11: Θεωρητική θέση του σημείου εστίασης μέσα στο κομμάτι για μέγιστη διείσδυση (με σταθερή την ισχύ) [1]

1.5.6. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Τα κύρια προβλήματα που παρουσιάζονται στη συγκόλληση Laser είναι τα συνήθη προβλήματα που παρουσιάζονται σε όλες τις συγκολλήσεις: Ευαισθησία σε ρήγματα - πορώδες - ψαθυροποίηση της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και χαμηλή απορροφητικότητα

λόγω ανακλαστικότητας. Για συγκόλληση ανόμοιων υλικών δημιουργείται ένα επιπρόσθετο πρόβλημα, η ενδομεταλλική ψαθυροποίηση.

Η ρηγμάτωση χωρίζεται σε : Hot cracking - centreline cracking - liquation cracking. Η ρηγμάτωση οφείλεται στις τάσεις συστολής που δημιουργούνται πριν η συγκόλληση στερεοποιηθεί ολοκληρωτικά. Συνήθως σε υλικά ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες και σε υλικά στα οποία η ψαθυροποίηση λαμβάνει χώρα σε ένα ευρύ πεδίο θερμοκρασιών. Τέτοια υλικά είναι αυτά που περιέχουν υψηλό ποσοστό άνθρακα, θείου, φωσφόρου. Για παράδειγμα υλικά με υψηλό ποσοστό άνθρακα ευνοούν τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό (ο οποίος είναι άμεσα εξαρτώμενος από τον ρυθμό ψύξης) με αποτέλεσμα την δημιουργία διαμήκη ρηγμάτων κατά την συστολή, τα οποία είναι άκρως επικίνδυνα (εύκολη διάδοση). Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ευαισθησία διαφόρων κραμάτων στη ρηγμάτωση, πράγμα το οποίο πρέπει να προσεχθεί όταν κάνουμε επιλογή παραμέτρων.

Πίνακας 1.6: Ευαισθησία στη ρηγμάτωση βασικών μεταλλικών κραμάτων

Υλικό	Τάση ρηγμάτωσης	Σύσταση								
		C	Si	Mn	Cu	Fe	Ni	Cr	Mo	άλλο
Hastelloy B2	Υψηλή	0,12	1,0	1,0		4-6	rem	1,0	26	V,Co
Hastelloy C4		0,12	,0	,0		1,5-7	rem	15	16	V,Co
Inconel 600		0,08	0,25	0,5	0,25	8,0	rem	15,5	-	Al
Inconel 718		<0,08	-	-	0,15	18,5	52,5	19	3	Nb,Ti,Al
316 Stainless		0,08	1,5-3	2,0		rem	19-22	23-26		
310 Stainless		0,25	1,5	2,0		rem	19-22	24-26		
Hastelloy X		0,15	-			15,8	49	22	9	Co,W,Al
330 Stainless		0,08	0,7-1,5	2,0	1,0	rem	34-37	17-20		
Aluminium 2024	Χαμηλή			0,6	0,2	Mg 1,5	Al rem			

Η δημιουργία ρηγμάτων μειώνεται αν αυξήσουμε τους παλμούς ή αν προθερμάσουμε το κομμάτι.

Οι πόροι που σχηματίζονται οφείλονται σε πολλούς παράγοντες όπως η ανεπαρκής προστασία, η υψηλή ανακλαστικότητα των υλικών και η ανεπαρκής στερεοποίηση. Πολλές φορές στις συγκολλήσεις δημιουργούνται πόροι εξαιτίας της δυσκολίας να γίνει η συγκόλληση (ανεπαρκής τήξη των υλικών, άσχημα διαμορφώσιμες

επιφάνειες , κ.τ.λ). Για να αποφευχθούν αυτά τα σφάλματα πρέπει να δοθεί προσοχή στο σύστημα προστασίας καθώς και στο μέγεθος της δέσμης (διάμετρος). Η συγκόλληση με Laser έχει πολλά πλεονεκτήματα. Κατ αρχήν μπορούμε να ρυθμίσουμε κατά την διάρκεια της συγκόλλησης το σύστημα αέριας προστασίας της δέσμης αλλάζοντας την πίεση ή το είδος του αερίου προστασίας. Επίσης η μικρή λίμνη συγκόλλησης, η ρύθμιση του χρόνου στερεοποίησης (μέσω ρύθμισης της ταχύτητας ψύξης) και οι μικρότερες παραμορφώσεις λόγω μη πρόσθεσης ξένου υλικού, είναι παράγοντες που επιδρούν θετικά στην αποφυγή πόρων. Στον πίνακα 1.7 φαίνονται τα προβλήματα που δημιουργούνται για διάφορα συστήματα κραμάτων. Η συγκόλληση υλικών με διαφορετική δομή και με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες επιφέρει πολλά σφάλματα.

Πίνακας 1.7: Χαρακτηριστικά συγκολλήσεων Laser για διάφορα συστήματα κραμάτων

ΚΡΑΜΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
<i>Κράματα αλουμινίου</i>	Προβλήματα με : 1. Αντανακλαστικότητα 2. Πορώδες 3. Εξαιρετική ρευστότητα (με αποτέλεσμα το λεγόμενο 'drop out') 4. Hot cracking
<i>Χάλυβες</i>	O.K
<i>Hastelloy, M152, Jetehet, Inco 718 (υπερκράματα)</i>	1. Ψαθυρή συγκόλληση 2. Προβλήματα διαχωρισμού των υλικών 3. Δημιουργία ρηγμάτων
<i>Κράματα τιτανίου</i>	Όχι πολύ καλά αποτελέσματα

1.6 ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΤΗΣΗΣ

Υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των υδροστατικών δυνάμεων του υγρού μετάλλου που περιβάλλει την 'keyhole' και της τάσης ατμών. Αυτή η αλληλεπίδραση δημιουργεί αστάθεια στην περιοχή της 'keyhole'. Γενικά η σταθεροποίηση της 'keyhole' αυξάνει με μείωση της ταχύτητας της δέσμης. Σε χαμηλές ταχύτητες ο παραγόμενος όγκος

υγρού μετάλλου αυξάνει σημαντικά σε σχέση με την οποιαδήποτε αύξηση της ενέργειας που εναποτίθεται στο μέταλλο. Έτσι οι δυνάμεις που οφείλονται στις τάσεις ατμών γίνονται ανεπαρκείς για να εξουδετερώσουν τις δυνάμεις της δημιουργούμενης ροής. Επομένως υπάρχει μια ελάχιστη ταχύτητα κάτω της οποίας η σταθερότητα της 'keyhole' πέφτει δραματικά. Εξαιτίας του παραπάνω φαινομένου δημιουργείται το λεγόμενο 'drop out' το οποίο είναι ανεπιθύμητο.

Ένα από τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης laser είναι η επίτευξη ζώνης τήξης με υψηλή καθαρότητα. Η καθαρότητα της ζώνης τήξης οφείλεται στο προστατευτικό αέριο που περιβάλλει την δέσμη και έχοντας την κατάλληλη πίεση δεν επιτρέπει την εισαγωγή ξένων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα.

1.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ικανότητα των υλικών να συγκολλούνται εύκολα είναι ένας σημαντικός παράγων για την δημιουργία μιας ποιοτικής συγκόλλησης. Υλικά με καλή συγκολλησιμότητα μπορούν να: 1) συγκολληθούν με χαμηλή ισχύ 2) χρησιμοποιηθούν υψηλές ταχύτητες 3) προστατεύσουν με ευκολία το υλικό από την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Έχουν δημοσιευτεί πάρα πολλές εργασίες πάνω στα αποτελέσματα που επιφέρει η συγκόλληση laser στις ιδιότητες των υλικών [2,3]. Γενικά έχουμε πολύ καλές ιδιότητες εφελκυσμού (όριο ροής, όριο εφελκυσμού,.....) σε μια μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Επίσης οι καμπτικές ιδιότητες των παραγόμενων ελασμάτων βελτιώνονται αν εφαρμοσθούν οι κατάλληλες τεχνικές (skip back step,...). Χαρακτηριστική είναι η υψηλή σκληρότητα που οφείλεται στους απότομους ρυθμούς ψύξης, οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη επιρροή στους χάλυβες με υψηλό ποσοστό άνθρακα (άνω του 0,15%) εξαιτίας του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Ως γνωστόν η προθέρμανση του υλικού είναι ο καλύτερος τρόπος ώστε να αποφύγουμε ένα άσχημο προφίλ σκληρότητας.

Η δημιουργία πόρων (σε αντίθεση με την καθαρότητα) είναι ένα σημαντικό ελάττωμα που συναντούμε στις συγκολλήσεις laser. Το μοντέλο της συγκόλλησης 'keyhole' είναι υπεύθυνο για την δημιουργία του πορώδους. Εάν η 'μαύρη τρύπα' δεν είναι λεπτός και ομοιόμορφος κύλινδρος, τότε δημιουργείται το πορώδες (είναι κάτι ανάλογο με την χύτευση). Όσο μεγαλύτερη είναι η 'μαύρη τρύπα' τόσο ευκολότερα δημιουργούνται εγκλείσματα. Μπορούμε όμως να το αποφύγουμε εύκολα αρκεί να έχουμε μια καθαρή

επιφάνεια, μια σωστή προστασία από το εκάστοτε προστατευτικό αέριο, καθώς και σωστή επιλογή παραμέτρων ώστε να αποφύγουμε τους υψηλούς ρυθμούς ψύξης. Επίσης θα πρέπει να αποφεύγονται τα ανομοιογενή προφίλ της δέσμης ειδικά εκείνα που επιφέρουν μια στενή ζώνη συγκόλλησης.

1.8 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μια αρχική εκτίμηση της απαιτούμενης ελάχιστης ισχύος, για μια συγκεκριμένη διαδικασία μπορούμε να κάνουμε χρησιμοποιώντας ένα ισοζύγιο ενέργειας. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1.12 η περιοχή συγκόλλησης μπορεί να παρασταθεί από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο θα έχει πλάτος 'W' ισοδύναμο με το απαιτούμενο πλάτος συγκόλλησης (πλάτος ζώνης τήξης) και βάθος 'h' ίσο με την απαιτούμενη διείσδυση [3]. Το μήκος της συγκόλλησης παριστάνεται ανά μονάδα χρόνου και είναι ίσο, κατά απόλυτη τιμή, με την ταχύτητα συγκόλλησης. Η επιθυμητή ταχύτητα συγκόλλησης μπορεί να εκτιμηθεί σε σχέση με τον επιθυμητό ρυθμό ψύξης καθώς και με την ταχύτητα της διαδικασίας συνολικά.

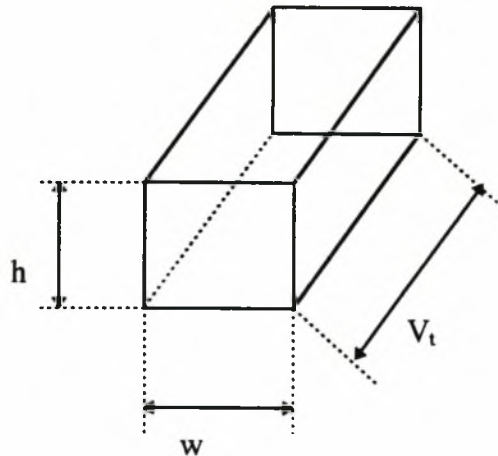
Η ελάχιστη ενέργεια με την οποία θα τροφοδοτηθεί το κομμάτι είναι εκείνη που θα αυξήσει την αρχική θερμοκρασία του υλικού (θερμοκρασία δωματίου) και να την φθάσει στο σημείο όπου έχουμε τήξη. Έτσι η ισχύς που απαιτείται (ενέργεια ανά μονάδα όγκου) για να λιώσει έναν συγκεκριμένο όγκου μετάλλου είναι:

$$P=(\rho h w) V C_p T_m$$

όπου ρ πυκνότητα, h βάθος, w πλάτος, Vταχύτητα, C_p ... ειδική θερμότητα, T_m θερμοκρασία τήξης

Πρόκειται για μια αρχική προσέγγιση της απαιτούμενης ισχύος που πρέπει να διαθέτει η συσκευή που θα χρησιμοποιηθεί για την συγκόλληση. Είναι ένας τρόπος να βρεθεί το κόστος της συνολικής διαδικασίας. Από την παραπάνω σχέση του ενεργειακού ισοζυγίου φαίνεται ότι η τεχνική laser πρέπει και μπορεί να χρησιμοποιείται για την συγκόλληση λεπτών ελασμάτων σε υψηλές ταχύτητες ώστε να αποφύγουμε την ανάγκη χρησιμοποίησης ισχυρότατης συσκευής. Ενεργειακά λοιπόν συμφέρει να συγκολλούμε λεπτά ελάσματα ώστε να μας δίδεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης μεγάλων ταχυτήτων. Εξάλλου στα χονδρά ελάσματα απαιτείται η ακτίνα της δέσμης να είναι να είναι μεγάλη ώστε να μην

δημιουργηθεί το λεγόμενο 'drop out'. Συνεπώς οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνουν και αυτομάτως η συγκόλληση laser καθίσταται αντισυμβατική.



Σχήμα 1.12 : Θεωρούμενη ζώνη συγκόλλησης

Τέλος θα πρέπει να προσεχθούν οι περιβαλλοντικές συνθήκες οι οποίες επιδρούν άλλοτε αρνητικά και άλλοτε θετικά στην εξέλιξη της συγκόλλησης. Άσχημες περιβαλλοντικές συνθήκες έχουμε όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή αφού απαιτείται πρόσθετη ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης ο αέρας δυσκολεύει την δράση του προστατευτικού αερίου και η επίτευξη υψηλής καθαρότητας γίνεται δυσκολότερη. Έτσι λοιπόν το καλύτερο θα ήταν η συγκόλληση να γίνει σε κλειστό χώρο όπου η θερμοκρασία του δωματίου θα διατηρείται σταθερή.

1.9 ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER

1.9.1 ΡΥΘΜΟΣ ΠΡΟΣΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σύμφωνα με την θεωρία του Lancaster [3] σε μια συγκόλληση υπάρχουν δύο περιοχές η ζώνη τήξης και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη υπάρχουν δύο περιοχές, όπου στη μία έχουμε μεταβολή της δομής του υλικού ενώ στην άλλη υπάρχει μόνο μια μικρή θερμική επιρροή χωρίς αλλαγή της δομής. Παρακάτω θα δώσουμε μια διαφορετική ονομασία, για τις διάφορες περιοχές σύμφωνα με πρόσφατες προδιαγραφές.

Σε μια συγκόλληση laser θα πρέπει να ρυθμίσουμε έτσι την πηγή θερμότητας ώστε να έχουμε πλήρη διείσδυση της ζώνης τήξης. Ωστόσο θα πρέπει να βρούμε εκείνο τον συνδυασμό των παραμέτρων για να ελαχιστοποιήσουμε το μέγεθος της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης ώστε να μειωθεί η μεταλλουργική αλλαγή και να ελαχιστοποιηθούν οι παραμένουσες παραμορφώσεις.

Για όλες αυτές τις αλλαγές υπεύθυνος είναι ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας που ορίζεται ως εξής:

$$\underline{n=Q/u}$$

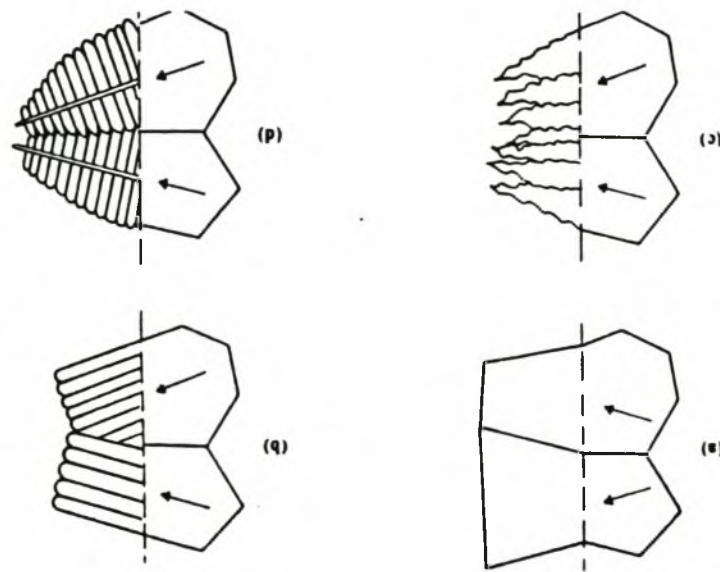
Ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι η πιο σημαντική μεταβλητή στη συγκόλληση τήξης αφού προσδιορίζει τους ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης και το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης (περιοχή τήξης). Γενικά όσο υψηλότερος είναι ο λόγος Q/u τόσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός ψύξης και τόσο μεγαλύτερη η λίμνη συγκόλλησης.

Μια ακόμη μεταλλουργική μεταβλητή που επηρεάζεται από τον λόγο Q/u είναι το μέγεθος των κόκκων στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και στο μέταλλο συγκόλλησης. Όσο υψηλότερος είναι ο λόγος Q/u τόσο μεγαλύτερος είναι ο θερμικός κύκλος που θα υποστεί το υλικό με συνέπεια την δημιουργία χονδρόκοκκης δομής.

1.9.2 ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η στερεοποίηση στη συνηθισμένη περίπτωση προχωρεί εκ των έξω προς τα έσω καθώς η θερμότητα απάγεται στα τοιχώματα ή και στο ψυχρό μέταλλο. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ο σχηματισμός κόκκων που σχηματίζουν συχνά μια κιονική δομή λεπτή και επιμήκη κάθετα στα υποτιθέμενα τοιχώματα απαγωγής. Οι κόκκοι, στη συνηθισμένη περίπτωση, δεν αναπτύσσονται ομογενώς και ακαριαία αλλά καθένας τους σχηματίζει πρώτα ένα δομικό σκελετό επίπεδων ή ράβδων μεταξύ των οποίων υπάρχει υγρό το οποίο στερεοποιείται αργότερα. Ο σκελετός αυτός του κόκκου λέγεται δενδρίτης και είναι ανάλογος με την δομή της νιφάδας. Στη δημιουργία του δενδρίτη έχουμε την ανάπτυξη ενός συστασιακού gradient μεταξύ του πρώτου υλικού που στερεοποιείται (στο κέντρο του δενδρίτη) και του τελευταίου λέγεται coping ή διαφορισμός και είναι ανεπιθύμητος κατά την στερεοποίηση ενός κράματος. Οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται κατά την διάρκεια της στερεοποίησης της λίμνης συγκόλλησης σχηματίζουν ένα πυρήνα με τους κρυστάλλους του στερεού και εγκλωβίζονται στην διεπιφάνεια στερεού-υγρού. Στην ορολογία της

συγκόλλησης αυτός ο τύπος ανάπτυξης κρυστάλλου είναι γνωστός ως ‘επιταξιακός’ (epitaxial) και απεικονίζεται στο σχήμα 1.13 [3].



Σχήμα 1.13 : Τύποι στερεοποίησης. a) επίπεδη(planar) b) πορώδης(cellular) c)Κυψελοειδής δενδριτική(cellular dendritic) d) Κιονική δενδριτική (columnar dendritic)

Κάθε κόκκος είναι συνέχεια ενός κόκκου που βρίσκεται στα όρια της ζώνης τήξης όπου το πλάτος της ζώνης τήξης είναι μέγιστο. Καθώς τα όρια της τήξης προχωρούν οι κόκκοι συνεχίζουν να μεγαλώνουν σε μορφή ‘στήλης’. Ο συναγωνισμός μεταξύ των κόκκων έχει ως αποτέλεσμα κάποιες αλλαγές στο πρωταρχικό μέγεθος, αλλά το μέγεθος των κόκκων του μετάλλου συγκόλλησης υπολογίζεται από το μέγεθος των κόκκων του στερεού μετάλλου στα όρια της ζώνης τήξης. Η μορφή της δομής εξαρτάται από την χημική σύσταση του υγρού μετάλλου συγκόλλησης και από μια παράμετρο στερεοποίησης ίση με την θερμοκρασιακή κλίση (gradient) G , στην κατεύθυνση της στερεοποίησης, διαιρούμενη με τον ρυθμό στερεοποίησης R . Στο σχήμα 1.14 φαίνεται η επιρροή των προαναφερθέντων παραμέτρων. Για οποιαδήποτε χημικά σύσταση η δομή γίνεται πιο δενδριτική καθώς ο λόγος G/R μειώνεται. Έτσι η κατά διαστήματα δημιουργία δενδριτικής δομής αυξάνεται καθώς ο χρόνος ψύξης $(1/(G \cdot R)^{1/2})$ αυξάνεται. Ειδικά σε υψηλές τιμές του χρόνου ψύξης υφίσταται ο σχηματισμός δενδριτικών πυρήνων και η δομή γίνεται ισοαξονική. Η ταχύτητα στερεοποίησης R ισούται με [3] :

$$\underline{R = \sin\theta \cdot u} \quad (1.1)$$

όπου: u η ταχύτητα συγκόλλησης

R η γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη της λίμνης συγκόλλησης στα όρια και η κατεύθυνση της συγκόλλησης.

Η θερμοκρασιακή κλίση είναι :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{u} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.2)$$

Για την τρισδιάστατη ροή θερμότητας είναι:

$$G = \frac{1}{u} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_m}{x_1} \quad (1.3)$$

όπου T_mΗ θερμοκρασία τήξης

x_1 Η απόσταση μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ουράς της λίμνης συγκόλλησης.

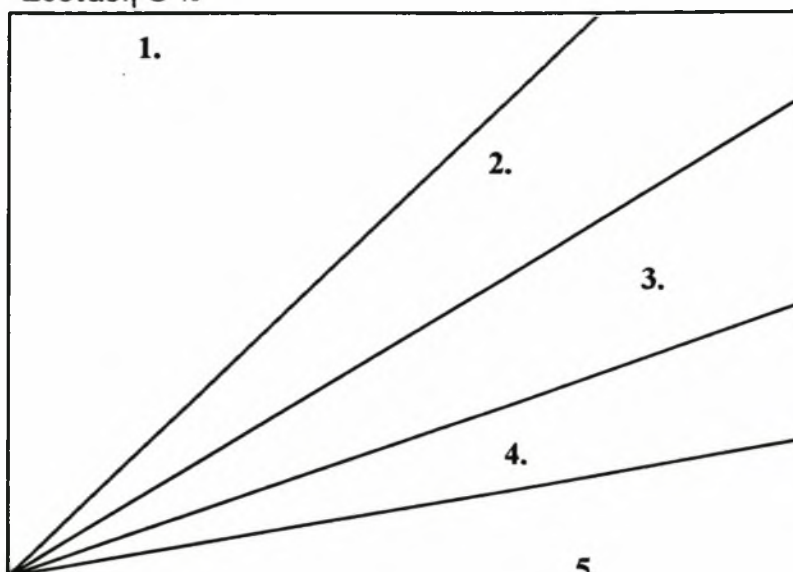
Έτσι θα είναι $\sin\phi=1$ οπότε

$$\frac{G}{R} = \frac{T_m}{u \cdot x_1} \quad (1.4)$$

Η απόσταση x_1 αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας (σχήμα 1.15) και έτσι το G/R αυξάνει με αύξηση της ταχύτητας. Επίσης στα σύνορα της ζώνης τήξης $\sin\phi=0$ και θεωρητικά ο λόγος G/R τείνει στο άπειρο. Έτσι η παράμετρος στερεοποίησης μειώνεται από τα σύνορα της ζώνης τήξης προς το κέντρο του κεντρικού άξονα στερεοποίησης. Στην πράξη όσο αυξάνει η ταχύτητα η ουρά της λίμνης συγκόλλησης μεγαλώνει. Η μορφή και το μέγεθος των κόκκων μιας συγκόλλησης εξαρτάται από 3 παράγοντες: 1) Την σύσταση 2) Την παράμετρο στερεοποίησης 3) Το σχήμα της λίμνης συγκόλλησης. Οι δομές και τα διάφορα σχήματα της λίμνης συγκόλλησης φαίνονται στο σχήμα 1.15. Σε χαμηλές ταχύτητες και σε υψηλές τιμές της παραμέτρου στερεοποίησης, το κεντρικό τμήμα της συγκόλλησης απαρτίζεται από διαμήκης κόκκους και αυτό σχετίζεται με την σχεδόν κυκλική λίμνη συγκόλλησης. Σε υψηλότερες ταχύτητες και σε πιο επιμήκεις λίμνες συγκόλλησης οι περισσότεροι κόκκοι βρίσκονται πιο κοντά στη ζώνη τήξης και στη συνέχεια μπλέκονται με κόκκους που δημιουργούνται κοντά στην αιχμή της λίμνης με αποτέλεσμα να πάρουμε μια τυχαία κατανομή κόκκων.

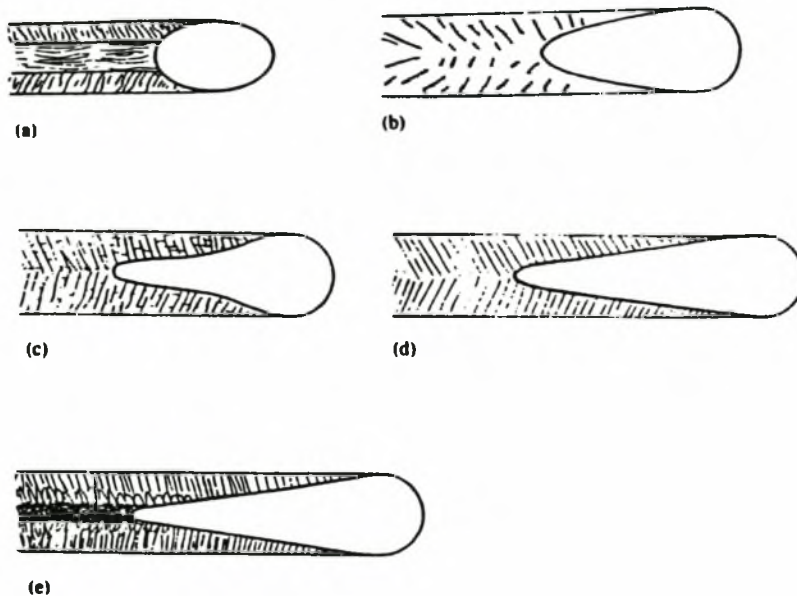
1. Ανάπτυξη ισοαξονικού δενδρίτη
2. Δενδριτική ανάπτυξη σε μορφή κιονική
3. Κυψελοειδής δενδριτική ανάπτυξη (cellular)
4. Cellular growth
5. Επίπεδη ανάπτυξη

Σύσταση C %



Παράγων στερεοποίησης G

Σχήμα 1.14 : Παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της δομής κατά την διάρκεια της στερεοποίησης [3] .



Σχήμα 1.15 : Μορφές της λίκνης συγκόλλησης για διάφορες ταχύτητες συγκόλλησης σε χάλυβα με χαμηλό ποσοστό άνθρακα.

1.9.3 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΗΣ Θ.Ε.Ζ

Γενικά η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Lancaster [3]). Την περιοχή της υψηλής θερμοκρασίας (στην οποία έχουμε αλλαγή της δομής, όπως αύξηση του μεγέθους και της μορφής των κόκκων) και την περιοχή της χαμηλής θερμικής επιρροής όπου δευτερεύοντα φαινόμενα λαμβάνουν μέρος (καθίζηση). Στην περιοχή όπου έχουμε αύξηση του μεγέθους των κόκκων ($1^{\text{η}}$), το τελικό μέγεθος των κόκκων, για οποιοδήποτε κράμα, εξαρτάται από την μέγιστη θερμοκρασία και τον χρόνο θέρμανσης και ψύξης (recidence time). Για χάλυβα βρέθηκε ότι το τελικό μέσο μέγεθος κόκκων είναι:

$$d^n_t = k \cdot t_r + d^n_o$$

όπου k ...σταθερά, t_r ...χρόνος θέρμανσης-ψύξης, d_o ...το αρχικό μέγεθος των κόκκων

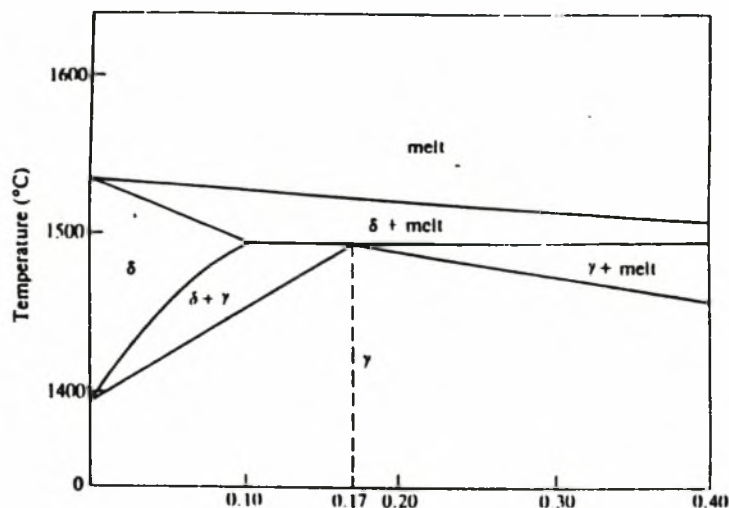
Αν μπορούσαμε να μετρήσουμε τον εκθέτη και την σταθερά (με την βοήθεια των ισόθερων καμπύλων) τότε το μέγεθος των κόκκων στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη δύναται να υπολογιστεί πολύ απλά.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι το τελικό μέγεθος των κόκκων αυξάνεται με αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας και του χρόνου t_r . Συνεπώς όσο πλησιάζουμε στη ζώνη τήξης (λίμνη συγκόλλησης) τόσο αυξάνει το μέγεθος των κόκκων, το οποίο γίνεται μέγιστο ακριβώς στα όρια της ζώνης τήξης (αφού εκεί φθάνουμε την μέγιστη θερμοκρασία τήξης). Έτσι το μέγεθος των κόκκων μέσα στη ζώνη τήξης θα εξαρτάται αποκλειστικά από τον χρόνο t_r , ο οποίος είναι εξαρτώμενος από τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας Q/u . Με την συγκόλληση laser έχουμε την δυνατότητα δημιουργίας βαθιάς και λεπτής λίμνης συγκόλλησης σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές του λόγου Q/u .

1.9.4 ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ

Η δομή του μετάλλου συγκόλλησης των χαλύβων με σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα C είναι με επιμήκεις κιονοειδής κόκκους που εκτείνονται από τα όρια της ζώνης τήξης έως την επιφάνεια της συγκόλλησης. Η υποδομή είναι κυψελοειδής σε χαμηλούς ρυθμούς στερεοποίησης και δενδριτική σε υψηλότερους. Η δομή εξαρτάται αποκλειστικά από την σύσταση του άνθρακα και του νικελίου. Όταν η σύσταση του C είναι

κάτω από 0.1% (σχήμα 1.16) το μέταλλο στερεοποιείται ως δ-φερρίτης. Σε υψηλότερες συστάσεις C οι αρχικοί κρύσταλλοι είναι δ-φερρίτης, αλλά ακριβώς κάτω από τους 1500°C η περιττική αντίδραση λαμβάνει χώρα και το υπολοιπούμενο μέταλλο συγκόλλησης στερεοποιείται ως ωστενίτης. Η διαλυτότητα του θείου στον φερρίτη είναι σχετικά υψηλή αλλά στον ωστενίτη σχετικά χαμηλή. Συνεπώς υπάρχει πιθανότητα με σύσταση C>0.1% το θείο να διοχετεύεται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη, προάγοντας μια αδυναμία μέσα στους κόκκους και την δημιουργία ρηγμάτων κατά την στερεοποίηση.



Σχήμα 1.16 : Τομή του διαγράμματος Fe-C όπου φαίνεται η περιττική αντίδραση

Το μαγγάνιο περιορίζει το παραπάνω φαινόμενο αλλά όσο αυξάνει η σύσταση του C τόσο μεγαλώνει η απαιτούμενη σύσταση του μαγγανίου για να αποφευχθεί η ρηγμάτωση. Τα σουλφίδια μπορούν να διαχωρίσουν τις δενδριτικές περιοχές και να δημιουργήσουν μια ενδοδενδριτική ρηγμάτωση. Ανάλογα αποτελέσματα έχει και η επίδραση του φωσφόρου. Η ρηγμάτωση κατά την στερεοποίηση μπορεί να περιοριστεί ως εξής:

- 1) Χρησιμοποιώντας χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα.
- 2) Κρατώντας τις συστάσεις του θείου και του φωσφόρου σε χαμηλά επίπεδα.
- 3) Σιγουρεύοντας το ποσοστό του μαγγανίου να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα σε ενδεχόμενη διάλυση του θείου και δημιουργία σουλφιδίων.

1.9.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΕΩΝ - ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ D36

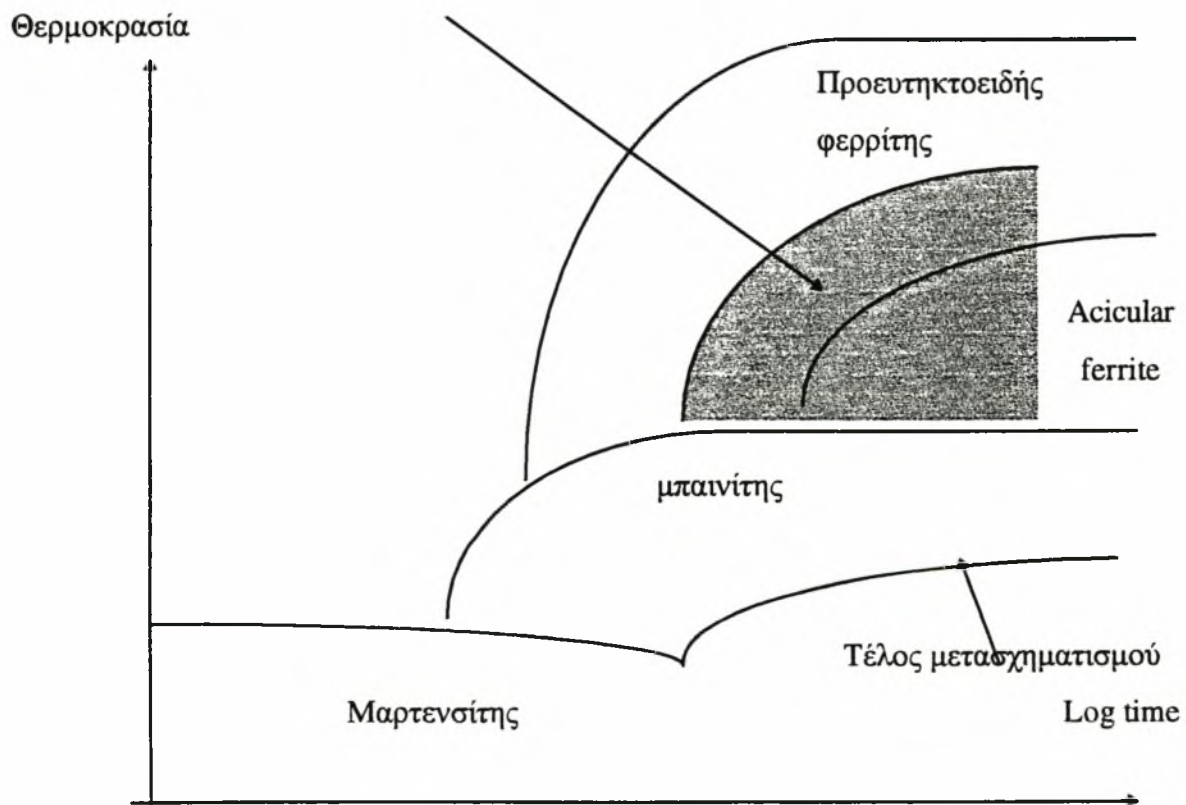
Πριν προχωρήσουμε στους διάφορους μετασχηματισμούς φάσεων θα πρέπει να αναφερθούμε στη μικροδομή των χαλύβων. Οι χάλυβες που μας ενδιαφέρουν είναι οι απλοί ανθρακοχάλυβες όπου το κυρίαρχο συστατικό κραμάτωσης είναι ο άνθρακας. Όταν η περιεκτικότητα του άνθρακα, στους χάλυβες αυτούς, είναι κάτω από 0.8% η φάση της μήτρας είναι ο φερρίτης, που είναι ένα στερεό διάλυμα παρεμβολής άνθρακα σε σιδήρο. Όταν ο χάλυβας περιέχει άνθρακα μεταξύ 0.02% και 0.8% η φερριτική αυτή μήτρα λαμέλες μιας δεύτερης φάσης που αποτελούνται από μια χημική ένωση σιδήρου-άνθρακα με τύπο Fe_3C . Η λαμελική αυτή διευθέτηση του φερρίτη και του σεμεντίτη ονομάζεται περλίτης.

Όταν ένας μετασχηματισμός εμποδιστεί με ταχεία ψύξη, είναι δυνατόν να σχηματισθούν εντελώς νέες φάσεις χωρίς ισορροπία. Οι φάσεις ισορροπίας σε έναν απλό ανθρακοχάλυβα (χωρίς κραματικά στοιχεία) για θερμοκρασία δωματίου είναι ο σίδηρος και ο γραφίτης. Στη πράξη όμως ο γραφίτης δεν εμφανίζεται σχεδόν ποτέ. Αντί του γραφίτη σχηματίζεται μια σταθερή φάση χωρίς ισορροπία, ο σεμεντίτης (Fe_3C). Από τις τρεις αμετάβλητες αντιδράσεις μετασχηματισμού φάσεων που εμφανίζονται στο διάγραμμα σιδήρου-άνθρακα, η μόνη που γίνεται στη στερεά κατάσταση εξ' ολοκλήρου είναι η ευτηκτοειδής αντίδραση. Επειδή η διάχυση στη στερεά φάση είναι σχετικά βραδεία, ο μετασχηματισμός μπορεί να εμποδισθεί εντελώς αν βαφεί ο χάλυβας κάτω από την θερμοκρασία των $723^{\circ}C$ με αρκετά μεγάλη ταχύτητα. Για να γίνει αντιληπτή η προέλευση των δομών χωρίς ισορροπία, είναι αναγκαίο να συζητηθούν πρώτα οι δομές που σχηματίζονται κατά τη βραδεία ψύξη απλών ανθρακοχαλύβων. Ο άνθρακας είναι περισσότερο διαλυτός στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα (γ -ωστενίτης) απ' ό τι στο κυβικό χωροκεντρωμένο (α -φερρίτης ή δ -σίδηρος) επειδή οι χώροι παρεμβολής μεταξύ των ατόμων είναι μεγαλύτεροι στο εδροκεντρωμένο. Οι προοδευτικές μεταβολές που συμβαίνουν κατά την βραδεία ψύξη ενός χάλυβα με περιεκτικότητα 0,4% φαίνονται στο διάγραμμα Fe-C. Τέτοιες μικροδομές στις οποίες οι φάσεις που παρουσιάζονται είναι ο φερρίτης και ο σεμεντίτης, σχηματίζονται από χάλυβα κατά την βραδεία ψύξη. Αν ο χάλυβας βαφεί τότε σχηματίζονται δύο άλλες μικροδομές, επειδή η ευτηκτική αντίδραση εμποδίζεται.

1) Όταν ο ωστενίτης βαφεί σε μια θερμοκρασία μεταξύ 200 και $400^{\circ}C$ και διατηρηθεί στην θερμοκρασία αυτή είναι δυνατόν να σχηματισθεί μπαινίτης. Ο μπαινίτης αποτελείται από μια διασπορά υπομικροσκοπικών καρβιδίων σε μια εξαιρετικά παραμορφωμένη μήτρα φερρίτη που περιέχει πάνω από 0,02% άνθρακα.

2) Αν ο ωστενίτης βαφεί σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από εκείνες που απαιτούνται για τον σχηματισμό μπαινίτη είναι δυνατόν να σχηματισθεί μαρτενσίτης. Η φάση αυτή είναι εξαιρετικά σκληρή και εύθραυστη στην οποία όλος ο άνθρακας βρίσκεται παγιδευμένος μέσα στο πλέγμα του σιδήρου με μορφή υπέρκορου στερεού διαλύματος. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη και μπαινίτη όπως επίσης και σε προευτηκτοειδή φερρίτη και σεμεντίτη φαίνεται ότι γίνεται με διεργασίες πυρήνωσης και ανάπτυξης συνεπώς η διεργασία αυτή ελέγχεται από την ταχύτητα διάχυσης στις αντίστοιχες φάσεις. Δηλαδή οι μετασχηματισμοί αυτοί εξαρτώνται και από τον χρόνο και από την θερμοκρασία. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη γίνεται χωρίς την διάχυση και τόσο γρήγορα που είναι σχεδόν ανεξάρτητος του χρόνου. Το τμήμα του ωστενίτη που μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την θερμοκρασία. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία βαφής τόσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα του μετασχηματισμού. Για τον λόγο αυτό, σε προηγούμενη παράγραφο, αναφέραμε την επιρροή του περιβάλλοντος γενικά στην συγκόλληση laser.

Θέση σχηματισμού του βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite)



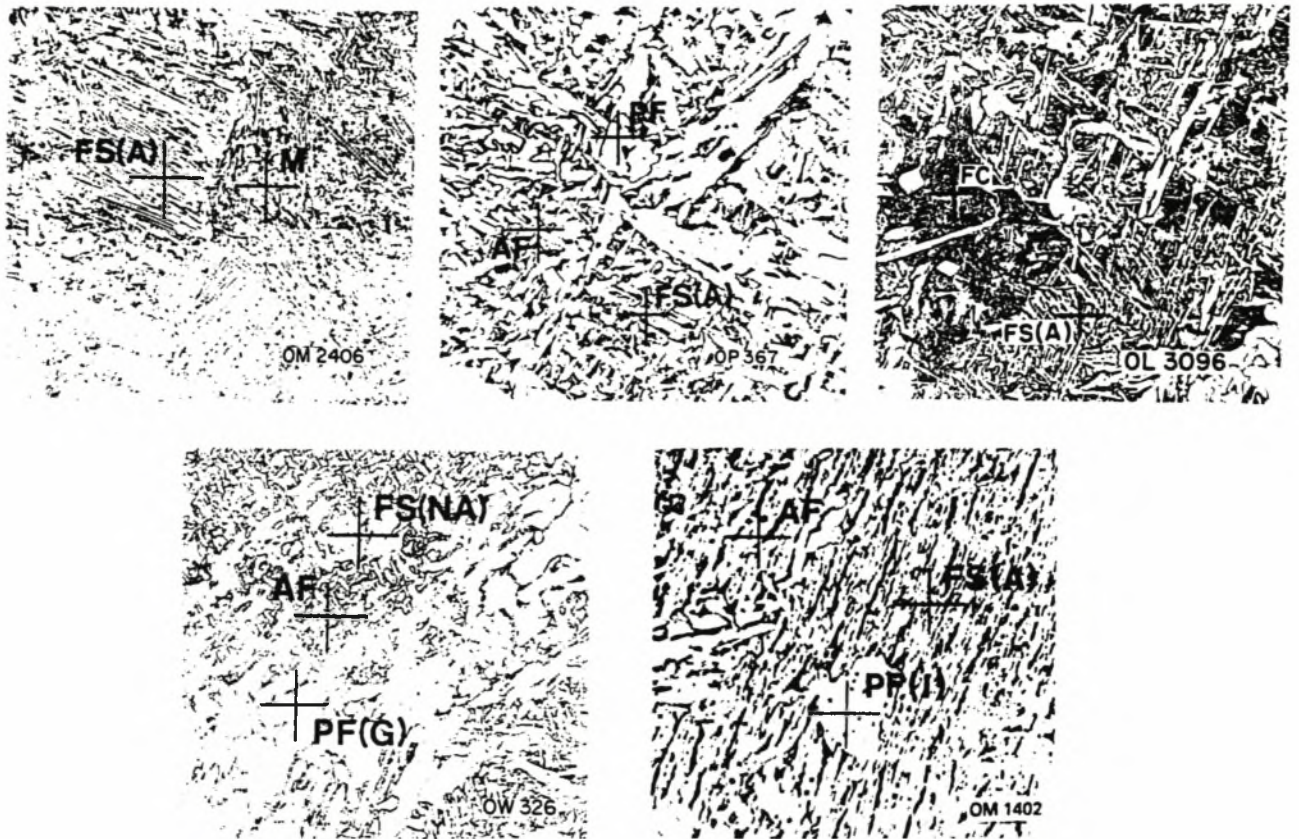
Σχήμα 1.17: Μια καμπύλη TTT για έναν υποευτηκτοειδή χάλυβα

Τα διαγράμματα φάσεων δεν δίνουν την πορεία που ακολουθεί ο μετασχηματισμός διάσπασης μιας φάσης εξαρτώμενος από τον χρόνο. Μια τέτοια πορεία μπορεί να παρασταθεί από μια καμπύλη TTT όπως αυτή του σχήματος 1.17 και η οποία ισχύει για χάλυβα με ποσοστό κάτω του 0.8% σε άνθρακα. Εάν ο υποευτηκτοειδής χάλυβας του σχήματος 1.17 ψυχθεί με μικρή ταχύτητα από την θερμοκρασία T_0 , σχηματίζεται κατ' αρχήν ευτηκτοειδής φερρίτης, ενώ ταυτόχρονα η σύσταση του ωστενίτη μεταβάλλεται προς 0,8% σε άνθρακα καθώς προσεγγίζει η ευτηκτοειδής θερμοκρασία. Αν ο χάλυβας ψυχθεί πολύ γρήγορα από την θερμοκρασία T_0 σε μια θερμοκρασία κάτω από την περλιτική μύτη και στη συνέχεια αφεθεί να μετασχηματιστεί ισόθερμα, έχουμε την δημιουργία 100% μπαινιτικής δομής. Αν πάλι η θερμοκρασία ψύξης είναι κάτω από την ευθεία M_s , τότε έχουμε την δημιουργία μαρτενσίτη. Σε μια συγκόλληση laser είναι δυνατόν να δούμε πολλές διαφορετικές περιοχές αφού τόσο η δημιουργία μαρτενσίτη όσο και η δημιουργία μπαινίτη είναι εφικτές.

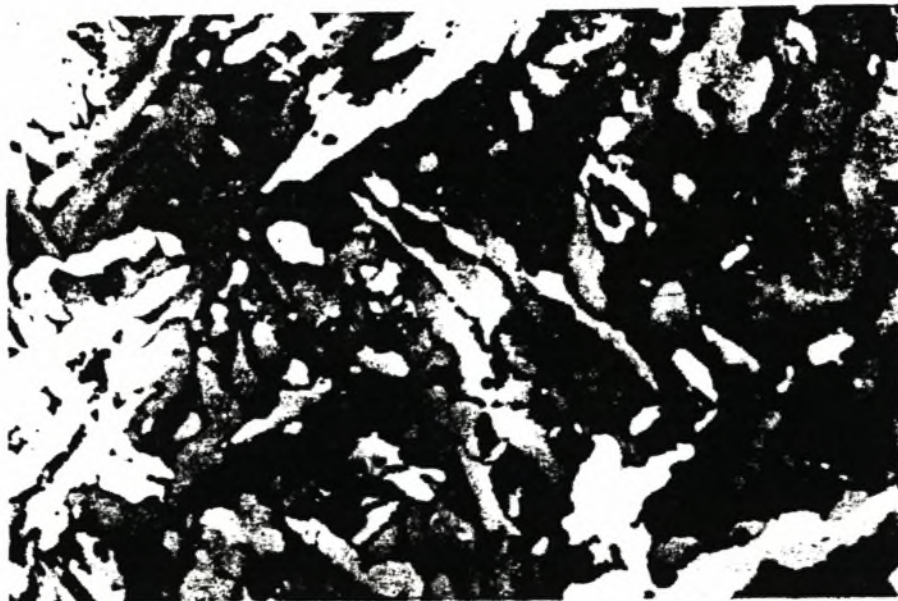
1.9.6 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΛΙΜΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η μικροδομή και οι ιδιότητες της λίμνης συγκόλλησης επηρεάζονται από την σύσταση και από τους παράγοντες που έγινε η συγκόλληση. Οι ρυθμοί ψύξης επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στην τελική μικροδομή αφού οριοθετούν το φαινόμενο της διάχυσης. Το μέγεθος των κόκκων εξαρτάται από την σύσταση και τον ρυθμό πρόσδοσης της θερμότητας Q/u . Εάν η σύσταση παραμένει σταθερή τότε η μικροδομή εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο Q/u .

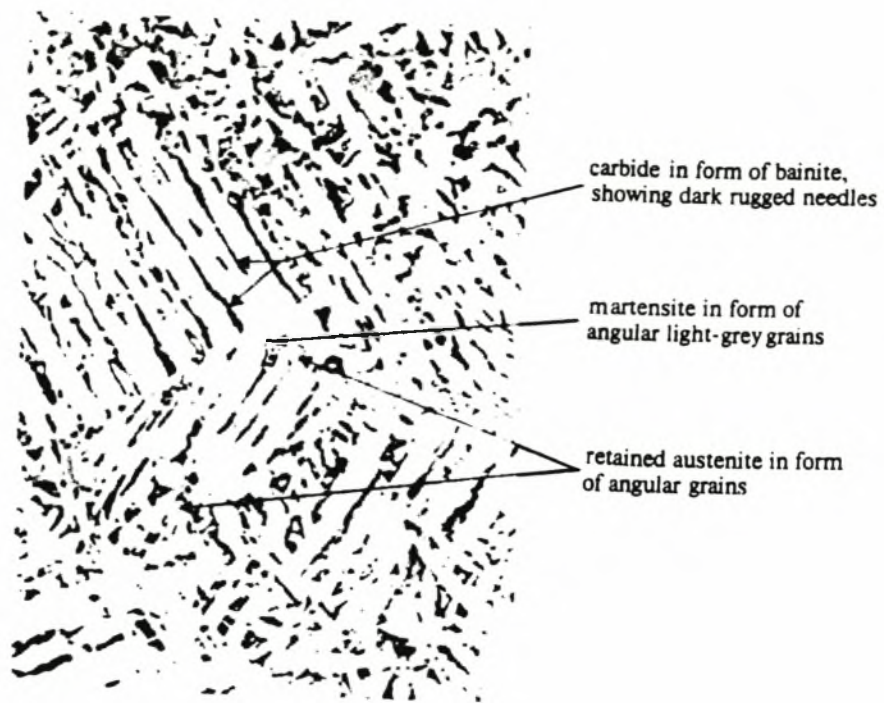
Στο σχήμα 1.19 φαίνονται τα διάφορα είδη δομών που προκύπτουν. Βασικά πρόκειται για ένα σύμπλεγμα δομών ξεκινώντας από τον αρχικό φερρίτη (PF), τον φερρίτη στα όρια των κόκκων (PF(G)), τον (PF(I)) και τον φερρίτη 'Widmanstätten', ο οποίος μοιάζει σε πολλά σημεία με τον μαρτενσίτη. Στο σχήμα 1.18 α)-b) φαίνεται και η λαμελική δομή του φερρίτη. Πολλές φορές έχουμε και τον μετασχηματισμό σε βελονοειδή φερρίτη (AF). Ο βελονοειδής φερρίτης φαίνεται με περισσότερες λεπτομέρειες στο σχήμα 1.19, ενώ στο σχήμα 1.20 [1] απεικονίζεται φερρίτης με ευθυγραμμισμένο μαρτενσίτη. Η καλή ολκιμότητα της ζώνης τήξης σχετίζεται με την υψηλή αναλογία βελονοειδή φερρίτη ενώ δομές όπως αυτή του FS(A) φερρίτη θεωρούνται ανεπιθύμητες, από την σκοπιά της ολκιμότητας.



Σχήμα 1.10 : Τυπικές μικροδομές της λίμνης συγκόλλησης σε χάλυβες (x500)



Σχήμα 1.19 : Βελονοειδής φερρίτης (Acicular ferrite) (x1600)



Σχήμα 1.20 : Λαμελική δομή, φερρίτης με ευθυγραμμισμένο μαρτενσίτη (x1000)

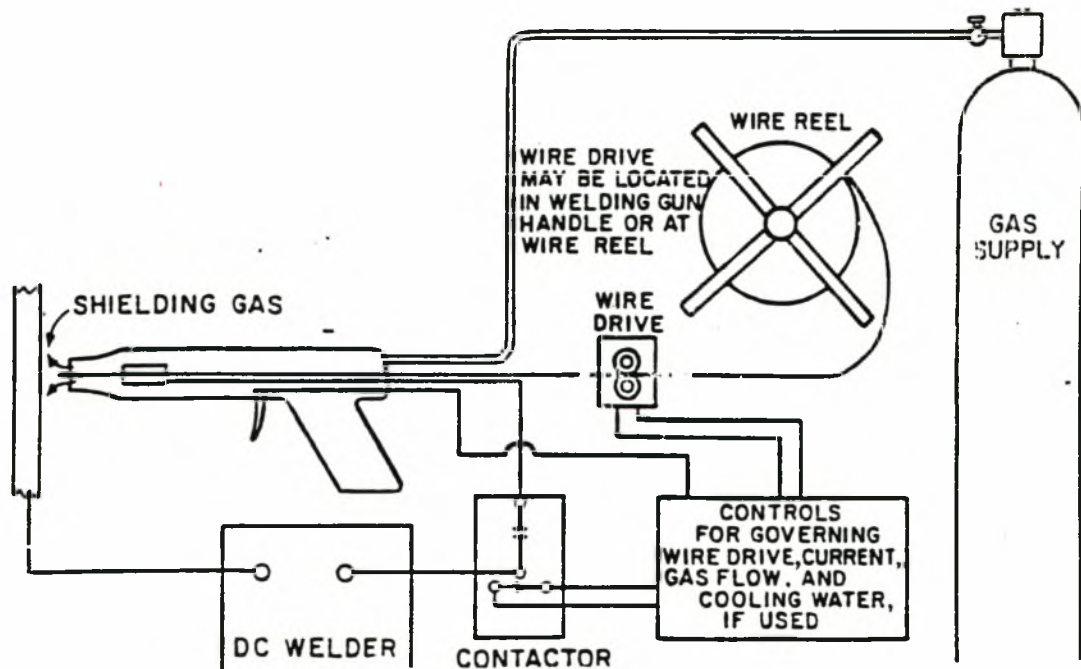
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό οι συμβατικές συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν στα Ελληνικά Ναυπηγεία, ενώ οι συγκολλήσεις Laser έγιναν στην Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ, στη μονάδα Laser CO₂ μέγιστης ισχύος 1750 Watts. Παρακάτω περιγράφονται όλες εκείνες οι συνθήκες με τις οποίες έγιναν οι διάφορες συγκολλήσεις. Κατόπιν αναφέρονται η πειραματική διαδικασία καθώς και η θεωρητική βάση του τεστ εφελκυσμού, των σκληρομετρήσεων και της μεταλλογραφίας (μικροδομή και μακροδομή).

2.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Στα πλαίσια του ΠΑΒΕ89ΒΕ154 μελετήθηκαν οι συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων για ναυπηγικές κατασκευές με αποκλειστικό σκοπό την μείωση των παραμένουσων τάσεων και παραμορφώσεων. Έγιναν πειράματα αυχενικών και μετωπικών συγκολλήσεων σε ελάσματα χάλυβα D36 ναυπηγικών κατασκευών πάχους 4mm.



Σχήμα 2.1: Σχηματική παρουσίαση της συγκόλλησης MIG(Metal Insert Gas)

Η σύσταση του χάλυβα D36 είναι η ακόλουθη:

C=max0.18 , Si=0.15 , Mn=1.6-1.9 , Al=0.018 και S=max0.04

Η μέθοδος συγκόλλησης η οποία χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος M.I.G (Metal Inert Gas). Η χρησιμοποιηθείσα μηχανή συγκόλλησης είναι τύπου MUREX Transing 500. Σχηματική παράσταση της μεθόδου αυτής φαίνεται στο σχήμα 2.1. Το υλικό του σύρματος της συγκόλλησης ήταν χάλυβας SG2 κατά DIN 8559 διαμέτρου 0,8mm.

Έγινε κάποια ζύγιση των ελασμάτων πριν και μετά την συγκόλληση για να βρεθεί το βάρος του αποτιθέμενου μετάλλου. Αυτή η μελέτη δεν μας απασχολεί διότι με την τεχνική του laser δεν προσθέτουμε υλικό. Ίσως από εκεί να ξεκινούν όλα τα πλεονεκτήματα της μεθόδου. Οι μέθοδοι οι οποίες προτάθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- συγκολλήσεις skip- back step

-συγκολλήσεις με παλμικά ρεύματα

Η μεν πρώτη μεθοδολογία στηρίζεται στο γεγονός ότι για κάθε υλικό υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος συγκόλλησης για το οποίο οι αναπτυσσόμενες παραμένουσες τάσεις (άρα και παραμορφώσεις) είναι ελάχιστες λόγω ταχείας απαγωγής της θερμότητας , η δε δεύτερη στηρίζεται στο γεγονός ότι τα παλμικά ρεύματα εισάγουν μικρότερο ποσό θερμότητας και έτσι μειώνονται οι παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις. Βέβαια η μέθοδος των παλμικών ρευμάτων δεν έγινε για διάφορους λόγους. Στη θέση αυτής της μεθόδου εξετάστηκαν δύο άλλες μέθοδοι: Συγκολλήσεις με στατική - δυναμική διαφορική προέκταση και με πρόκαμψη. Οι δύο αυτές μέθοδοι προσαρμόζονται στις ανάγκες και στις δυνατότητες των Ελληνικών Ναυπηγείων και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στο εξωτερικό.

Τα αποτελέσματα τα οποία βγήκαν καλύπτουν ένα εύρος εφαρμογών, όσον αφορά το πάχος των ελασμάτων. Το εύρος αυτό σύμφωνα με τις προδιαγραφές που επιβάλει το GERMANISCHER LLOYD κυμαίνεται μεταξύ 2,5 mm έως 7,2mm. Επειδή με τα σημερινά δεδομένα δεν είναι δυνατόν να γίνουν αυχενικές συγκολλήσεις (έλλειψη υλικού , δυσκολία συγκόλλησης με το μηχάνημα laser της EBETAM), μας ενδιαφέρουν τα αποτελέσματα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετωπικές συγκολλήσεις.

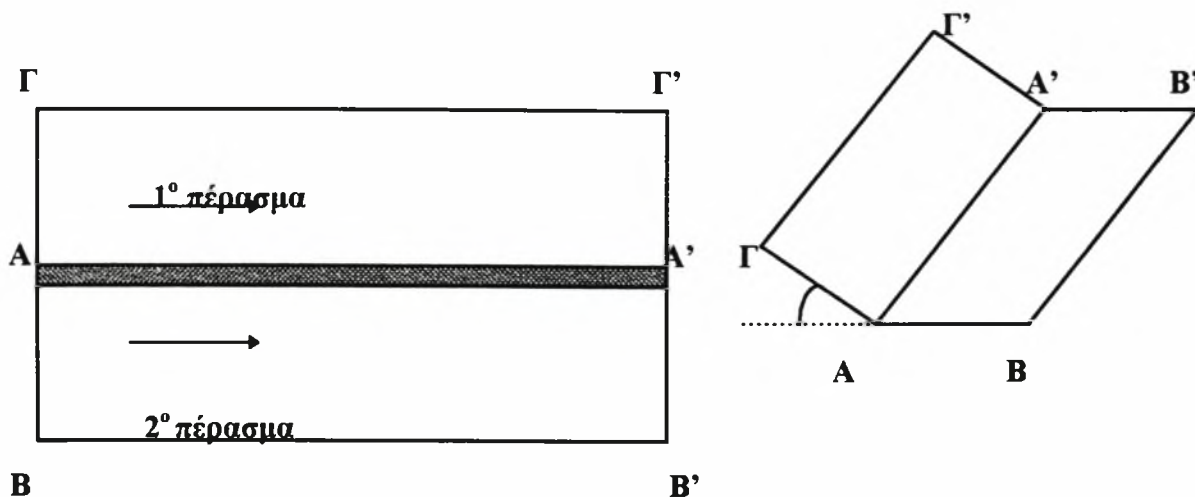
Η μέθοδος skip- back step χρησιμοποιήθηκε για μετωπικές συγκολλήσεις και οδήγησε σε μείωση των παραμορφώσεων. Είναι μια μέθοδος τεχνικά εφαρμόσιμη και χρησιμοποιείται ευρύτατα στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές.

2.2.1 ΜΕΤΩΠΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Συγκολλήθηκαν μετωπικά ελάσματα πλάτους 200mm με τα ακόλουθα μήκη:

$\Delta 6=600\text{mm}$	$\Delta 1=100\text{mm}$
$\Delta 7=700\text{mm}$	$\Delta 2=200\text{mm}$
$\Delta 8=800\text{mm}$	$\Delta 3=300\text{mm}$
$\Delta 9=900\text{mm}$	$\Delta 4=400\text{mm}$
$\Delta 10=1000\text{mm}$	$\Delta 5=500\text{mm}$

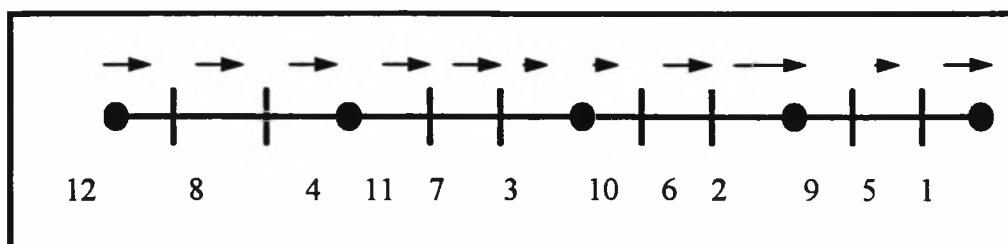
Ο τρόπος συγκόλλησης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2. Η απόσταση μεταξύ των συγκολλούμενων ελασμάτων ήταν 1mm.



Σχήμα 2.2: Κατεύθυνση συγκόλλησης και μορφή παραμορφωμένου δοκιμίου

2.2.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ SKIP-BACK STEP

Με αυτή την τεχνική της συγκόλλησης το δοκίμιο συγκολλάτε κατά τμήματα. Κάθε τμήμα που συγκολλάτε ακολουθείται από ένα κενό διάστημα, έτσι ώστε να μην υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας λόγω συσσωρευσης θερμότητας. Επιπλέον το πέρας κάθε τμήματος συγκόλλησης αντικρίζει την αρχή του προηγούμενου. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η μέθοδος αυτή και η σειρά που ακολουθείται κατά την συγκόλληση των διαφόρων τμημάτων.



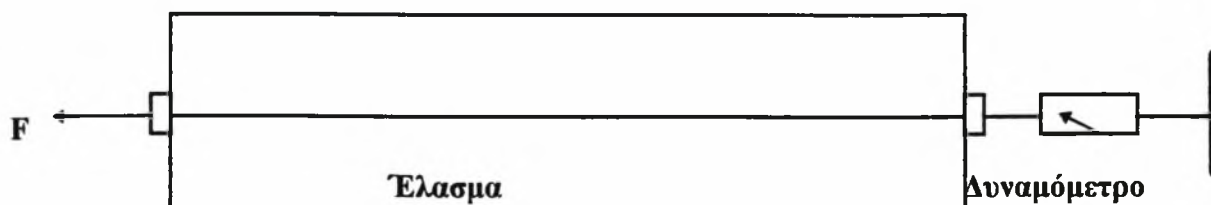
Σχήμα 2.3: Μέθοδος συγκόλλησης Skip back step

2.2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ

Κατ' αυτόν τον τρόπο ποντάρονται, πάνω στα ελάσματα, δυο χαλύβδινες γωνίες, έτσι ώστε να εμποδίζεται η διαμήκης παραμόρφωση των ελασμάτων. Μετά το πέρας της συγκόλλησης και αφού το δοκίμιο κρυώσει αφαιρούνται οι χαλύβδινες γωνίες.

2.2.4 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ

Κατά τις συγκολλήσεις αυτές εφαρμόζονται εφελκυστικές τάσεις στα δοκίμια με την βοήθεια της διάταξης προ έντασης του σχήματος 2.4.



Σχήμα 2.4: Συγκόλληση με προ ένταση

Η εφαρμογή της δύναμης γίνεται με ειδικό κινητήρα πεπιεσμένου αέρα. Ένα ψηφιακό δυναμόμετρο που συνδέεται εν σειρά δίνει την δυνατότητα για απευθείας μέτρηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Η συγκόλληση γίνεται αφού εφαρμοστεί κάθε φορά η τάση. Ακολούθως κρατώντας σταθερό το μήκος που εφελκύστηκε παρακολουθείται η μεταβολή της τάσεως μέχρι να ψυχθεί το δοκίμιο και τότε απελευθερώνεται η τάση.

2.2.5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε με τη χρησιμοποίηση ειδικών μολυβιών θερμοκρασίας. Χρησιμοποιήθηκε μολύβι 100 °C και μετρήθηκε η απόσταση όπου έχουμε αλλαγή του χρώματος από λευκό σε κυανούν (άρα η θερμοκρασία ξεπέρασε τους 100 °C). Στο δοκίμιο No7 μετρήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία κατά μήκος και κατά πλάτος, κατά την διάρκεια της συγκόλλησης.

2.2.6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις των παραμένουσων τάσεων έγινε με τη χρησιμοποίηση ειδικών μετρητών εύκαμπτης αντίστασης (strain gauge). Η λειτουργία αυτών των μετρητών έγκειται στο γεγονός ότι μεταβάλλεται η αντίσταση του σύρματος για κάθε ελαστική ή πλαστική μεταβολή. Κάτω από καταπόνηση εφελκυσμού το μήκος του αυξάνει και η εγκάρσια τομή της περιοχής μειώνεται σύμφωνα με το φαινόμενο του Poisson. Σαν αποτέλεσμα η αντίσταση αυξάνεται. Αν ένα σύρμα με αντίσταση R και μήκος L είναι τεντωμένο, από μια απειροστή αύξηση ΔL η αντίσταση μεταβάλλεται κατά ΔR και καθορίζεται από τον συντελεστή μέτρησης της καταπόνησης, τον GF (Gauge Factor). Αυτός δίνεται από την σχέση:

$$\Delta R/R = (GF)\Delta L/L \quad (2.1)$$

Όπου $\Delta L/L = \varepsilon$, οπότε :

$$\Delta R/R = (GF) \varepsilon \quad (2.2)$$

Στο έργο αυτό χρησιμοποιήθηκαν strain gauge τύπου HBM3/350/LG11/S με $R=350 \pm 0.2\%I$ και $GF=2.06 \pm 0.5\%$.

Το strain gauge επικολλάται πάνω στην λαμαρίνα κατά διεύθυνση παράλληλη στον άξονα της συγκόλλησης. Γίνεται μέτρηση της αντίστασης και αφού το τεμάχιο του μετάλλου με το strain gauge κοπεί και απελευθερωθούν οι τάσεις ξαναμετρείται η αντίσταση και υπολογίζεται η διαφορά $\Delta R = R' - R$. Επειδή όμως είναι $\varepsilon = \sigma_x / E$ και θεωρώντας τις τάσεις σ_x και σ_y αμελητέες (η λαμαρίνα έχει μικρό πλάτος -σε σχέση με το μήκος - και έχει πολύ μικρό πάχος) η παραπάνω σχέση μας δίνει:

$$\sigma_x = (E / GF) (\Delta R / R) \text{ Ksi} \quad (2.3)$$

Όπου E = μέτρο ελαστικότητας κατά Young (για χάλυβα $E=2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)

2.2.7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Οι παραμορφώσεις κάμψεως και λυγισμού είναι αυτές που δημιουργούν προβλήματα. Αντιθέτως η γωνιακή παραμόρφωση και η διαμήκης συστολή παίζουν μικρότερο ρόλο στην δημιουργία προβλημάτων. Η μέτρηση της παραμόρφωσης κάμψης έγινε με τανυσμό ελαστικής πετονιάς ανάμεσα στα δύο άκρα με την βοήθεια ψηφιακού παχυμέτρου με ακρίβεια $\pm 1 \text{ mm}$. Η διαμήκης συστολή μετρήθηκε με εύκαμπτο κανόνα και η γωνιακή παραμόρφωση με τον ίδιο τρόπο όπως και η παραμόρφωση κάμψης.

2.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ LASER

2.3.1 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER

Η εκτέλεση των συγκολλήσεων laser πραγματοποιήθηκε στη μονάδα laser CO₂ της Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ. Το διαθέσιμο υλικό ήταν χάλυβας D36 για ναυπηγικές κατασκευές, όμοιο με το υλικό που έγιναν οι συμβατικές συγκολλήσεις. Η κραματική σύνθεση δόθηκε στην ενότητα 2.2. Οι πληροφορίες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία δεν είναι πολλές. Εξάλλου η πρόσβαση στις οιοσδήποτε πληροφορίες ήταν πολύ δύσκολη διότι η συγκόλληση laser δεν είναι ένας αναπτυγμένος κλάδος, ιδιαίτερα στην Ελλάδα. Μονολότι υπήρχαν κάποια στοιχεία για την επιρροή των διαφόρων παραμέτρων, η συγκεκριμενοποίηση των στοιχείων αυτών για τον χάλυβα D36, δεν υπήρχε. Έτσι αναγκαστικά έπρεπε να γίνει μια σειρά πειραμάτων, με την βοήθεια των οποίων θα μπορούσε να βρεθεί η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων στον συγκεκριμένο χάλυβα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την συγκόλληση laser είναι το σημείο εστίασης, η ισχύς και η ταχύτητα της δέσμης.

Έγιναν 2 σειρές πειραμάτων, η σειρά Α και η σειρά Β. Στη σειρά Α το σημείο εστίασης κρατήθηκε σταθερό στο +1mm πάνω από την επιφάνεια. Κάναμε 14 «κορδόνια» μεταβάλλοντας την ισχύ και την ταχύτητα. Σκοπός ήταν να βρεθεί μια περιοχή μέσα στην οποία θα κινηθούμε. Εκ των προτέρων ήταν γνωστό ότι με σημείο εστίασης +1mm πάνω από την επιφάνεια του ελάσματος, η ποιότητα των παραγόμενων συγκολλήσεων δεν θα ήταν η καλύτερη δυνατή. Στη Β σειρά πειραμάτων το σημείο εστίασης ήταν 0mm, -1mm, -2mm κάτω από την επιφάνεια. Κάναμε 29 «κορδόνια» μεταβάλλοντας και πάλι την ισχύ και την ταχύτητα. Όπως περιγράφηκε και στην ενότητα 1 το ικανοποιητικότερο σημείο εστίασης είναι (-)1mm κάτω από την επιφάνεια. Το δεδομένο αυτό επαληθεύτηκε μετά από την εκτέλεση των συγκολλήσεων. Όμως η ανάγκη και το ενδιαφέρον να γίνει κάποιο είδος παραμετρικής ανάλυσης, μας οδήγησε στην εκτέλεση συγκολλήσεων με σημείο εστίασης 0mm και (-)2mm.

Όλα τα δεδομένα, η αρίθμηση των δοκιμών και οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2.1: Πειραματικά δεδομένα της 1ης σειράς πειραμάτων

<i>Αριθμός δοκιμίου</i>	<i>Σημείο εστίασης</i>	<i>Ισχύς δέσμης</i>	<i>Ταχύτητα κεφαλής</i>	<i>Προστατευτικό αέριο</i>	<i>Πίεση προστατευτικού αερίου</i>
A1	+1	1140(60%)	800	Ηλιο	4bar
A2	+1	1140(60%)	400	Ηλιο	4bar
A3	+1	1140(60%)	200	Ηλιο	4bar
A4	+1	1140(90%)	80	Ηλιο	4bar
A5	+1	1500(90%)	800	Ηλιο	4bar
A6	+1	1500(90%)	600	Ηλιο	4bar
A7	+1	1500(90%)	400	Ηλιο	4bar
A8	+1	1500(90%)	200	-	-
A9	+1	1500(90%)	200	Ηλιο	4bar
A10	+1	1500(90%)	800	Αζωτο	4bar
A11	+1	1500(90%)	400	Αζωτο	4bar
A12	+1	1500(90%)	1600	Αζωτο	4bar
A13	+1	1500(90%)	800	Αζωτο	4bar
A14	+1	1500(90%)	600	Αζωτο	4bar

Πίνακας 2.2: Πειραματικά δεδομένα της 2ης σειράς πειραμάτων

<i>Αριθμός δοκιμίου</i>	<i>Σημείο εστίασης</i>	<i>Ισχύς δέσμης</i>	<i>Ταχύτητα κεφαλής</i>	<i>Προστατευτικό αέριο</i>	<i>Πίεση προστατευτικού αερίου</i>
B1	-1	1140(60%)	200	Ηλιο	4bar
B2	-1	1140(60%)	400	Ηλιο	4bar
B3	-1	1140(60%)	600	Ηλιο	4bar
B4	-1	1540(90%)	200	Ηλιο	4bar
B5	-1	1540(90%)	400	Ηλιο	4bar
B6	-1	1540(90%)	600	Ηλιο	4bar
B7	-1	1680(97%)	200	Ηλιο	4bar
B8	-1	1680(97%)	400	Ηλιο	4bar
B9	-1	1680(97%)	600	Ηλιο	4bar
B10	-1	1680(97%)	800	Ηλιο	4bar
B11	0	1140(60%)	200	Ηλιο	4bar
B12	0	1140(60%)	400	Ηλιο	4bar

B13	0	1140(60%)	600	Ηλιο	4bar
B14	0	1540(90%)	200	Ηλιο	4bar
B15	0	1540(90%)	400	Ηλιο	4bar
B16	0	1540(90%)	600	Ηλιο	4bar
B17	0	1680(97%)	200	Ηλιο	4bar
B18	0	1680(97%)	400	Ηλιο	4bar
B19	0	1680(97%)	600	Ηλιο	5bar
B20	-2	1140(60%)	200	Ηλιο	4bar
B21	-2	1140(60%)	400	Ηλιο	4bar
B22	-2	1140(60%)	600	Ηλιο	4bar
B23	-2	1540(90%)	200	Ηλιο	5bar
B24	-2	1540(90%)	400	Ηλιο	4bar
B25	-2	1540(90%)	600	Ηλιο	4bar
B26	-2	1680(97%)	200	Ηλιο	4bar
B27	-2	1680(97%)	400	Ηλιο	4bar
B28	-2	1680(97%)	600	Ηλιο	4bar
B29	-2	1680(97%)	800	Ηλιο	4bar

Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το κυριότερο προστατευτικό αέριο είναι το ήλιο το οποίο είναι αδρανές και προσφέρει την καλύτερη προστασία. Η πίεση του προστατευτικού αερίου είναι 4bar σύμφωνα με την προδιαγραφή του κατασκευαστή του συγκεκριμένου μηχανήματος. Η πίεση μπορεί να φθάσει τα 6bar, ωστόσο αυτό θα δημιουργούσε κάποια προβλήματα σχετικά με την μορφή της ζώνης τήξης. Αναλυτικότερα για το θέμα αυτό θα μιλήσουμε σε επόμενη ενότητα. Στις συγκολλήσεις με σημείο εστίασης +1mm πάνω από την επιφάνεια, χρησιμοποιήσαμε ως προστατευτικό αέριο το άζωτο. Το άζωτο χρησιμοποιείται κυρίως στην κοπή αλλά έπρεπε να βρεθεί ποια θα είναι η επίδρασή του πάνω στην συγκόλληση και αν όντως τα θεωρητικά δεδομένα συμπίπτουν με τα πειραματικά.

2.3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η μέτρηση της ακτίνας της δέσμης έγινε με την βοήθεια ενός plexiglass. Τοποθετήσαμε κάτω από την κεφαλή ένα κομμάτι plexiglass και κάνοντας διαδοχικά ‘κτυπήματα’ (για τις διάφορες τιμές της ισχύος της δέσμης, ανοίγουμε και κλείνουμε το laser

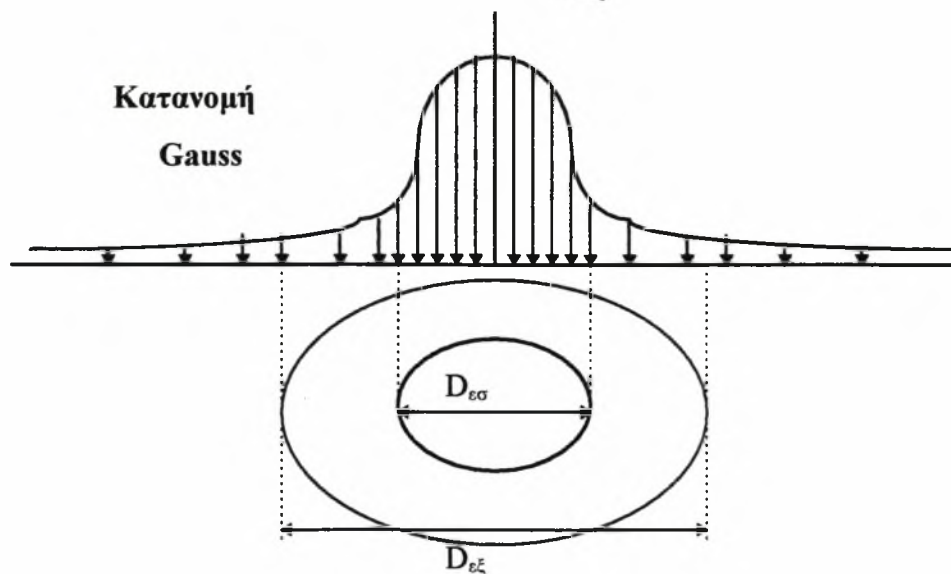
χωρίς καθυστέρηση) βρίσκουμε την ακτίνα της δέσμης. Πιο συγκεκριμένα για το σημείο εστίασης -1mm βρήκαμε τα ακόλουθα:

$$Q=1140W : D_{εξ}=2,3\mu\text{m} \quad D_{εσ}=1\mu\text{m}$$

$$Q=1500W : D_{εξ}=2,5\mu\text{m} \quad D_{εσ}=1,2\mu\text{m}$$

$$Q=1680W : D_{εξ}=3\mu\text{m} \quad D_{εσ}=1,3\mu\text{m}$$

Όπου οι διάμετροι $D_{εξ}$ και $D_{εσ}$ αναφέρονται στην εσωτερική και στην εξωτερική ακτίνα της δέσμης. Το αποτύπωμα πάνω στο πλαστικό ήταν ανάλογο με την κατανομή Gauss. Δηλαδή υπήρχε μια διαμπερής οπή όπου συγκεντρωνόταν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος καθώς επίσης και μια περιοχή όπου φαινόταν ότι χτύπησε η δέσμη αλλά χωρίς μεγάλη ισχύ ώστε να ανοιχθεί οπή. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι δύο διάμετροι $D_{εξ}$ και $D_{εσ}$



Σχήμα 2.5 : Σχηματική μορφή της κατανομής Gauss

Έτσι για τα διάφορα σημεία εστίασης και για τις χρησιμοποιούμενες τιμές της ισχύος έχω:

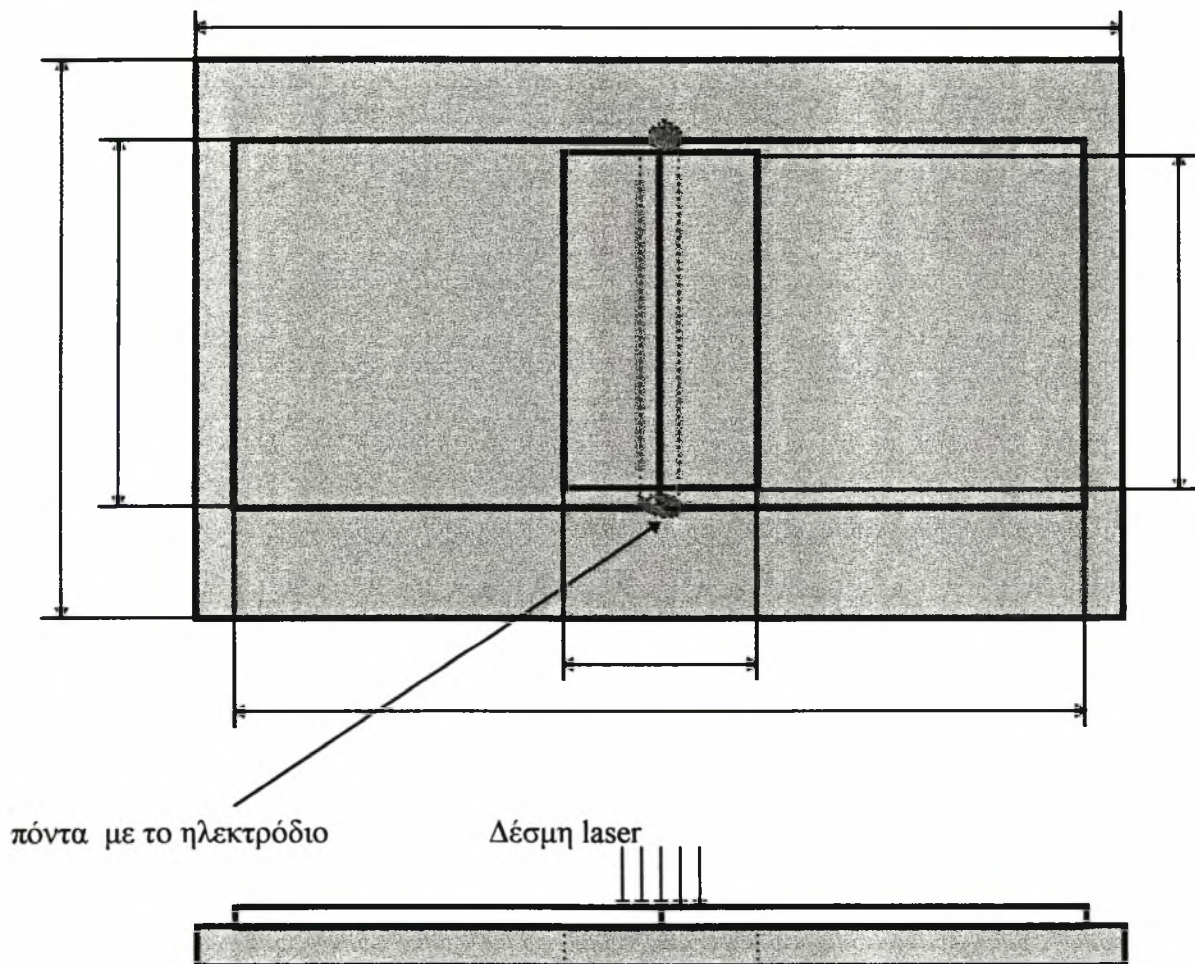
Πίνακας 2.3: Διάμετροι των ακτίνων της δέσμης για τις διάφορες συνθήκες

	Ισχύς					
Σημείο εστίασης	1140	1140	1500	1500	1680	1680
	(Watts)	(Watts)	(Watts)	(Watts)	(Watts)	(Watts)
	$D_{εσ}(\mu\text{m})$	$D_{εξ}(\mu\text{m})$	$D_{εσ}(\mu\text{m})$	$D_{εξ}(\mu\text{m})$	$D_{εσ}(\mu\text{m})$	$D_{εξ}(\mu\text{m})$
0	1,3	2,5	1,5	3	1,5	4
-1	1	2,3	1,2	2,5	1,4	3
-2	0,9	2,1	1,1	2,3	1,3	2,8

Αξίζει να αναφερθεί ότι η αλλαγή του σημείου εστίασης γίνεται με το ανέβασμα ή το κατέβασμα της κεφαλής. Αρχικά η δέσμη ήταν εστιασμένη στο σημείο -1mm κάτω από την επιφάνεια. Η απόσταση της κεφαλής από την επιφάνεια του ελασματος ήταν 2-3 mm. Οπότε ρυθμίζοντας την απόσταση αυτή (αύξηση ή μείωση) εστιάζουμε την δέσμη στο σημείο που θέλουμε.

2.3.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΡΑΦΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER-ΤΡΟΠΟΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ

Εκτός από την ανάγκη της εκτέλεσης των διαφόρων περασμάτων για την εκλογή των καλύτερων συνθηκών πρέπει να βρεθεί τρόπος σύνδεσης των δύο ελασμάτων, που πρόκειται να κολληθούν ώστε να μην υπάρχει μεγάλο κενό μεταξύ τους. Ο τρόπος πρόσδεσης των δύο ελασμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6 και η κατασκευή του (κοπή) έγινε στο μηχάνημα laser της EBETAM.



Σχήμα 2.6 : Σχηματική παράσταση τρόπου πρόσδεσης για την συγκόλληση ελασμάτων 250x250mm

Σκοπός της πρόσδεσης είναι να μην αφήσει τα ελάσματα ελεύθερα μεταξύ τους για να μπορέσει η δέσμη ακτίνας ενός χιλιοστού να λιώσει και τα δύο ελάσματα. Για να μπορέσει να ικανοποιηθεί η παραπάνω απαίτηση θα πρέπει οι επιφάνειες που δημιουργούνται κατά την κοπή να είναι εντελώς λείες. Έτσι θα πρέπει να γίνει μια σωστή κοπή η οποία δεν θα δημιουργεί μια τραχεία επιφάνεια. Τα δύο ελάσματα στερεώθηκαν πάνω στη βάση των 6mm με κατάλληλους σφικτήρες. Βέβαια προηγήθηκε η συγκόλληση των ελασμάτων με ηλεκτρόδιο στις άκρες ώστε να ευθυγραμμιστούν τα κομμάτια και να μην έχουμε προβλήματα κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Οι πόντες έγιναν ακριβώς στην αρχή ενώ η αρχή της συγκόλλησης ήταν 1-2mm μακριά από την πόντα.

2.4 ΤΕΣΤ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

2.4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΤΕΣΤ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η δοκιμή με την βοήθεια της οποίας κατασκευάζεται το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων και προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Η γεωμετρία του δοκιμίου μπορεί να είναι αυθαίρετη όμως για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες προδιαγραφές. Με την βοήθεια της δοκιμής εφελκυσμού προσδιορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

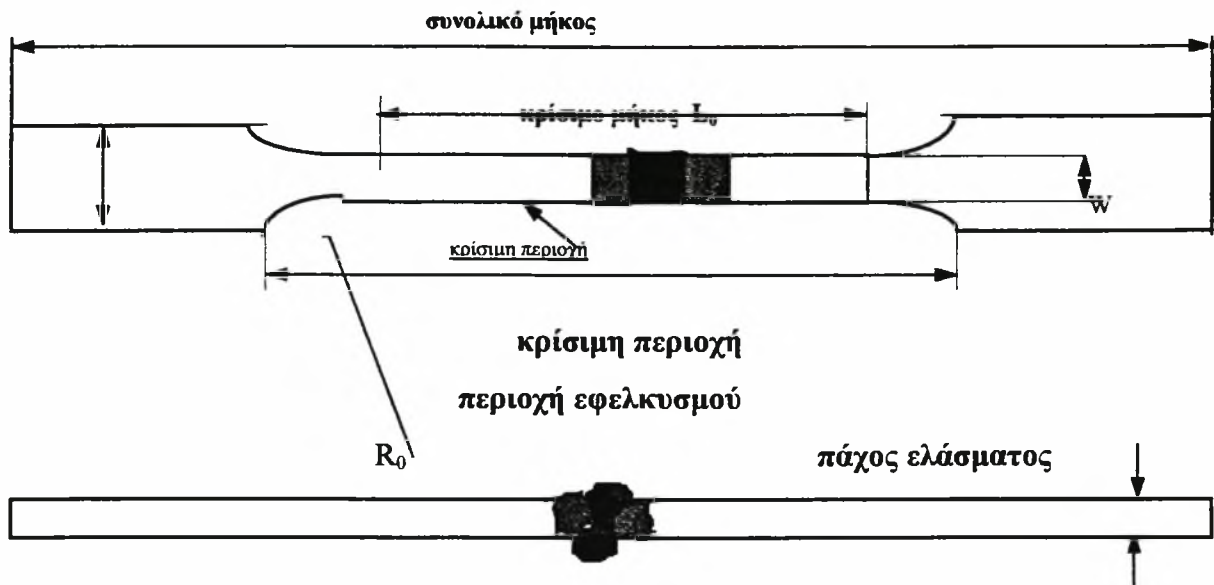
Αντοχή εφελκυσμού, Όροι διαρροής, Ολκιμότητα, Επιμήκυνση, Παραμόρφωση (ελαστική ή πλαστική).

Για τον προσδιορισμό της τελικής επιμήκυνσης είναι απαραίτητο να καθοριστεί το μήκος L_0 μέσω των τυποποιήσεων καθώς και το τελικό μήκος L . Για τον προσδιορισμό του τελευταίου, αρχικά παίρνουμε το δοκίμιο μας, πάνω στο οποίο χαράζουμε κάποιες γραμμές που αντιστοιχούν στα όρια του L . Στη συνέχεια, εφόσον γίνει η θραύση, ενώνουμε τα δύο κομμάτια και μετράμε το μήκος μεταξύ των δύο γραμμών. Έτσι γίνεται ο προσδιορισμός του L . Η τελική επιμήκυνση προκύπτει από την σχέση:

$$e = (L - L_0) / L_0 \quad (2.4)$$

Φυσικά θεωρείται δεδομένο ότι η θραύση έγινε μέσα στην περιοχή του καθαρού εφελκυσμού δηλαδή μέσα στο μήκος L_0 . Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το μήκος

καθορίζεται από προδιαγραφές. Εάν η θραύση συμβεί έξω από την περιοχή αυτή τότε η δοκιμή απορρίπτεται. Παραστατικά όλες οι παραπάνω περιοχές δείχνονται στο σχήμα 2.7:



Σχήμα 2.7 : Γεωμετρική μορφή του δοκιμίου εφελκυσμού

2.4.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Από τα διαγράμματα ονομαστικής τάσης - παραμόρφωσης βρίσκεται η αντοχή θραύσης. Όμως θα πρέπει να δημιουργηθούν και τα διαγράμματα πραγματικής τάσης - παραμόρφωσης ώστε να οδηγηθούμε στην πραγματική τιμή της τάσης θραύσης. Η τάση αυτή είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική διότι λαμβάνοντας υπόψη την αρχική διατομή και όχι την τελική διατομή - που είναι μικρότερη - υποεκτιμούμε την τάση θραύσης. Για την κατασκευή του πραγματικού διαγράμματος απαιτούνται κάποιες μετατροπές. Έστω:

σ_n Ονομαστική τάση

σπραγματική τάση

ϵ_n Ονομαστική παραμόρφωση

ϵπραγματική παραμόρφωση

$$\sigma_n = F/A_0 \quad (2.5)$$

$$\sigma = F/A \quad (2.6)$$

$$\epsilon_n = (L - L_0)/ L_0 \quad (2.7)$$

$$\epsilon = \ln(L/ L_0) \quad (2.8)$$

Όπου :

Aτελική διατομή του δοκιμίου

A_0αρχική διατομή του δοκιμίου

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι :

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_n + 1) \quad (2.9) \quad \text{και} \quad \sigma = \sigma_n (\varepsilon_n + 1) \quad (2.10)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορώ να φτιάξω το πραγματικό διάγραμμα. Η τελική διατομή θα βρεθεί μετρώντας μετά την δοκιμή την μικρότερη διάμετρο ή τις μικρότερες πλευρές (ανάλογα με το σχήμα της τελικής διατομής). Οι παραπάνω τύποι ισχύουν μόνο μέχρι την τάση σ_{ult} . Χρησιμοποιώντας την μέθοδο Mc Gregor, κατά την διάρκεια του πειράματος μετρούνται το μέγιστο φορτίο και το φορτίο θραύσης. Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι το φορτίο που εφαρμόζεται μετά την δημιουργία λαιμού, παραμένει σταθερό και ίσο με το φορτίο θραύσης. Έστω:

P_Mμέγιστο φορτίο

P_Eφορτίο θραύσης

Ισχύουν οι σχέσεις : $\sigma_{pi} = P_M/A_0$ (2.11) και $\varepsilon = \ln(A_0/A)$ (2.12)

Το μέγιστο φορτίο είναι το φορτίο όπου δημιουργείται ο λαιμός: $P_M = \sigma_{ult} * A_0$ (2.13)

Οπότε προκύπτει ότι η τάση θραύσης είναι: $\sigma_\theta = P_M/A_\theta$ (2.14)

Η μέθοδος αυτή έχει ένα βασικό μειονέκτημα. Αν πάρουμε την εφαπτομένη της καμπύλης στο σημείο σχηματισμού του λαιμού τότε δεν ικανοποιείται η συνθήκη :

$d\sigma/d\varepsilon = \varepsilon \sigma$. Έτσι καταφεύγουμε σε μία άλλη μέθοδο :

Από το ονομαστικό διάγραμμα μπορώ να υπολογίσω το φορτίο θραύσης αφού είναι δυνατόν να μετρήσω την τάση θραύσης $\sigma_{\theta(n)}$. Η τάση θραύσης μπορεί να μετρηθεί από το διάγραμμα αφού είναι το τελευταίο σημείο του διαγράμματος. Οπότε έχουμε:

$$P_\theta = \sigma_{\theta(n)} A_0 \quad (2.15)$$

όπου $\sigma_{\theta(n)}$ Είναι η ονομαστική τάση θραύσης. Και έτσι βγαίνει ότι

$$\sigma_\theta = P_\theta/A_\theta \quad (2.16)$$

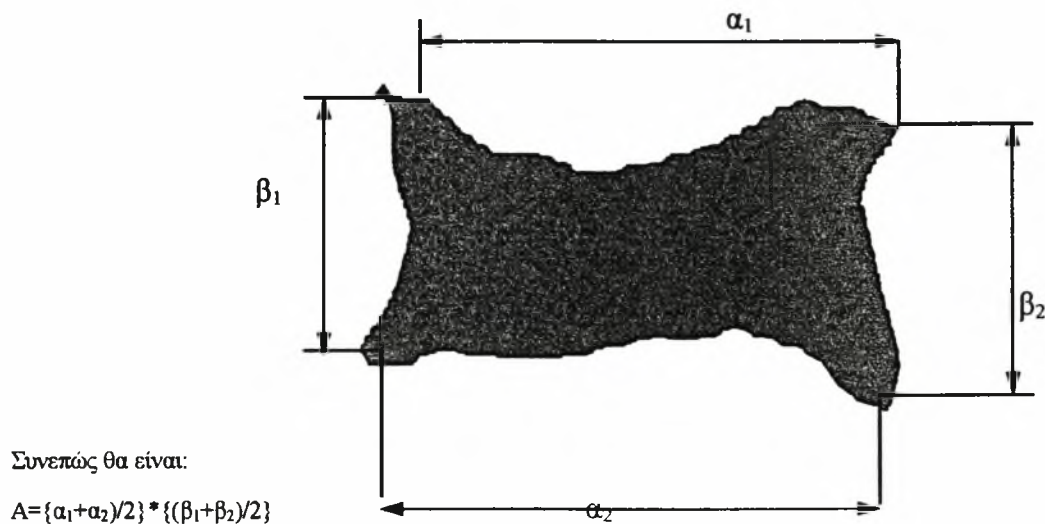
Πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί κατά την μέτρηση της επιφάνειας και κατά τον προσδιορισμό του σχήματός της.

2.4.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΤΕΣΤ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην EBETAM όπου υπάρχει μια μηχανή της INSTRON. Τα δοκίμια των συμβατικών συγκολλήσεων κατασκευάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASME- QW-462 Test specimens για συγκολλήσεις (για τις συγκολλήσεις υπάρχει η κατάλληλη προδιαγραφή). Το σχήμα καθώς και οι διαστάσεις φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Με την βοήθεια του υπολογιστή, που είναι συνδεδεμένος με τον controller της μηχανής, βγήκαν τα κατάλληλα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκε και ένα επιμηκυστόμετρο το οποίο το εφαρμόζαμε πάνω στο δοκίμιο και μετρούσαμε τις παραμορφώσεις. Πρόκειται για μια υδραυλική μηχανή, όπου έχουμε έναν συμπιεστή λαδιού για την επιβολή του φορτίου. Στο επάνω μέρος της μηχανής υπάρχει ένα ηλεκτρονικό-δυναμόμετρο μέσω του οποίου γίνεται η επικοινωνία με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η κάτω σιαγόνα εφελκύει το δοκίμιο και μέσω του δυναμόμετρου μετρούνται οι ονομαστικές τάσεις. Τα αποτελέσματα του τεστ εφελκυσμού φαίνονται στην ενότητα 3, όπου δίνονται και τα διαγράμματα των πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων για όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

Για την μετατροπή των διαγραμμάτων έπρεπε να μετρηθούν οι πλευρές της επιφάνειας θραύσης. Κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο διότι η παραμόρφωση των πλευρών είναι μεγάλη. Για τον λόγο αυτό μετρήσαμε τις πλευρές με την βοήθεια ενός μικροσκοπίου του Εργαστηρίου των Υλικών. Ακόμα και αυτή η μέθοδος δεν είναι εντελώς ακριβής, όμως είναι η πιο προσεγγιστική και δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Η μέθοδος αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και έγκειται στο προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ των τεσσάρων άκρων της επιφάνειας θραύσης.



Σχήμα 2.8 : Πραγματική επιφάνεια θραύσης

2.5 ΤΕΣΤ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

2.5.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

Ως γνωστόν η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από την φύση του, την συνοχή του και από την μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος. Σκληρότητα είναι η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό όταν μέσα από αυτό διεισδύει ένα σκληρότερο υλικό (διαμάντι). Όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας χρησιμοποιούν έναν κατάλληλο διεισδυτή από διαμάντι. Η δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης έχει πολύ μεγάλη σημασία διότι εκτός από το μέτρο αντίστασης του υλικού στη τριβή μας δείχνει την κατεργαστικότητα του υλικού. Πολλές φορές χρησιμοποιούμε την δοκιμή αυτή ως μέσο σύγκρισης ή ελέγχου μιας θερμικής κατεργασίας (συγκόλληση, επαναφορά, επιφανειακή σκλήρυνση, κ.τ.λ). Υπάρχουν πολλοί πίνακες οι οποίοι, εκτός από την μετατροπή της σκληρότητας στις διάφορες κλίμακες, δίνουν και την αντοχή εφελκυσμού σ_{uts} του υλικού, ανάλογα με την σκληρότητα. Επίσης δίνουν και την τάση θλίψης σε παραμόρφωση 10% (compression stress at 10% strain). Τέτοιοι πίνακες βρίσκονται στο παράρτημα Α. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαμε είναι μέθοδοι στατικής δοκιμής σκληρομέτρησης.



2.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ VICKERS

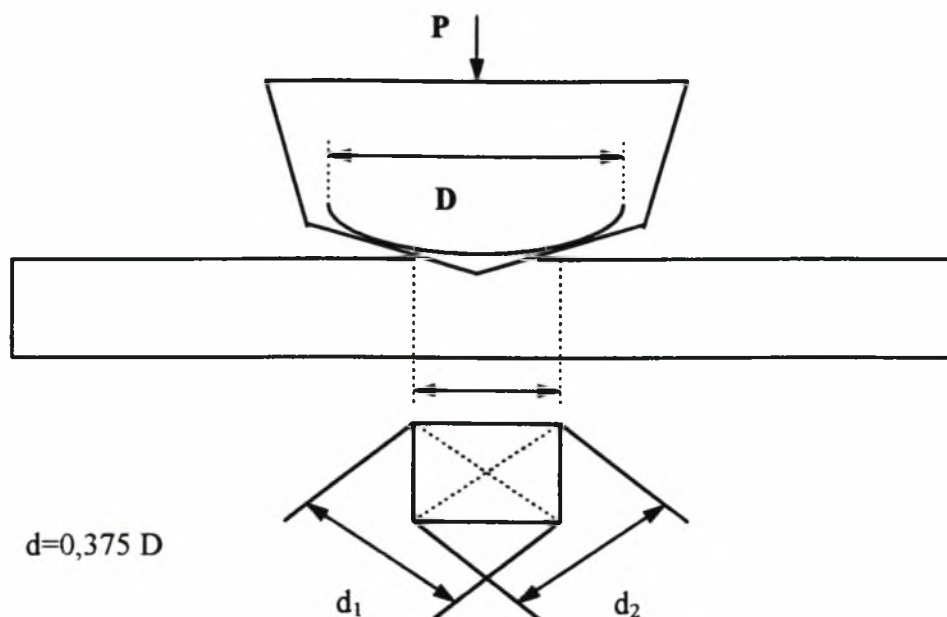
Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται διεισδυτής από διαμάντι (σκληρότερο υλικό) με σχήμα τετράπλευρης πυραμίδας και με γωνία κορυφής 136° . Η μέθοδος αυτή είναι η ακριβέστερη και χρησιμοποιείται για την μέτρηση κάθε είδους σκληρότητας, γι' αυτό και ονομάζεται μικροσκληρομέτρηση. Η μέθοδος VICKERS έχει μονάδες τάσης (Kp/mm^2). Ορίζεται από τον λόγο του φορτίου P προς το εμβαδόν της ουλής S .

$$\text{VHN}=\text{S/P} \text{ ή } \text{VHN}=1,8544*(\text{P}/\text{d}^2) \quad (2.17)$$

Όπου $\text{d}=(\text{d}_1+\text{d}_2)/2$ (μέση τιμή των διαγωνίων)

Το φορτίο κυμαίνεται, ανάλογα με το είδος του μικροσκληρομέτρου, σε διάφορες τιμές. Ο χρόνος συμπίεσης του διεισδυτή εξαρτάται από το υλικό, πρέπει όμως να είναι αρκετός ώστε να ολοκληρωθεί η πλαστική παραμόρφωση. Η δοκιμή γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου. Η ελεγχόμενη επιφάνεια πρέπει να είναι λεία και καθαρή και το φορτίο πρέπει να δρα κάθετα σ' αυτήν. Ο χρόνος συμπίεσης κυμαίνεται γύρω στα 15sec ενώ η ταχύτητα διείσδυσης είναι

κοντά στα 3m/sec. Εμείς αυτό που μετράμε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο είναι οι διαμέτροι d_1, d_2 και το όργανο μας δίνει την σκληρότητα ανάλογα με την μεγέθυνση. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται παραστατικά η γεωμετρία της μεθόδου.



Σχήμα 2.9 : Γεωμετρική μορφή της μεθόδου Vickers

2.5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ROCKWELL

Στη μέθοδο αυτή δεν χρειάζεται επεξεργασία της επιφάνειας και η σκληρότητα δίνεται απευθείας από την μηχανή. Είναι η πιο απλή μέθοδος η οποία δεν χρειάζεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι η ακόλουθη: Αρχικά ο διεισδυτής συμπιέζεται με ένα μικρό φορτίο έως ότου ο μικρός δείκτης δείξει την ένδειξη SET. Στην ουσία πρέπει ο δείκτης να φθάσει στην κόκκινη γραμμή (πολλές φορές ανάβει ένα κόκκινο λαμπάκι). Ο διεισδυτής συμπιέζεται πάνω στο δοκίμιο με το αρχικό φορτίο ώστε να εξουδετερωθούν τυχόν ανωμαλίες της επιφάνειας. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το απαιτούμενο φορτίο σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Ο διεισδυτής μπορεί να είναι χαλύβδινη σφαίρα ή αδαμάντινος κώνος γωνίας 120° . Έτσι γίνεται ο διαχωρισμός της σκληρότητας σε :

ROCKWELL C: cone

ROCKWELL B: ball

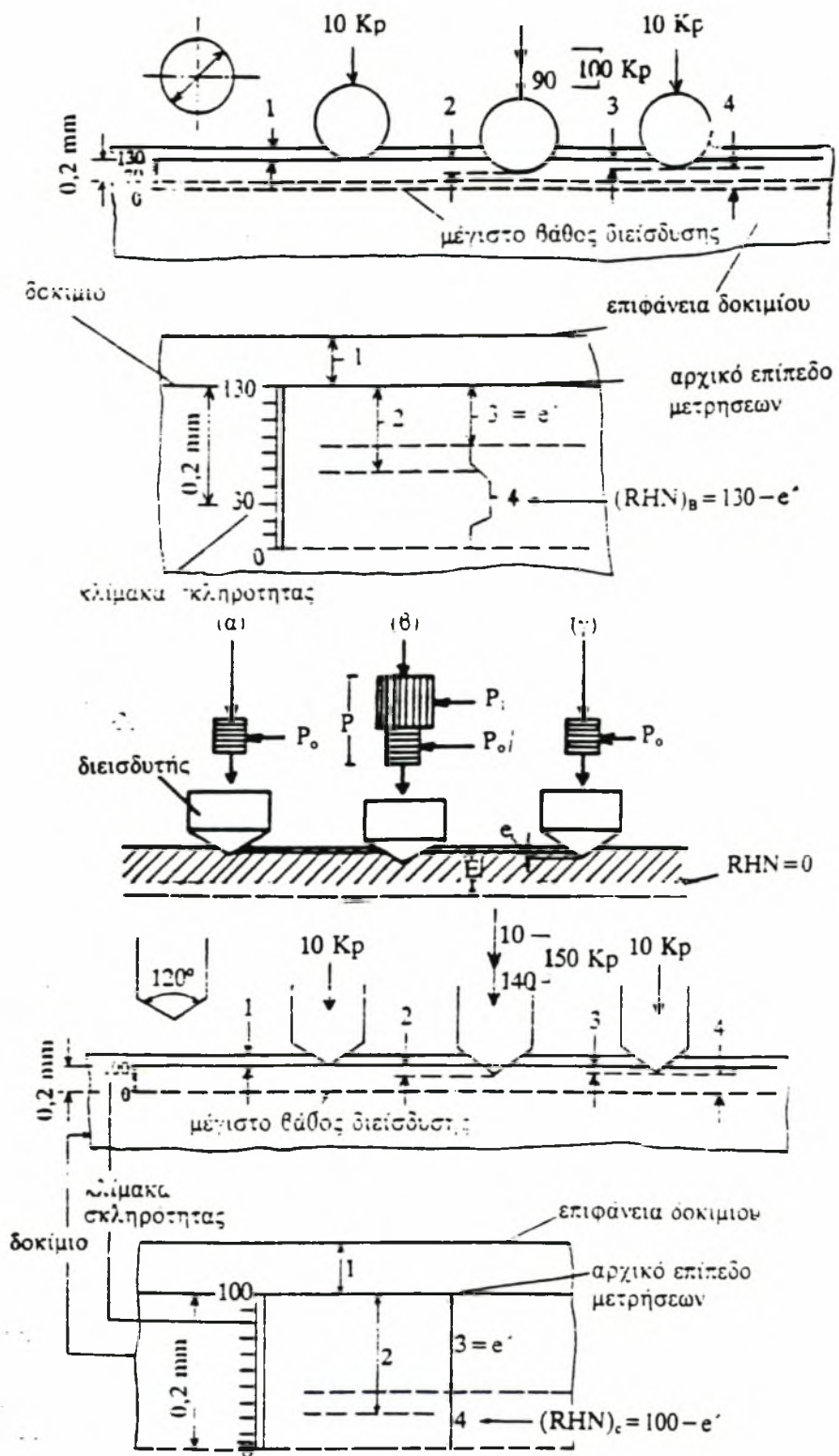
Στη περίπτωση σφαιρικού διεisdυτή το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι 100Kp ενώ για κωνικό, το φορτίο είναι 150Kp. Η σκληρότητα ROCKWELL είναι αδιάστατος αριθμός. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται παραστατικά η μέθοδος **ROCKWELL**.

2.5.4 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η μέτρηση της σκληρότητας με την κλίμακα *ROCKWELL B* έγινε στο σκληρόμετρο του Εργαστηρίου υλικών. Το σκληρόμετρο είναι τύπου *KARL FRANK 38174*. Για τις συμβατικές μεθόδους οι σκληρομετρήσεις έγιναν στο δοκίμιο Νο8, μια και σ' αυτό το δοκίμιο έχουν γίνει όλα τα πειράματα του προηγούμενου ΠΑΒΕ. Επίσης μετρήθηκε η σκληρότητα και στο δοκίμιο Νο4 διότι παρουσίασε ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Από την πλευρά των συγκολλήσεων με την τεχνική του LASER έγιναν σκληρομετρήσεις μόνο στα δοκίμια που επιλέχθησαν ως καλύτερα, ώστε να γίνει η τελική σύγκριση. Οι μικροσκληρομετρήσεις έγιναν σε όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια αφού είναι πιο ακριβής από τις σκληρομετρήσεις με την μέθοδο *ROCKWELL*.

Η ανάγκη δημιουργίας του προφίλ σκληρότητας μας ανάγκασε να χρησιμοποιήσουμε την πιο ακριβή μέθοδο, που είναι η μέθοδος *VICKERS*. Και ενώ στην μέθοδο *ROCKWELL* το μόνο πράγμα που χρειάζεται να προσέξουμε είναι η προφόρτιση του κώνου (ή της σφαίρας) πάνω στο δοκίμιο, στη μέθοδο *VICKERS* πρέπει να είμαστε περισσότερο προσεκτικοί. Οι μικροσκληρομετρήσεις κατά *VICKERS* έγιναν στο μικροσκληρόμετρο του εργαστηρίου υλικών. Πρόκειται για ένα μικροσκληρόμετρο τύπου *HMV 2000 SMIMADJU*. Στη μέθοδο *VICKERS* και στο συγκεκριμένο μικροσκληρόμετρο πρώτα επιλέγουμε το φορτίο, το οποίο είναι τυποποιημένο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μικροσκληρομέτρου. Κατόπιν επιλέγουμε τον χρόνο διεisdυσης για την ολοκλήρωση της πλαστικής παραμόρφωσης. Αφού εστιάσουμε από τον κατάλληλο φακό μεγέθυνσης εκτελούμε το πείραμα. Πρέπει να είμαστε προσεκτικοί κατά την μέτρηση των διαγωνίων διότι μία μικρή απόκλιση επιφέρει αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

Αμέσως μετά φαίνεται ο τρόπος εξαγωγής των διάφορων αποτελεσμάτων από το συγκεκριμένο μικροσκληρόμετρο. Οι δυνατότητες του μικροσκληρομέτρου του εργαστηρίου των υλικών είναι πολλές και μία από αυτές είναι η εκτύπωση των αποτελεσμάτων χωρίς την δική μας παρέμβαση.



Σχήμα 2.10 : Γεωμετρική μορφή της μεθόδου Rockwell

2.6 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΕΣ

2.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη μελέτη του ερευνητικού προγράμματος δεν αναλύθηκε η δομή του υλικού. Βέβαια ίσως να μην ήταν αναγκαίο, όμως στη παρούσα φάση η σύγκριση των δύο μεθόδων απαιτεί την μελέτη της δομής τόσο μικροσκοπικά όσο και μακροσκοπικά. Ο λόγος μελέτης της κάθε συγκόλλησης μακροσκοπικά είναι η ανάγκη να δούμε την μορφή της συγκόλλησης, το σχήμα της, το μέγεθος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, το βάθος διείσδυσης και τα τυχόν σφάλματα που θα δημιουργηθούν στις συγκολλήσεις με την χρήση του Laser. Η οπτική μικροσκοπία μας βοηθάει να δούμε την δομή του υλικού, τα διάφορα σφάλματα όπως είναι τα ρήγματα, οι πόροι, καθώς επίσης μπορούμε να δούμε το μέγεθος των κόκκων και να συμπεράνουμε πολλά πράγματα για την θερμική καταπόνηση που επήλθε στο υλικό. Όλα αυτά θα αναλυθούν στο κεφάλαιο περί συμπερασμάτων, όπου και θα γίνει η σύγκριση των διαφόρων δομών.

2.6.2 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΩΝ

Για να μπορέσουμε να δούμε την δομή του υλικού απαιτείται μια μακρά διαδικασία. Αυτή η διαδικασία θα περιγραφεί παρακάτω σε βήματα, με τον συντομότερο δυνατό τρόπο.

ΒΗΜΑ 1ο: Κόβουμε το κομμάτι μας στο κοπτικό εργαλείο του εργαστηρίου υλικών, τύπου Labotom Struers. Διαλέγουμε την περιοχή που θέλουμε να μελετήσουμε και προσπαθούμε να κόψουμε ένα κομματάκι διαστάσεων, περίπου, 2cm X 1cm. Προσοχή, η κοπή πρέπει να γίνει στο συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο όπου έχουμε την χρησιμοποίηση του κατάλληλου ψυκτικού μέσου ώστε να μην καταστρέψουμε την δομή.

ΒΗΜΑ 2ο: Εγκιβωτίζουμε το κομμάτι μας μέσα σε ρυτίνη ώστε να μπορούμε στη συνέχεια να το λειάνουμε.

ΒΗΜΑ 3ο: Προχωράμε στη λείανση του δοκιμίου ξεκινώντας από τον δίσκο των 80 Grid και διαδοχικά πηγαίνουμε στα 220 Grid , 500 Grid και τελικά στα 1000 Grid.

ΒΗΜΑ 4ο: Αφού στεγνώσουμε το δοκίμιο ακολουθούμε την διαδικασία στίλβωσης όπου αν έχει γίνει σωστά η λείανση τότε με λίγη προσοχή επιτυγχάνουμε το λεγόμενο ‘καθρέπτισμα’ της επιφάνειας, χωρίς την δημιουργία χαρακιών.

ΒΗΜΑ 5ο: Είναι το τελευταίο βήμα πριν την εμφάνιση φωτογραφιών. Εδώ προσβάλλουμε το υλικό μας με κάποιο χημικό αντιδραστήριο ώστε να εμφανιστεί η δομή. Ανάλογα με τον χρόνο προσβολής η εμφάνιση της δομής θα είναι πιο έντονη ή λιγότερο έντονη. Για κάθε υλικό υπάρχει και το κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο. Στο Παράρτημα Α φαίνεται το είδος του χημικού αντιδραστηρίου που χρησιμοποιείται για ορισμένα είδη υλικών. Όμως η εμπειρία είναι αυτή που μετράει περισσότερο, ειδικά στο τελευταίο βήμα. Μια συνήθης τακτική που ακολουθείται ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή δομή είναι να κάνουμε χημική προσβολή για πολύ λίγα δευτερόλεπτα, μέχρι να δούμε να εμφανίζεται η συγκόλληση, στη συνέχεια να πάμε στο μικροσκόπιο να δούμε την δομή και αν δεν είναι η επιθυμητή να ξανακάνουμε χημική προσβολή για λιγότερο χρόνο ώσπου να επιτύχουμε την εμφάνιση της δομής που θέλουμε.

Μόλις τελειώσουμε την παραπάνω διαδικασία προχωρούμε στην μελέτη της δομής στο μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Υλικών, τύπου Leitz Aristomet, ώστε να βρούμε την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, το μέταλλο βάσης το μέταλλο συγκόλλησης και να βγάλουμε τις απαραίτητες φωτογραφίες στην περιοχή όπου θα επιλέξουμε. Πάντοτε, πρώτα κάνουμε την οπτική μικροσκοπία και στη συνέχεια την μακροσκοπία. Αυτό διότι ο κίνδυνος του ‘overetching’ είναι υπαρκτός και υπάρχει η δυνατότητα καταστροφής της δομής (‘κάψιμο’). Το ‘overetching’ είναι χημική προσβολή που συμβαίνει αφού στεγνώσουμε το δοκίμιό μας με καθαρό οινόπνευμα. Το χημικό αντιδραστήριο εγκλωβίζεται σε διάφορες σχισμές της ρυτίνας και με την πάροδο του χρόνου βγαίνει στην επιφάνεια και προσβάλλει το υλικό. Έτσι για να μην χρειαστεί να ξαναλειάνουμε το δοκίμιο, την μακροσκοπία την εκτελούμε στο τέλος αφού μακροσκοπικά το ‘overetching’ δεν έχει καμία επιρροή. Η εκτέλεση της μακροσκοπίας έγινε στο στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου των Υλικών, τύπου WILD MPS46/52. Τόσο στο στερεοσκόπιο όσο και στο μικροσκόπιο υπάρχει η δυνατότητα προσάρτησης ενός ειδικού μηχανήματος για την λήψη φωτογραφιών. Περισσότερη ανάλυση για την πειραματική διαδικασία θα είναι άσκοπη αφού, ως γνωστόν, το πειραματικό μέρος στηρίζεται καθαρά σε εμπειρικούς κανόνες που είναι δύσκολο να περιγραφούν.

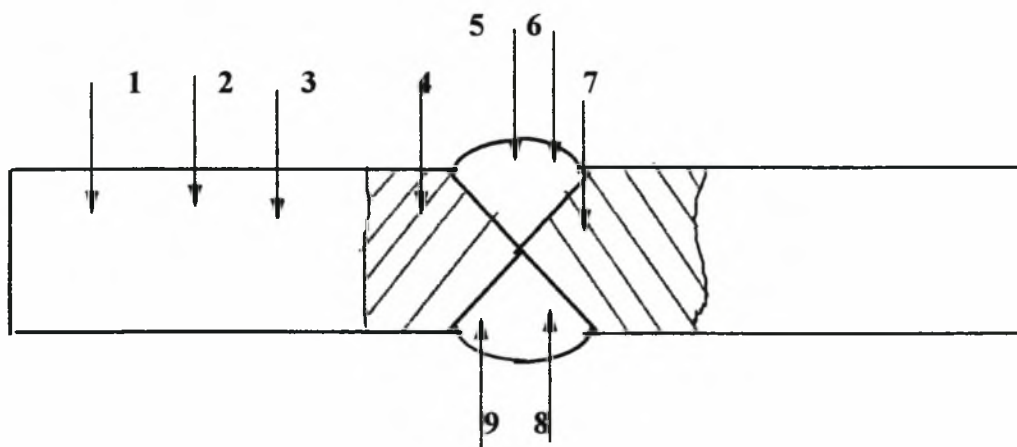
ΕΝΟΤΗΤΑ 3 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΚΛΗΛΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, οι διάφορες συγκολλήσεις για να πιστοποιηθούν, έπρεπε να σκληρομετρηθούν. Ο λόγος για τον οποίο έγιναν οι διάφορες μετρήσεις θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, όπου και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα όλων των πειραματικών μετρήσεων. Βέβαια υπάρχουν προδιαγραφές όπου επιβάλλουν την σκληρομέτρηση για τον έλεγχο της δημιουργούμενης συγκόλλησης. Τέτοιες προδιαγραφές φαίνονται στο παράρτημα Β όπου συγκεκριμένα δίνονται τα αποτελέσματα συγκολλήσεων σύμφωνα με την κατάλληλη προδιαγραφή. Οι διάφορες μετρήσεις, που παρουσιάζονται στο παράρτημα Β, έγιναν στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία στα πλαίσια του ΠΑΒΕ, όμως είναι άγνωστο σε ποια δοκίμια, γι' αυτό και έπρεπε να ξαναγίνουν οι σκληρομετρήσεις σύμφωνα με την συγκεκριμένη προδιαγραφή στα δοκίμια Νο8 και Νο4 ώστε να υπάρξει πλήρης εικόνα για τα συγκεκριμένα δοκίμια τα οποία και θα εξεταστούν. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται που έγιναν οι διάφορες μετρήσεις μέσα στο υλικό συγκόλλησης, στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, στο μέταλλο βάσης.



Σχήμα 3.1: Σκληρομετρήσεις κατά Rockwell B σύμφωνα με την προδιαγραφή FRG /II/20 (E.A.B)

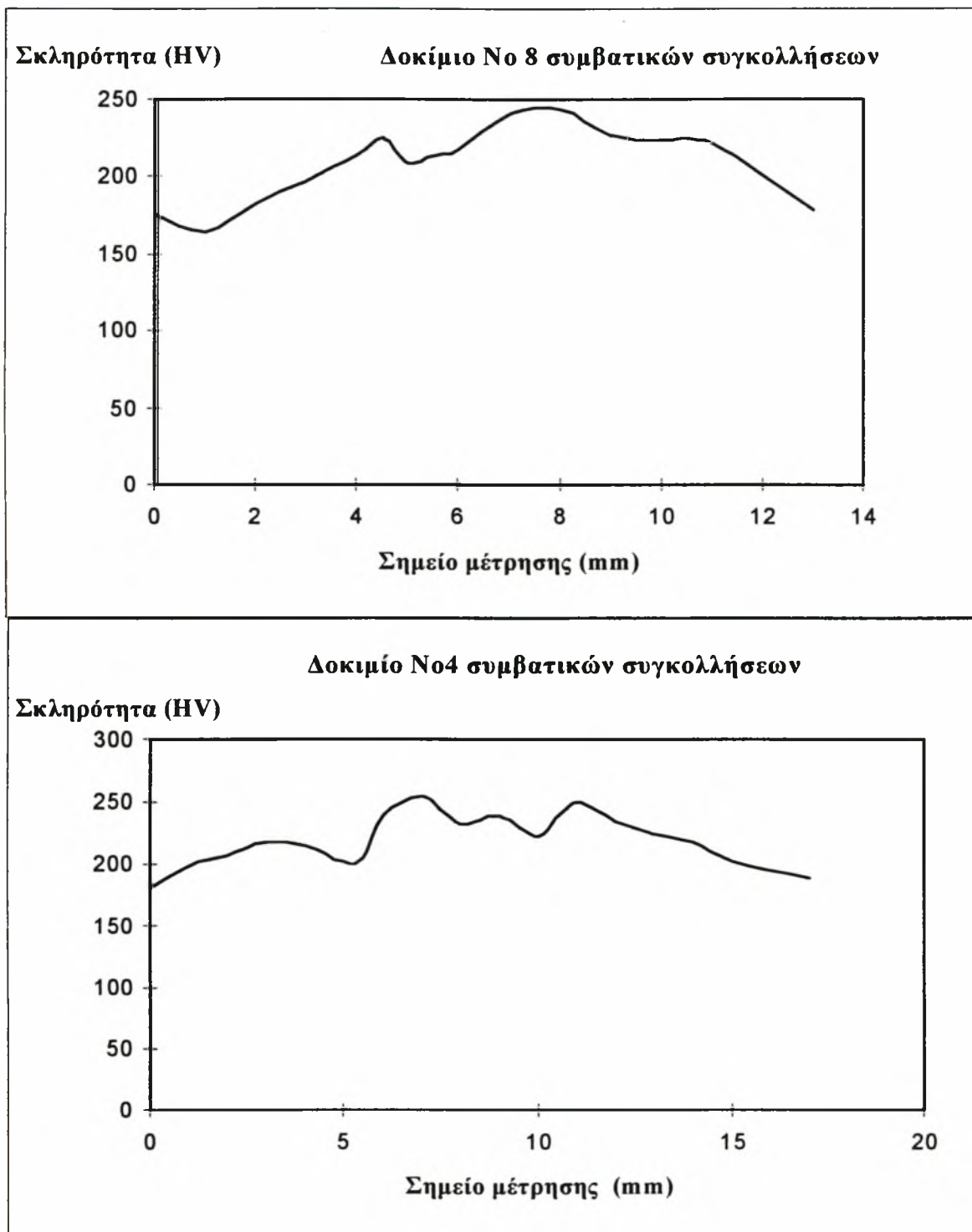
Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές που πάρθηκαν κατά την μέτρηση των σκληροτήτων στα προδιαγραφόμενα σημεία

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα μετρήσεων σύμφωνα με την προδιαγραφή

ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ROCKWELL B		
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	Δοκίμιο Νο4 συμβατικών συγκολλήσεων	Δοκίμιο Νο8 συμβατικών συγκολλήσεων
1	87	85
2	88	82
3	89	87
4	93	90
5	95	85
6	96	92,5
7	95,5	95,5
8	96	94,5
9	94,5	98

Αφού έγιναν οι διάφορες σκληρομετρήσεις σύμφωνα με τις προδιαγραφές, στη συνέχεια θεωρήθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί το προφίλ σκληρότητας με βάση την μέθοδο μικροσκληρομέτρησης Vickers. Έτσι λοιπόν για τα δοκίμια των συμβατικών συγκολλήσεων Νο4 και Νο8 δημιουργήθηκε το προφίλ μικροσκληρότητας κατά το πλάτος του δοκιμίου και σε βάθος 1mm από την επιφάνεια. Οι λόγοι για τους οποίους έπρεπε να δημιουργηθεί αυτό το προφίλ θα αναφερθούν στο κεφάλαιο όπου αναλύονται τα αποτελέσματα. Οι διάφορες μικροσκληρομετρήσεις έγιναν στο μικροσκληρόμετρο του Εργαστηρίου Υλικών. Η διαδικασία περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα όμως το μόνο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι με την χρήση αυτού του μικροσκληρομέτρου δεν υπάρχει η δυνατότητα αλλοίωσης των αποτελεσμάτων από τον χειριστή. Αυτό γίνεται διότι, πριν ακόμα εμφανιστεί η σκληρότητα, δεν αναγράφονται οι τιμές των διαμέτρων, ώστε να μπορούμε να παρέμβουμε στην εξαγωγή του αποτελέσματος. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα προφίλ σκληρότητας.

Στον x-άξονα δίδεται το σημείο μέτρησης, το οποίο έχει ως αρχή ένα τυχαίο σημείο στο μέταλλο βάσης, πολύ κοντά στην αρχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης.



Σχήμα 3.3 : Προφίλ σκληρότητας των συμβατικών συγκολλήσεων (δοκίμιο Νο8 και Νο4)

3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΤΕΣΤ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Έχουν ήδη αναφερθεί η θεωρία και οι σχέσεις που διέπουν την συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία. Ωστόσο θα πρέπει να γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων που πάρθηκαν από την δοκιμή εφελκυσμού. Παρακάτω θα παρουσιασθεί αναλυτικά η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για ένα δοκίμιο. Εξυπακούεται ότι η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια.

3.2.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Νο1

Όπως έχουμε πει πρέπει απαραίτητως πριν την δοκιμή να μετρηθεί το αρχικό μήκος L_0 . Αυτό το μήκος μπορεί να παρθεί από την προδιαγραφή ή να ορισθεί ελεύθερα, εάν φυσικά το επιτρέπει η προδιαγραφή. Επίσης θα πρέπει να υπολογισθεί η διατομή καθώς και η μείωσή της. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκε το αρχικό πλάτος και πάχος του δοκιμίου. Έτσι θα έχουμε:

$$\underline{a_0 = 4.1\text{mm} \quad a = 2.8\text{mm}}$$

$$\underline{b_0 = 12.2\text{mm} \quad b = 9.7\text{mm}}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$\underline{A_0 = (4.1 \times 12.2)\text{mm}^2 \quad \text{ή} \quad A_0 = 50.02 \text{mm}^2}$$

$$\underline{A = (2.8 \times 9.7)\text{mm}^2 \quad \text{ή} \quad A = 27.16 \text{mm}^2}$$

Συνεπώς η μείωση της διατομής θα είναι:

$$\underline{\Delta A = (A_0 - A)/A_0 \quad \text{ή} \quad \Delta A = 45.7\%}$$

Όπως φαίνεται από το ονομαστικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων δεν υπάρχει διακριτό όριο διαρροής. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκαν τρεις διαφορετικές τάσεις σε τρεις διαφορετικές παραμορφώσεις 0,1% - 0,2% - 0,3%. Προέκυψαν τα εξής:

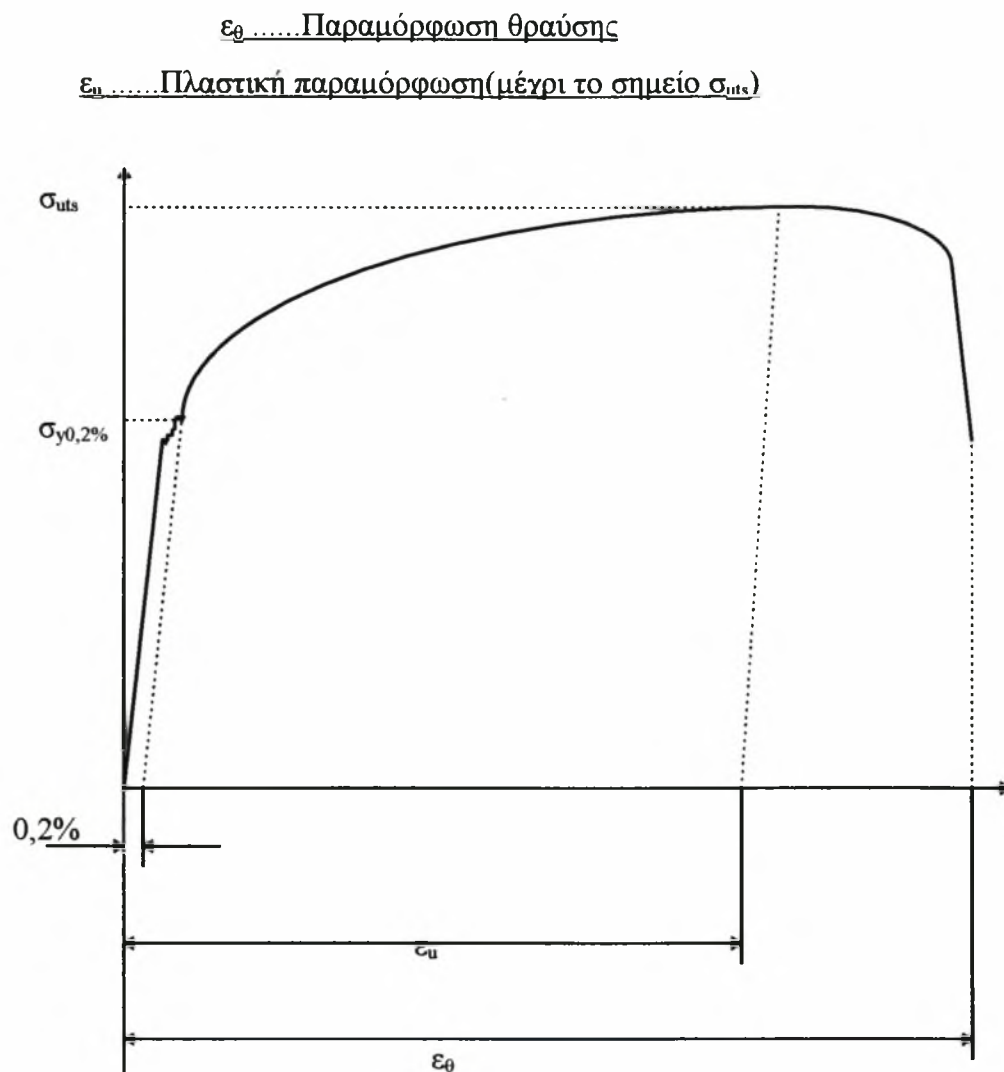
$$\underline{\sigma_{0.1} = 380 \text{MPa}}$$

$$\underline{\sigma_{0.2} = 395 \text{MPa}}$$

$$\underline{\sigma_{0.3} = 403 \text{MPa}}$$

Σ' αυτές τις περιπτώσεις θεωρούμε όριο διαρροής το $\sigma_{0,2}$, για καθαρά εμπειρικούς λόγους.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το διάγραμμα - μέσω του controller της μηχανής - μας δίνει μια πλαστική παραμόρφωση (Plastic strain), η οποία όμως δεν είναι η καθ' αυτού πλαστική παραμόρφωση αλλά η παραμόρφωση θραύσης. Συνεπώς θα πρέπει να διακρίνουμε αυτούς τους δύο όρους. Η διάκριση αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 : Ονομαστικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων

Από το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων προκύπτει:

$$\epsilon_u = 17\%$$

$$\epsilon_{\theta} = 23,8\%$$

Επίσης από το ίδιο διάγραμμα εξάγεται η τάση σ_{uts} που ονομάζεται και μέγιστη αντοχή εφελκυσμού και είναι αυτή που προκαλεί μόνιμη παραμόρφωση. Προκύπτει ότι:

$$\sigma_{\text{uts}} = 520 \text{ M Pa}$$

Συνοπτικά :

Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού= 520 M Pa

Πλαστική παραμόρφωση= 17%

Παραμόρφωση θραύσης=23,8%

Μείωση της διατομής= 45,7%

Όριο διαρροής (0,2%)= 395 M Pa

Για να δημιουργηθεί το διάγραμμα πραγματικών τάσεων παραμορφώσεων, θα πρέπει να παρθούν κάποιες τιμές και να μετατραπούν σε πραγματικές, με την βοήθεια των κατάλληλων σχέσεων. Οι σχέσεις αυτές ισχύουν μέχρι το σημείο σχηματισμού του λαιμού.

Πίνακας 3.2 : Μετατροπή των τιμών από ονομαστικές σε πραγματικές

Σημείο	Ονομαστική παραμόρφωση	Πραγματική παραμόρφωση	Ονομαστική τάση	Πραγματική τάση
1	0,002	0,001998	395	395,8
2	0,04	0,03922	460	478,4
3	0,1	0,0953	500	550
4	0,17	0,157	520	608

Για τον προσδιορισμό της τελικής παραμόρφωσης και της τελικής τάσης θραύσης θα πρέπει να βρεθεί το φορτίο θραύσης. Είναι:

$$\sigma_{\theta(\eta)} = P_{\theta} / A_0$$

όπου: $\sigma_{\theta(\eta)}$ ονομαστική τάση θραύσης

P_{θ} Φορτίο θραύσης

A_0 Αρχική διατομή

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι : $\sigma_{\theta(\eta)} = 470 \text{ M Pa}$ οπότε $P_{\theta} = 23509,4 \text{ (M Pa} \times \text{mm}^2)$ Άρα

$$\sigma_{\theta} = P_{\theta} / A \quad \text{ή} \quad \sigma_{\theta} = 865,6 \text{ M Pa}$$

Για να βρεθεί η τελική παραμόρφωση θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος : $\varepsilon = \ln(A_0/A)$

Για το δοκίμιο No1 είναι:

$$\varepsilon = \ln(50,02/27,16) \text{ ή } \varepsilon = 61,6\%$$

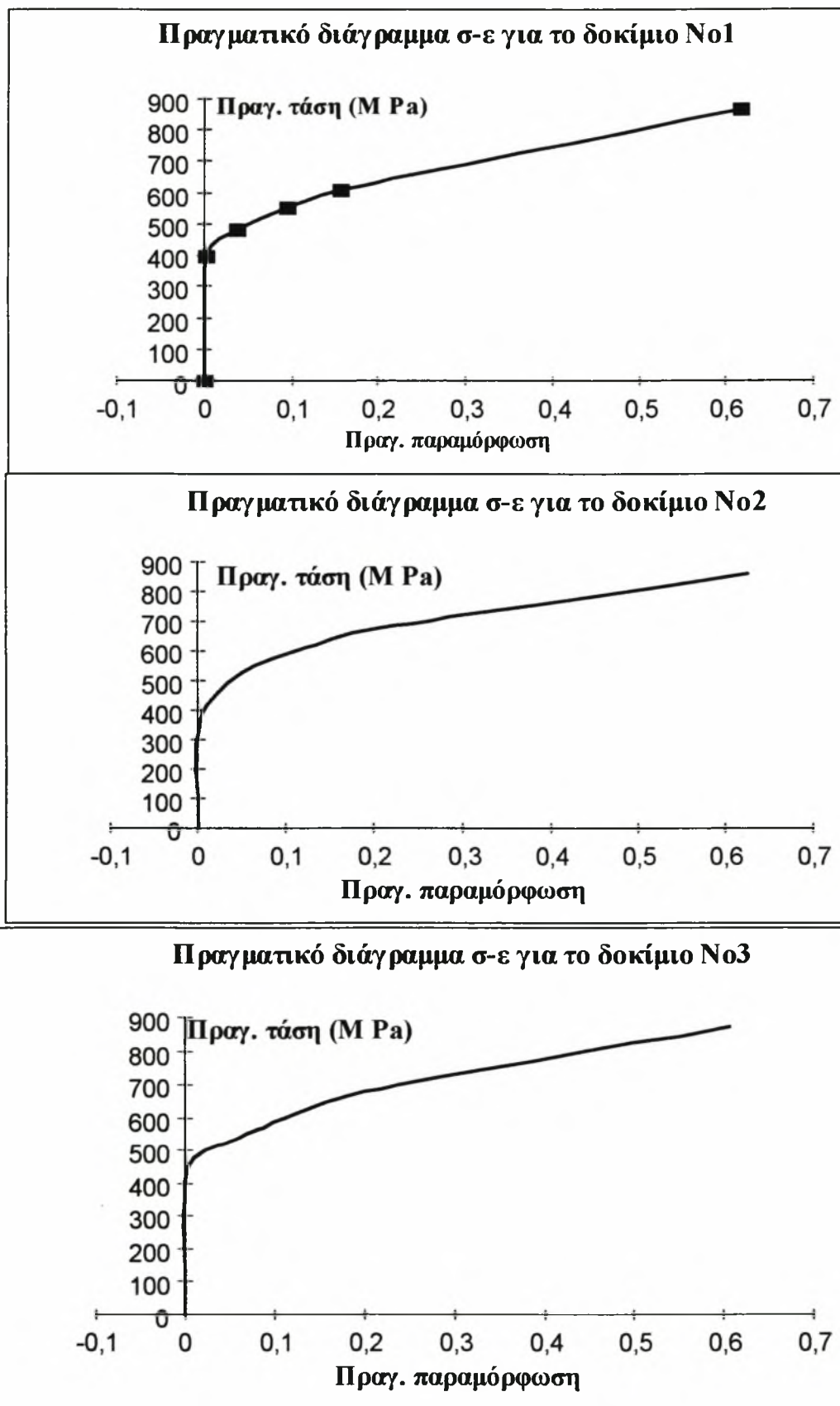
Με τον ίδιο τρόπο θα εργασθούμε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και για τα δοκίμια No2 και No3. Συνολικά όλα τα αποτελέσματα καθώς και τα διαγράμματα των πραγματικών τάσεων - παραμορφώσεων παρουσιάζονται στους πίνακες 3.3 και στο σχήμα 3.5. Το βασικό συμπέρασμα από τα αποτελέσματα είναι ότι η πραγματική τάση εφελκυσμού καθώς και τα πραγματικά διαγράμματα δεν έχουν καμία σχέση με τα ονομαστικά. Η βασική αιτία είναι η ανικανότητα του controller της μηχανής εφελκυσμού να υπολογίζει κάθε φορά την πραγματική επιφάνεια επενέργειας της τάσης. Η ονοματολογία και η εξήγηση των διαφόρων μεταβλητών των πινάκων 3.3 και 3.4 παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Πίνακας 3.3 : Συνοπτικά αποτελέσματα μετατροπής των ονομαστικών τιμών σε πραγματικές

Δοκίμιο	Όριο ροής	Αντοχή εφελκυσμού	A ₀ -A	α ₀ -α	b ₀ - b	ε _θ	ε _υ	σ _{θ(η)}	σ _θ	Τελ. πραγματική παραμόρφωση
1	395	520	50 - 27,6	12,2 - 9,7	4,1 - 2,8	23,8	17	470	865,6	61,6
2	361	553	50,4 - 26,97	12,6 - 9,3	4 - 2,9	31,7	22,5	460	859,6	62,52
3	442	550	51,6 - 28,13	12,6 - 9,7	4,1 - 2,9	33,5	23	475	872,3	60,7

Πίνακας 3.4: Βοηθητικές μετρήσεις για την εύκολη μετατροπή των ονομαστικών τιμών σε πραγματικές τιμές

Σημείο	ΔΟΚΙΜΙΟ Νο2				ΔΟΚΙΜΙΟ Νο3			
	ε _η	ε	σ _η	σ	ε _η	ε	σ _η	σ
1	0,002	0,00199	361	361,72	0,002	0,00199	442	442,8
2	0,05	0,04879	500	525	0,047	0,04593	500	523,5
3	0,13	0,1222	540	610,2	0,085	0,08158	520	564,2
4	0,225	0,203	553	677,42	0,23	0,2	550	676,5

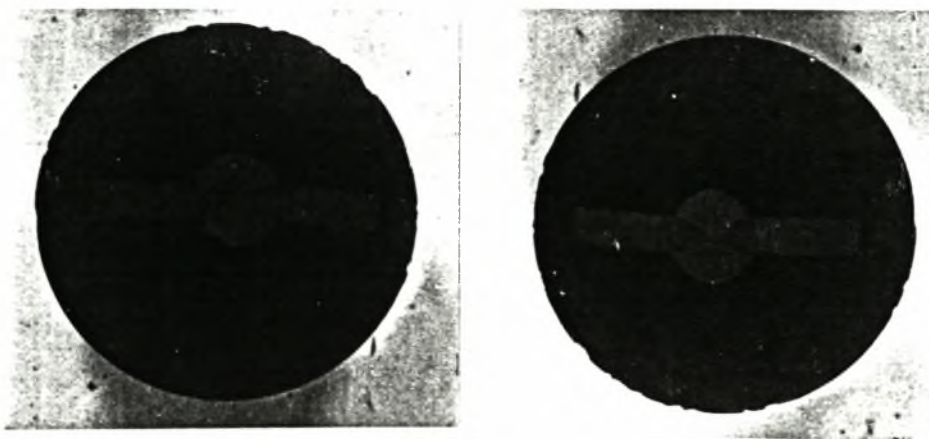


Σχήμα 3.5 : Διαγράμματα πραγματικών τάσεων - παραμορφώσεων

3 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

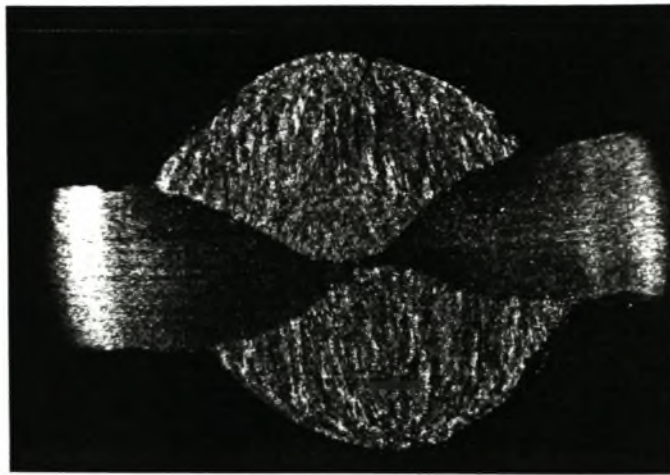
3.3.1 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Από τα δοκίμια των συμβατικών συγκολλήσεων έπρεπε να μελετηθούν τα δοκίμια Νο8 και Νο4 . Οι λήψη των φωτογραφιών έγινε στο στερεοσκόπιο του Εργαστηρίου Υλικών και βγήκαν μάκρο-φωτογραφίες στο εργαστηριακό κέντρο της ΕΒΕΤΑΜ. Το σχήμα 3.6 μας δείχνει το πλάτος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης για το δοκίμιο Νο8. Όπως φαίνεται το υλικό συγκόλλησης του άνω περάσματος ενώνεται με το υλικό συγκόλλησης του κάτω περάσματος, πράγμα επιθυμητό. Όμως τα σχήματα 3.7, 3.8, 3.9 - που πάρθηκαν από διαφορετικό μέρος του ελάσματος- δείχνουν ότι η διείδυση του ενός περάσματος δεν συμπίπτει με την διείδυση του επομένου. Η αιτία δημιουργίας αυτής της απόκλισης οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ανθρώπινο σφάλμα.

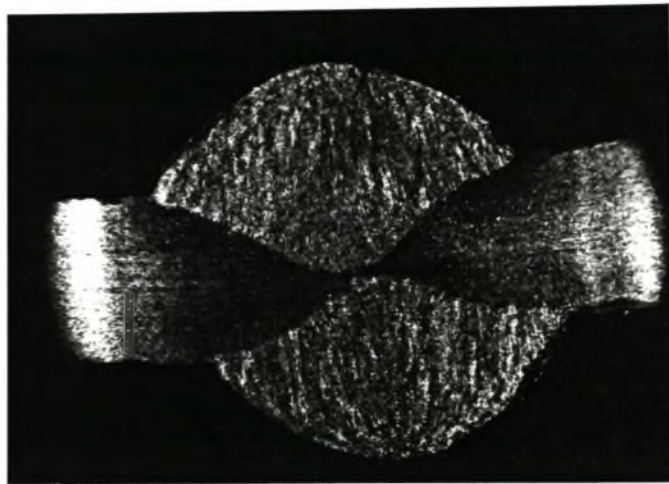


Σχήμα 3.6 : Δοκίμιο Νο8 Συμβατικών συγκολλήσεων- Χημική προσβολή: Nital 10%, 8 sec

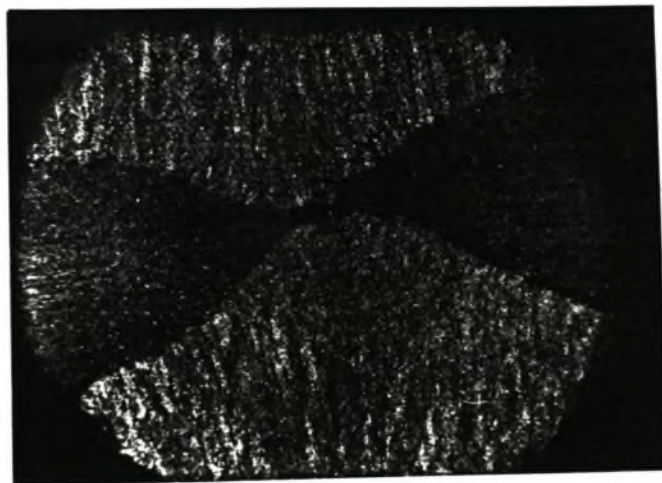
Τα σχήματα 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 (δοκίμιο Νο4) δείχνουν ακριβώς το ίδιο πρόβλημα όπως και στο δοκίμιο Νο8 μόνο που εδώ δημιουργήθηκε ένα επιπρόσθετο πρόβλημα. Κατά την ένωση των δύο ραφών δημιουργήθηκε μια οπή ακριβώς πάνω στην ένωση, πράγμα απαράδεκτο για την ποιότητα μιας συγκόλλησης. Στο σχήμα 3.10, οι σκιασμένες περιοχές που φαίνονται στην περιφέρεια του δοκιμίου οφείλονται στο 'overetching' που προαναφέραμε. Γενικότερα αυτές οι φωτογραφίες δείχνουν την επιρροή του ανθρώπινου λάθους πάνω στη συγκόλληση και το γεγονός ότι με τις συμβατικές συγκολλήσεις είναι δύσκολο να υπάρξει πρόσβαση στη σύνδεση.



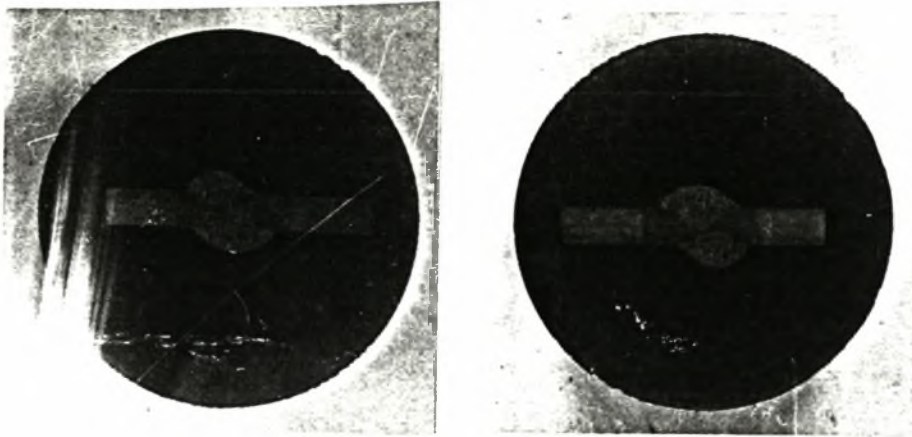
Σχήμα 3.7 : Δοκίμιο Νο8 - 10 φορές μεγέθυνση- Nital 10% 8 sec



Σχήμα 3.8 : Δοκίμιο Νο8 - 10 φορές μεγέθυνση- Nital 10% 8 sec (διαφορετική περιοχή)



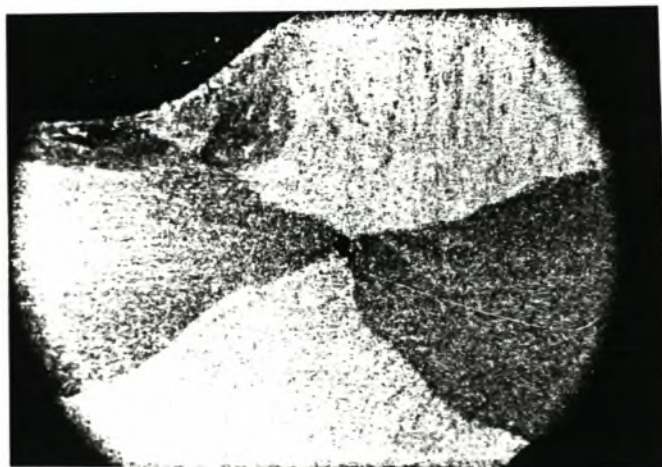
Σχήμα 3.9 : Δοκίμιο Νο8 - 20 φορές μεγέθυνση- Nital 10% 8 sec



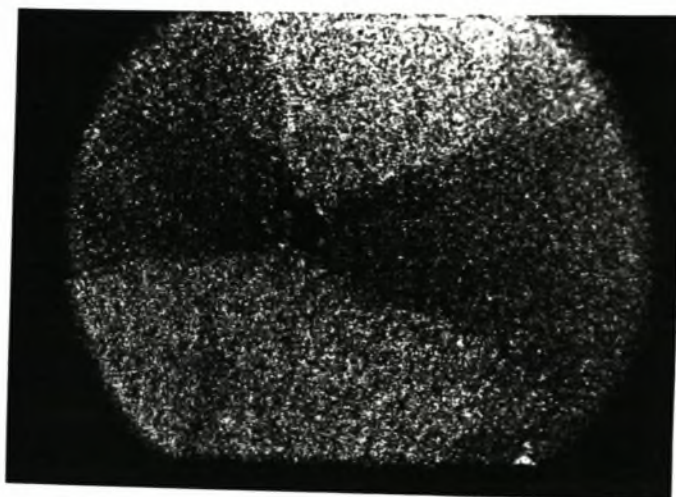
Σχήμα 3.10 : Δοκίμιο Νο4 Συμβατικών συγκολλήσεων-Χημική προσβολή: Nital 10%, 8 sec



Σχήμα 3.11 : Δοκίμιο Νο4 - 10 φορές μεγέθυνση- Nital 10% 7 sec



Σχήμα 3.12: Δοκίμιο Νο4 - 20 φορές μεγέθυνση- Nital 10% 7 sec

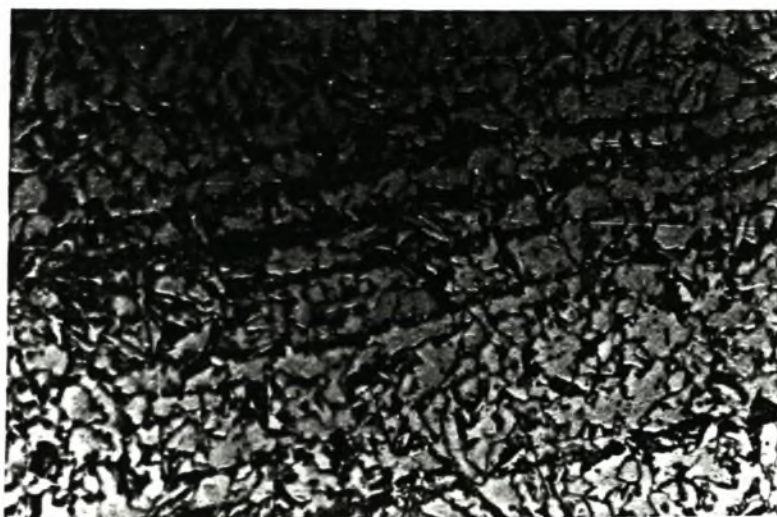


Σχήμα 3.13: Δοκίμιο No4 - 30 φορές μεγέθυνση- Nital 10% 8 sec

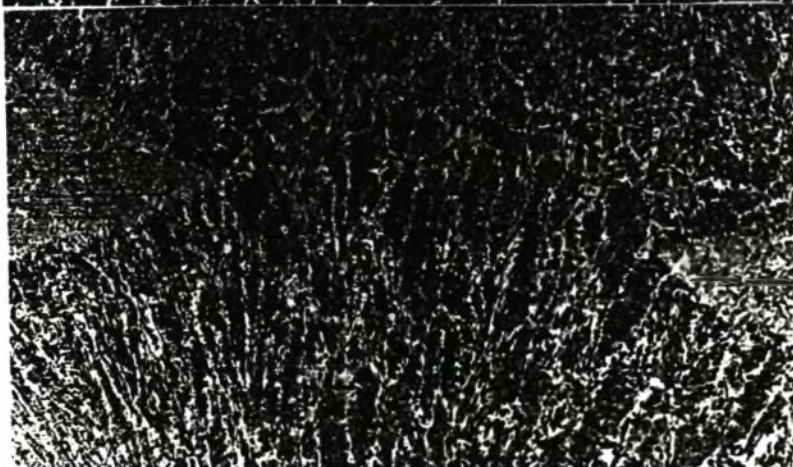
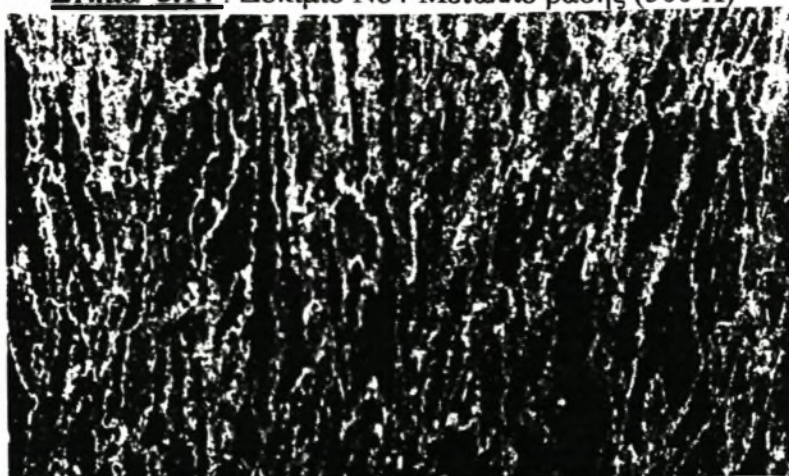
3.3.2 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Όπως φάνηκε από την μελέτη της μακροδομής τα δοκίμια είχαν αρκετά σφάλματα. Από την μελέτη της μικροδομής φαίνεται ξεκάθαρα το μέγεθος των κόκκων, η δημιουργία μαρτενσίτη και το είδος του υλικού συγκόλλησης. Το υλικό συγκόλλησης είναι φερριτοπερλιτικός χάλυβας όπου ο περλίτης εξαιτίας της έλασης που προηγήθηκε σχηματίζει παράλληλες γραμμές μέσα στο υλικό. Στο σχήμα 3.14 φαίνεται το μέταλλο βάσης και οι παράλληλες γραμμές περλίτη. Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Nital 10% και για χρόνο χημικής προσβολής 10sec. Κατόπιν στο σχήμα 3.15 απεικονίζεται το υλικό συγκόλλησης, ενώ οι παράλληλες άσπρες γραμμές μαρτυρούν την κατεύθυνση της ροής θερμότητας. Στο σχήμα 3.16 φαίνεται ακριβώς ότι προαναφέρθηκε, αλλά παρατηρώντας με προσοχή φαίνεται το μέγεθος της ζώνης τήξης. Στα σχήματα 3.17 έως 3.19 παρουσιάζονται οι μικροδομές που συναντιούνται κατά την συγκόλληση του χάλυβα D36. Ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι ιδιαίτερα υψηλός γι' αυτό μέσα στη λίμνη συγκόλλησης δεν έχουμε υψηλό ποσοστό μαρτενσίτη και μπαινίτη. Συναντούμε τον αρχικό φερρίτη (PF), τον φερρίτη στα όρια των κόκκων (PF(G)), και τον φερρίτη PF(I) (σχήματα 3.18 α)- 3.19 α)-β)). Καθώς προχωρούμε στα όρια της ζώνης τήξης 'έχουμε την δημιουργία του 'Widmastatten' φερρίτη καθώς και την δημιουργία περλίτη (σχήμα 3.18 α)).

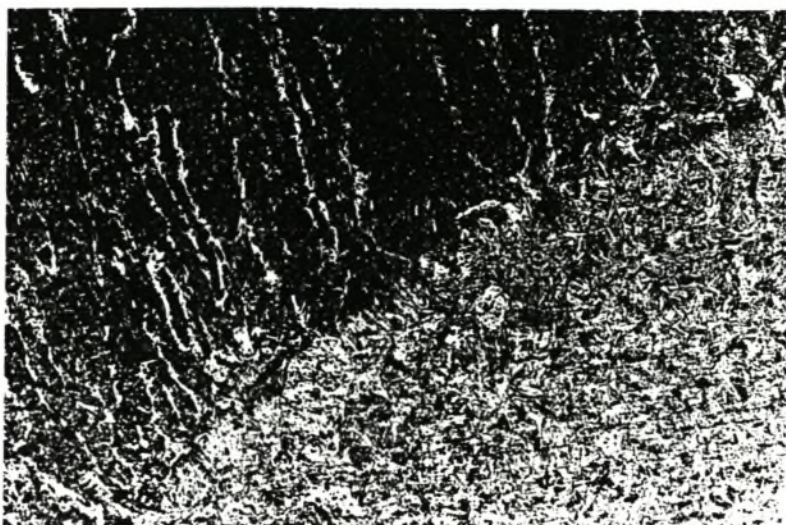
Ακριβώς στα όρια της ζώνης τήξης η δημιουργία του ‘Widmastatten’ φερρίτη γίνεται πιο έντονη ενώ έχουμε και την δημιουργία μαρτενσίτη. Χαρακτηριστική είναι η νοπή γραμμή που δημιουργείται και οριοθετεί την ζώνη τήξης. Η μεταβολή της δομής του υλικού είναι έντονη και εντελώς απότομη (σχήμα 3.17 α)-β)).



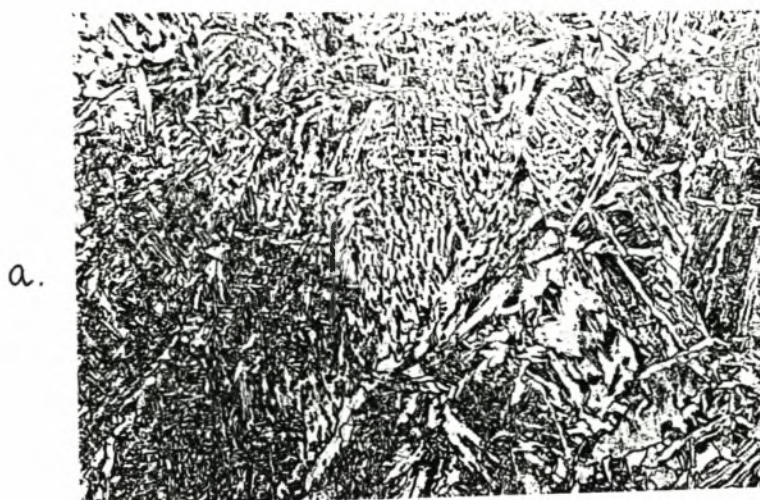
Σχήμα 3.14 : Δοκίμιο Νο4-Μέταλλο βάσης (500 X)



Σχήμα 3.15 : Δοκίμιο Νο4- Μέταλλο συγκόλλησης(100 X-50 X)

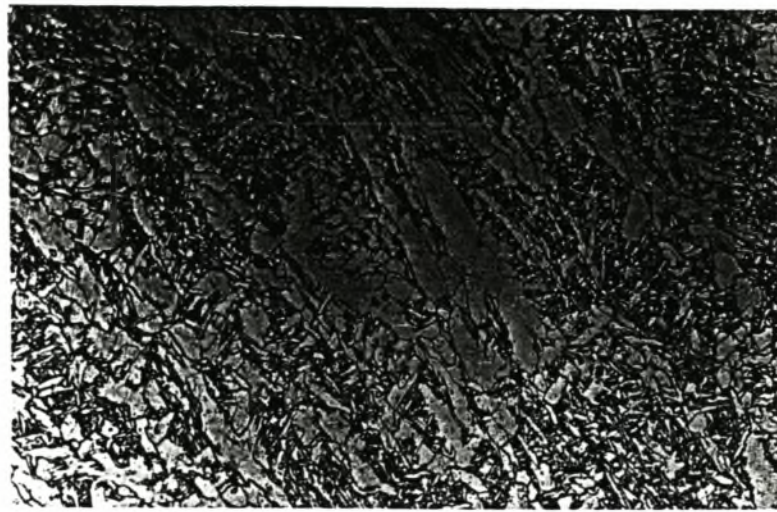


Σχήμα 3.16: Δοκίμιο Νο4- Όρια τήξης (100 X)

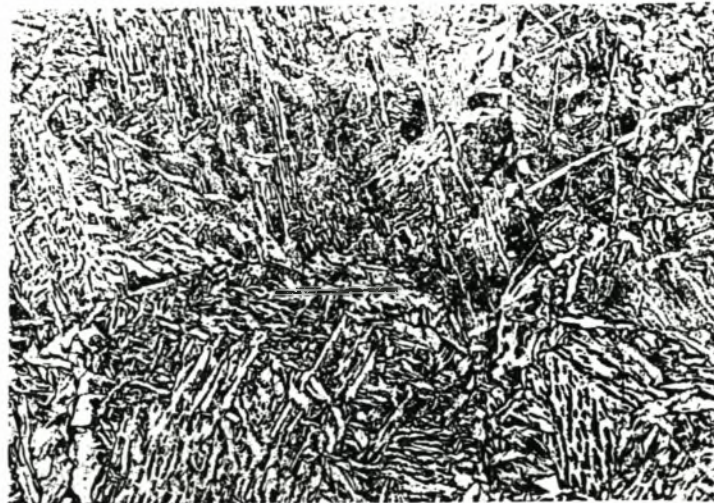


Σχήμα 3.17: Δοκίμιο Νο4- α)-β) Αρχή της ζώνης τήξης (500 X)

α.



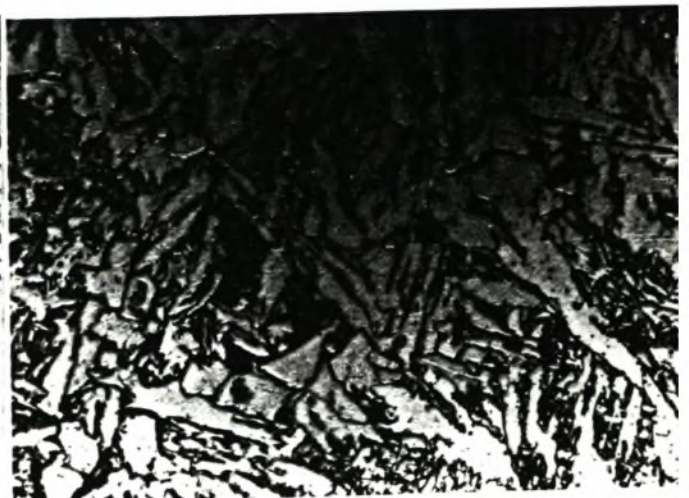
β.



Σχήμα 3.18: Δοκίμιο Νο8- α) Ζώνη τήξης β) Λίμνη συγκόλλησης (500X)



α.



β.

Σχήμα 3.19: Δοκίμιο Νο4- α) Όρια της ζώνης τήξης β) Λίμνη συγκόλλησης (500X)

3.4 ΣΥΝΟΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΩΠΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ (ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΑΒΕ)

Στον Πίνακα 3.5 φαίνονται τα δοκίμια των μετωπικών συγκολλήσεων μαζί με τις χαρακτηριστικές τιμές των συνθηκών συγκόλλησης.

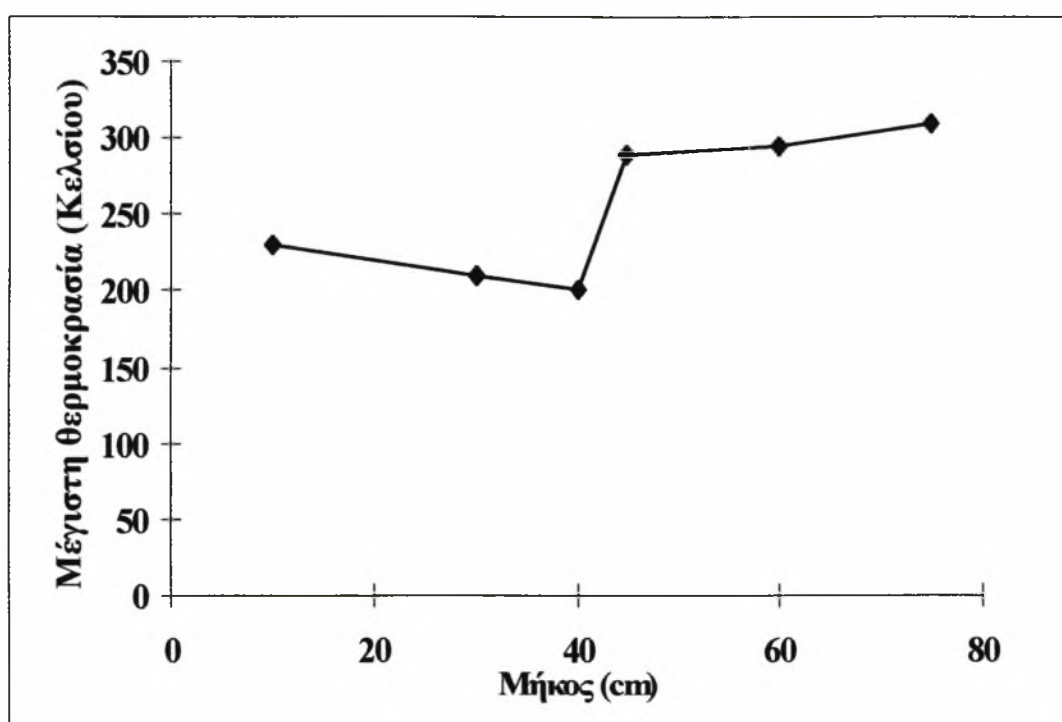
Πίνακας 3.5 : Συνθήκες μετωπικών συγκολλήσεων

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΜΗΚΟΣ (cm)	ΧΡΟΝΟΣ (min)	ΒΑΡΟΣ		ΤΑΧΥΤΗΤΑ V cm/min
			ΜΕΤΑΛΛΟΥ g	ΑΝΑ cm g/cm	
1	10	0,68	-	-	14,7
2	20	1,18	60	3,00	16,9
3	30	1,85	-	-	16,2
4	40	2,33	60	1,50	17,1
5	50	3,03	80	1,60	16,5
6	60	3,55	100	1,67	16,9
7	80	5,33	170	2,12	15
8	100	6,21	300	3,00	16,1
9	150	8,16	380	2,53	18,4
10	200	10,56	410	2,05	18,9
11	200	11,41	500	2,50	17,5
12	200	11,9	500	2,50	16,8

Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα συγκόλλησης και το βάρος του εναποτιθέμενου μετάλλου (υλικό που προστίθεται εξαιτίας του ηλεκτροδίου) ανά μήκος της συγκόλλησης κυμαίνεται από 14,7cm/min έως 18,9cm/min και 1,5g/cm έως 3 g/cm. Εκτιμάται ότι παρά το εύρος των τιμών αυτών μπορεί να θεωρηθεί ότι όλες οι συγκολλήσεις έγιναν με περίπου τις ίδιες συνθήκες και ιδιαίτερα οι συγκολλήσεις μεγάλου μήκους. Στο πίνακα 3.5 ως βάρος μετάλλου θεωρείται το βάρος του ελάσματος ενώ ο χρόνος ισούται: Μήκος ραφής / ταχύτητα συγκόλλησης. Μάλιστα κατά την πειραματική διαδικασία πρώτα καθορίζεται το μήκος της ραφής και στη συνέχεια υπολογίζεται πειραματικά ο χρόνος στον οποίο ολοκληρώθηκε η συγκόλληση. Κατόπιν βρίσκεται και ταχύτητα συγκόλλησης (μέση ταχύτητα).

3.4.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

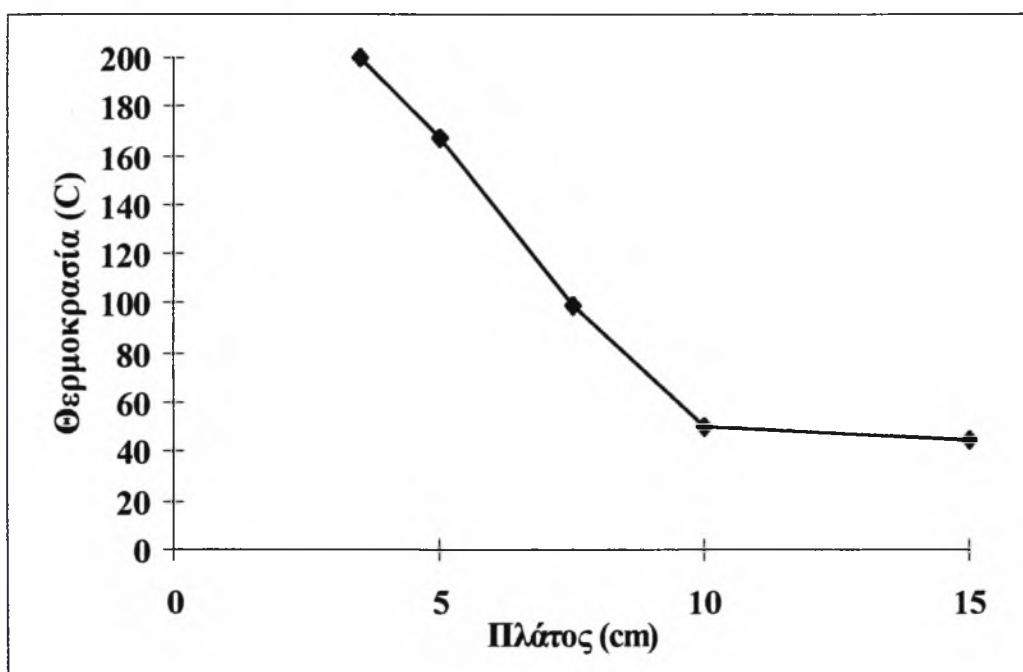
Με μολύβι θερμοκρασίας μετρήθηκε η ζώνη γύρω από την συγκόλληση για την οποία η θερμοκρασία υπερέβη τους 100°C . Αυτή η μέτρηση έδωσε για όλα τα δοκίμια 8,5-9cm. Η μέτρηση αυτή δεν δίνει καλή ακρίβεια όπως φαίνεται από τις μετρήσεις που έγιναν με θερμοστοιχεία στο δοκίμιο Νο7. Στο σχήμα 3.21 φαίνεται η κατανομή της θερμοκρασίας στο δοκίμιο Νο7 κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Η κατανομή αυτή δείχνει ότι η θερμότητα που παρέχεται στο μέταλλο εγκλωβίζεται προς την κατεύθυνση της συγκόλλησης με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο άκρο όπου ο συγκολλητής τελειώνει την συγκόλληση να είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του άκρου από το οποίο αρχίζει.



Σχήμα 3.21: Κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος συγκόλλησης στο δοκίμιο Νο7

Οι μετρήσεις κατά πλάτος του δοκιμίου και στη μέση περίπου αυτού (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22) δίνουν ότι το πλάτος της ζώνης μέσα στο οποίο αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες είναι περίπου 5cm ($T > 100^{\circ}\text{C}$). Όπως θα δούμε παρακάτω αυτό είναι το πλάτος της ζώνης όπου αναπτύσσονται ισχυρές παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις. Στα μεγάλα μήκη δοκίμια (7,8,9,10) μετρήθηκε αξιόλογη διαμήκης

συστολή της τάξεως των 2mm. Όμως και αυτού του μήκους η συστολή δεν έχει τεχνολογικές επιπτώσεις στις ναυπηγικές κατασκευές. Αντίθετα η γωνιακή παραμόρφωση είναι σημαντική αν και σταθερή για τα μεγάλα δοκίμια (βλέπε πίνακα 3.6).



Σχήμα 3.22: Κατανομή θερμοκρασίας κατά πλάτος της συγκόλλησης στο μέσο περίπου του δοκιμίου Νο7

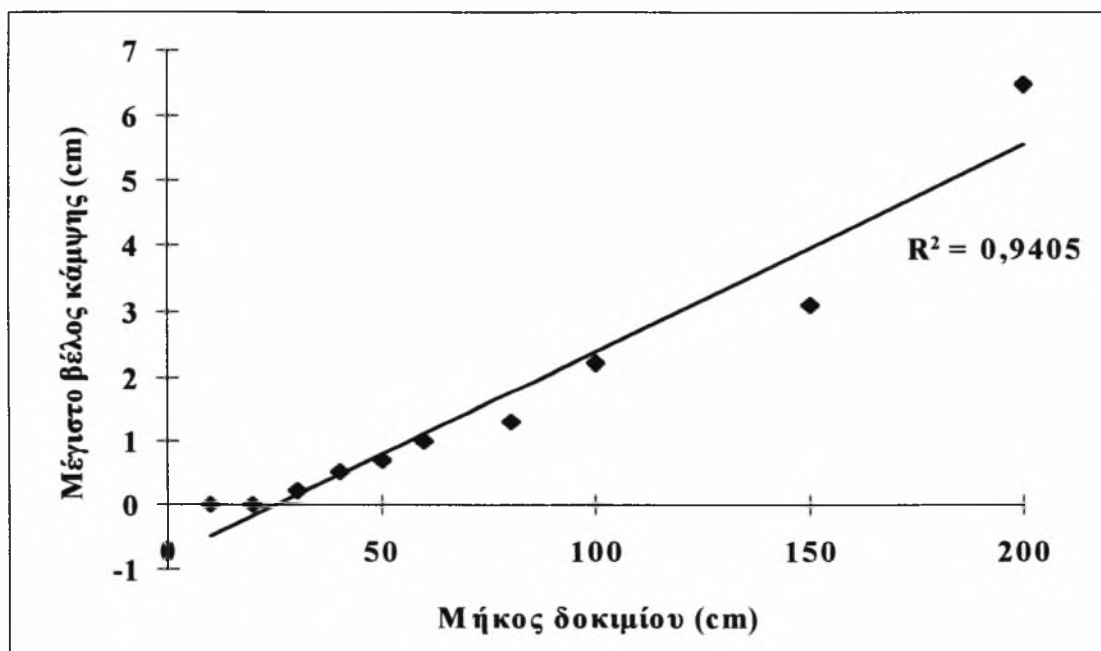
Η καμπτική παραμόρφωση αυξάνει όσο αυξάνει το μήκος του δοκιμίου (βλ. Σχήμα 3.24). Όταν το μήκος του δοκιμίου υπερβεί τα 400mm η καμπτική παραμόρφωση φαίνεται να μεταβάλλεται αναλογικά με το μήκος του δοκιμίου. Διαλέχτηκε να παρουσιαστεί η μέγιστη καμπτική παραμόρφωση και η παραμόρφωση συναρτήσει του μήκους του δοκιμίου γιατί όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.23, τα μεγαλύτερα βέλη κάμψης ευρίσκονται προς το μέρος όπου καταλήγει η συγκόλληση, πράγμα το οποίο συμφωνεί με τις μετρήσεις της θερμοκρασίας.

Οι μετρήσεις παραμένουσων τάσεων συμπληρώνουν την εικόνα συμπεριφοράς του υλικού, η οποία φαίνεται να προβάλλει από τις προηγούμενες μετρήσεις. Πράγματι η τάση σ_x (κατά μήκος της συγκόλλησης) σε απόσταση 0,8cm από το μέσον της συγκόλλησης όπου γινόταν η επικόλληση των επιμηκυνσιομέτρων, αυξάνεται γρήγορα μετά το δοκίμιο Νο 3 (μήκους 30 cm) και φθάνει τα 38 MPa για το δοκίμιο Νο4, ενώ για τα υπόλοιπα δοκίμια κυμαίνεται γύρω στα 40 MPa. Αν το όριο διαρροής του υλικού είναι κοντά

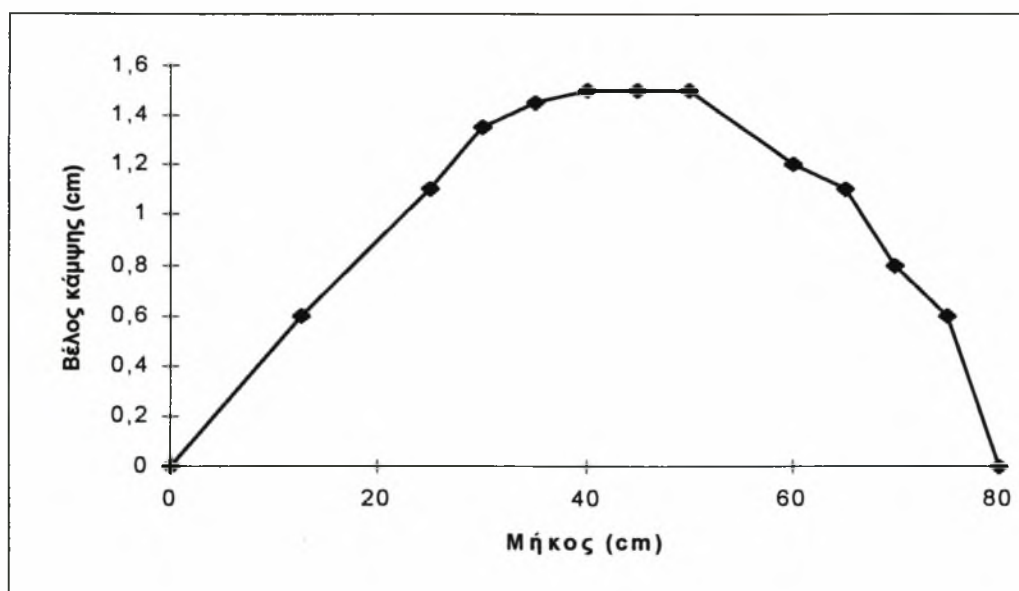
στα 40 MPa βλέπουμε ότι στο μέσο της συγκόλλησης το υλικό βρίσκεται σίγουρα υπό τάσεις που πλησιάζουν το όριο διαρροής.

Πίνακας 3.6 : Γωνιακή παραμόρφωση(angular distortion)

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΓΩΝΙΑΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ
1	1,00
2	2,00
3	2,70
4	3,20
5	6,02
6	6,85
7	7,28
8	7,30
9	7,10
10	7,16
11	4,70
12	5,50
13	7,40
14	3,43



Σχήμα 3.23 : Μέγιστη καμπτική παραμόρφωση συναρτήση του μήκους δοκιμίων



Σχήμα 3.24 : Καμπτική παραμόρφωση στο δοκίμιο Νο 7

Υπολογίζεται ότι αν το μήκος συγκόλλησης ξεπερνάει τα 30 cm οι παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται γίνονται μέγιστες. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε μήκος 15 cm για τα τμήματα των συγκολλήσεων με την τεχνική skip back step ώστε να παραμένουν χαμηλές οι τάσεις του κάθε τμήματος συγκόλλησης. Το δοκίμιο αυτό παρουσίασε πράγματι βελτίωση στη καμπτική παραμόρφωση κατά 45% όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.7. Όμως η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να έχει μεγάλη πρακτική εφαρμογή λόγω της χρονοβόρας διαδικασίας που απαιτείται. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί σε ειδικές περιπτώσεις. Η μέθοδος με πάκτωση μεταλλικών ενισχύσεων για τις ίδιες συνθήκες συγκόλλησης έδωσε επίσης βελτίωση της παραμόρφωσης. Ενώ η μέθοδος με προ ένταση έδωσε αμφιλεγόμενα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.7: Βελτίωση καμπτικών παραμορφώσεων για βελτίωση τις επιλεχθείσας μεθόδου για διάφορες μετωπικές συγκολλήσεις

ΜΕΤΩΠΙΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ		Μήκος: 200cm	
Τύπος συγκόλλησης	Μέγιστο βέλος παραμόρφωσης		Βελτίωση
	mm		%
1. Απλή	73		0
2. Με ενίσχυση	52		28
3. Skip back step	40		45
Με προένταση 1,5tn (94Kg/cm ²)	58		20
Με προένταση 6,5tn (406Kg/cm ²)	40(buckling)		45

3.5 ΣΥΝΟΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ

Κατά την εφαρμογή της προέντασης στις μετωπικές συγκολλήσεις είχαμε βελτίωση των καμπτικών και γωνιακών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο Νο 13 που συγκολλήθηκε ενώ εφαρμοζόταν δύναμη 1,5tn που αντιστοιχεί σε τάση 1,332 MPa παρουσίασε ελαφρά βελτίωση της καμπτικής παραμόρφωσης, ενώ η γωνιακή παρέμεινε στα ίδια επίπεδα. Στο δοκίμιο Νο 14 που συγκολλήθηκε ενώ εφαρμοζόταν δύναμη 6,5tn που αντιστοιχεί σε τάση 5,772MPa, επιτεύχθηκε μεγάλη μείωση των καμπτικών παραμορφώσεων, παρουσίασε όμως αστάθεια μορφής(buckling). Το buckling είναι κυματοειδής παραμόρφωση που προκύπτει από συνδυασμό εφελκυστικών και θλιπτικών παραμένουσων τάσεων.

Οι μετρήσεις της δύναμης που εφαρμοζόταν στα άκρα του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου συγκόλλησης και ψύξης του δοκιμίου (2ο πέραςμα) δίνουν μια άποψη των φαινομένων που μπορεί να είναι υπεύθυνα για το buckling. Φαίνεται ότι η δύναμη μειώνεται (relaxation) από την θέρμανση του δοκιμίου, ενώ όταν το δοκίμιο ψύχεται η δύναμη αυξάνει χωρίς να φθάσει την αρχικά επιβαλλόμενη. Η διαφορά είναι 0,1tn.

Αυτή η διαφορά οφείλεται στο ότι είχαμε κάποια πλαστική παραμόρφωση και απομείωση των τάσεων (relaxation). Η μέτρηση των παραμένουσων τάσεων κατά σ_x και στα δύο δοκίμια στο μέσον του μήκους τους και κατά το πλάτος του δοκιμίου [] αποκαλύπτει μερικά από τα φαινόμενα. Τα μεγέθη των θλιπτικών τάσεων είναι αρκούντως μεγάλα για να προκαλέσουν buckling.

3.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΣΤΗΚΕ ΣΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ Νο 4 ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

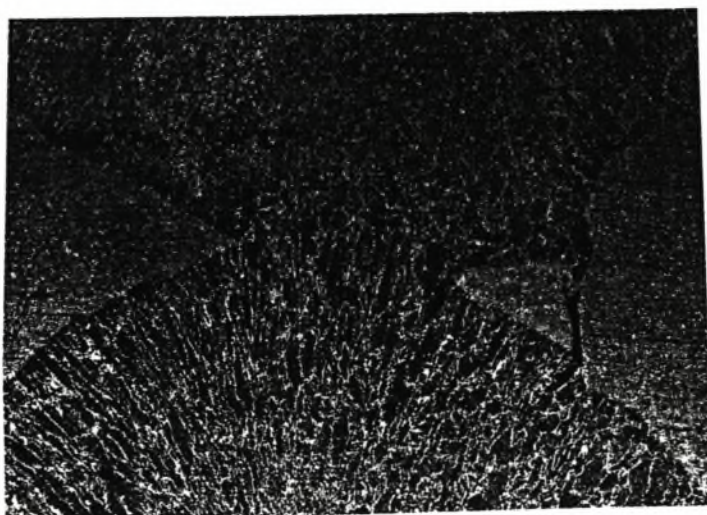
Κατά την ανάλυση και επεξεργασία των δοκιμών των συμβατικών συγκολλήσεων βρέθηκε ένα σφάλμα στο δοκίμιο Νο4. Για να μπορέσουμε να διαπιστώσουμε τον λόγο προέλευσης του συγκεκριμένου σφάλματος πρέπει να κάνουμε

έλεγχο της δομής του σφάλματος και να βγάλουμε διάφορες φωτογραφίες μικροσκοπικά και μακροσκοπικά. Επίσης θεωρήσαμε απαραίτητο να κάνουμε μία ανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο της EBETAM τύπου JEOL 6400 ώστε να γνωρίζουμε την χημική σύσταση του σφάλματος.

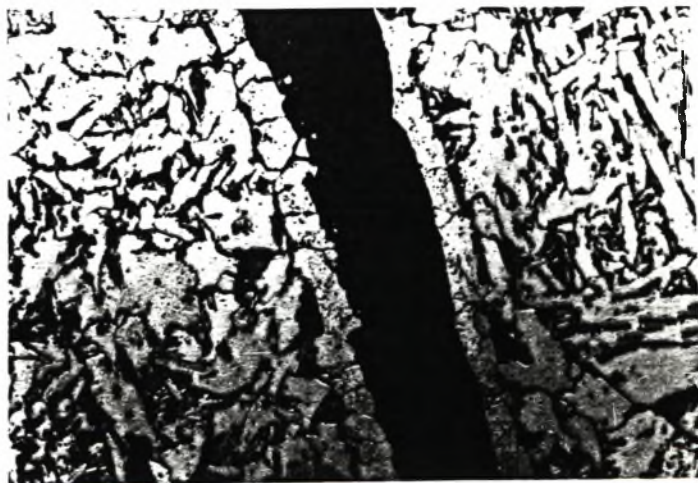
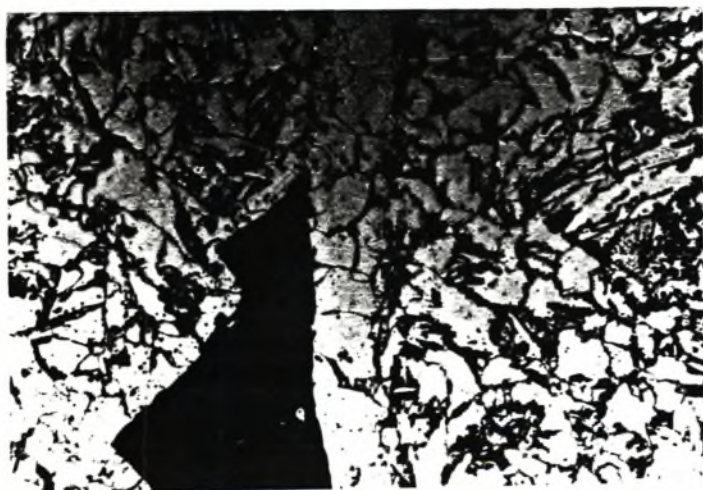
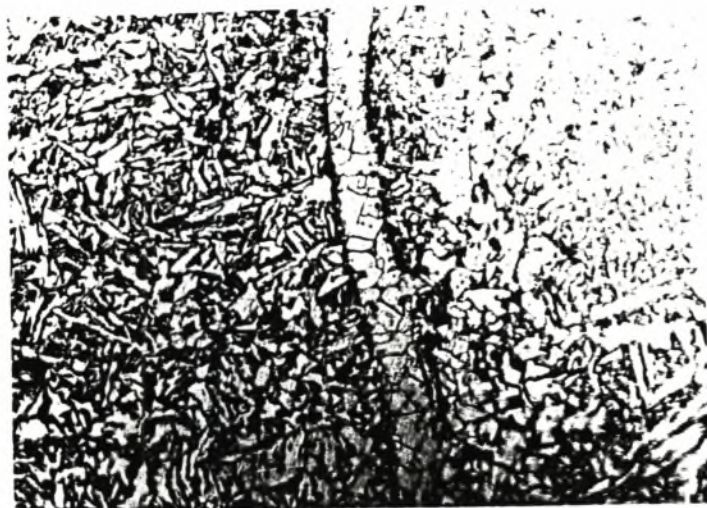
3.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η ανάλυση του σφάλματος προ υποθέτει την μελέτη της δομής η οποία έγινε μακροσκοπικά και μικροσκοπικά. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της οπτικής μικροσκοπίας καθώς και αυτά της μακροδομής. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.33 το σφάλμα δημιουργήθηκε ακριβώς στην ένωση των δύο περασμάτων. Πρόκειται για μία σημαντική ατέλεια η οποία εκτιμάται ότι οφείλεται σε δύο λόγους (όπως φαίνεται από τα σχήματα 3.34, 3.35, 3.36):

- α. Η πρώτη εκτίμηση είναι η εισαγωγή ξένου σωματιδίου κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, με διαφορετική δομή σε σχέση με το μέταλλο βάσης.
- β. Η δεύτερη εκτίμηση είναι η δημιουργία της οπής κατά την διάρκεια της ψύξης. Η συνύπαρξη υγρής και στερεής φάσης καθώς και ο σχηματισμός εκτεταμένης ισοαξονικής ζώνης (καθ' ότι το θερμοκρασιακό gradient είναι μικρό) δημιούργησαν αυτή την οπή και τα 'κορδόνια' διαφορετικής δομής. Αυτά τα κορδόνια φαίνεται να είναι από μονοφασικό υλικό, με μεγάλους κόκκους, αποτέλεσμα του χαμηλού ρυθμού ψύξης λόγω της ύπαρξης αέρα από την πλευρά της τρύπας.



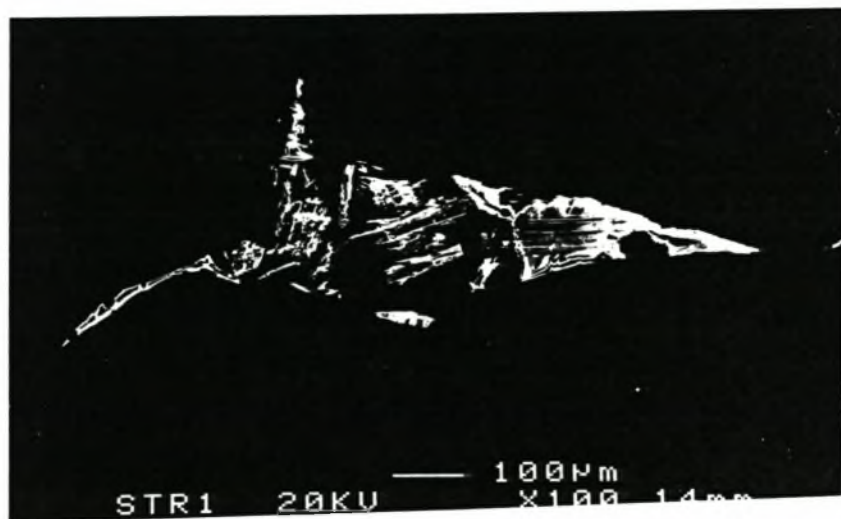
Σχήμα 3.33 : Τοποθεσία δημιουργίας του σφάλματος



Σχήμα 3.34 : Οπτική μικροσκοπία του σφάλματος

3.6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ

Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε πλήρως το σφάλμα εμφανίσαμε κάποιες φωτογραφίες σε διάφορες μεγεθύνσεις. Η μεγέθυνση φαίνεται πάνω στις φωτογραφίες. Από τις φωτογραφίες και από την χημική ανάλυση - στα διάφορα σημεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.39 - συμπεραίνουμε ότι το σφάλμα είναι έγκλεισμα.



Σχήμα 3.37 : Ηλεκτρονική μικροσκοπία

3.6.3 ΑΙΤΙΕΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Το σφάλμα που παρουσιάστηκε στο συγκεκριμένο δοκίμιο είναι ένα έγκλεισμα που παρατηρείται σε όλες σχεδόν τις συμβατικές συγκολλήσεις. Εκτός από τις αιτίες που προαναφέραμε το σφάλμα μπορεί να οφείλεται:

- Σε κακό κράτημα του ηλεκτροδίου, δηλαδή πολύ κατακόρυφα. Τότε η σκουριά μπορεί να προπορεύεται σε σχέση με το μπάνιο της τήξεως.
- Σε τόξο πολύ μεγάλου μήκους ή σε πολύ μικρή ένταση κολλήσεως.
- Σε μεγάλη κυρτότητα των κορδονιών που βρίσκονται από κάτω.

Βέβαια το συγκεκριμένο σφάλμα δεν ήταν μόνο έγκλεισμα αλλά και ένα είδος πόρου. Όταν ο αριθμός τέτοιων σφαλμάτων δεν είναι μεγάλος τότε θεωρείται ότι είναι σοβαρό ελάττωμα. Αντίθετα όταν ο αριθμός αυξάνει τότε η επιρροή τους στις μηχανικές ιδιότητες του συγκολλημένου κομματιού, είναι μεγάλη. Οι πόροι προέρχονται από τις ακαθαρσίες του μετάλλου βάσης και από το πολύ μακρύ τόξο που δίνει την ευκαιρία στον ατμοσφαιρικό αέρα να διεισδύσει και να επιδράσει στη λίμνη συγκόλλησης. Η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης και η χρησιμοποίηση ‘υγρού’ ηλεκτροδίου είναι παράγοντες που επιδρούν αρνητικά.

Για να αποφύγουμε τέτοιου είδους σφάλματα θα πρέπει να προετοιμάσουμε κατάλληλα το κομμάτι για την συγκόλληση. Το ανθρώπινο λάθος μπορεί να διορθωθεί από την εμπειρία του τεχνίτη, που όμως είναι ένας αστάθμητος παράγοντας όπου δύσκολα μπορεί να ελεγχθεί.

ΕΝΟΤΗΤΑ 4 : ΕΠΙΛΟΓΗ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

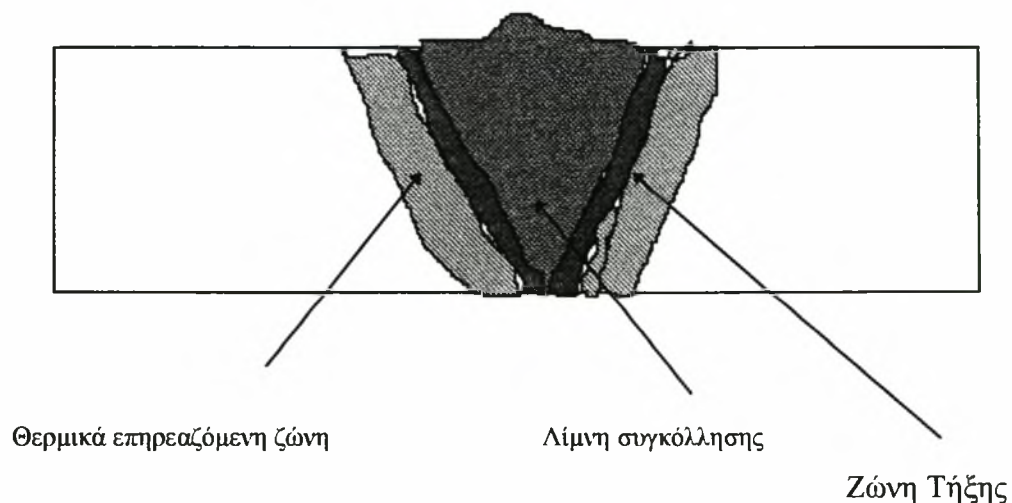
Στην ενότητα 4 περιγράφεται μια μεθοδολογία επιλογής των κατάλληλων συνθηκών συγκόλλησης ώστε να δημιουργηθεί μια συγκόλληση με όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα και προβλήματα. Η μεθοδολογία επιλογής επιβάλλει την μελέτη των συγκεκριμένων συγκολλήσεων τόσο μικροσκοπικά όσο και μακροσκοπικά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα επιλογής, παράλληλα με την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΑΚΡΟΔΟΜΗΣ -ΒΗΜΑ 1^ο

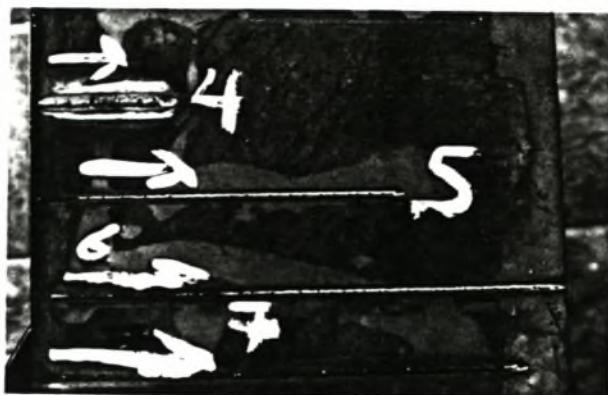
Το πρώτο βήμα επιλογής έχει να κάνει με την απαίτηση της πλήρους διείσδυσης της λίμνης συγκόλλησης. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι διάφορες περιοχές συγκόλλησης όπως αυτές ονομάστηκαν σε πρόσφατη προδιαγραφή του ΕΛΟΤ. Η απαίτηση της πλήρους διείσδυσης έχει να κάνει με την αντοχή της συγκόλλησης σε εφελκυστικά και διατμητικά φορτία. Σε περίπτωση που η λίμνη συγκόλλησης σταματάει λίγο πριν τα 4mm (ή και περισσότερο) τότε σε μια τομή κάθετη προς την λίμνη συγκόλλησης παρατηρούμε δύο διαφορετικά υλικά. Το πρόβλημα αυτό είναι σημαντικό για πολλούς λόγους. Κατ' αρχήν όταν δεν υπάρχει πλήρη διείσδυση τότε η ροή θερμότητας είναι τρισδιάστατη και τόσο η ζώνη τήξης όσο και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό. Αυτές οι δύο ζώνες (όπως θα δούμε και στο επόμενο βήμα) πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Επίσης η κατασκευή γίνεται πολύ ευαίσθητη σε διατμητικά φορτία αφού το διαφορετικό μέτρο διάτμησης που αποκτούν οι δύο περιοχές μετά την ψύξη δίδει στη κατασκευή μικρότερη αντοχή (το συγκεκριμένο γεγονός έχει να κάνει με την αντοχή σε διάτμηση μιας διεπιφάνειας).

Έτσι λοιπόν κάνοντας την μελέτη της μακροδομής βλέπει κανείς ποια είναι τα δοκίμια που έχουν υποστεί πλήρη διείσδυση. Στα σχήματα 4.2 έως 4.14 παρουσιάζονται μόνο εκείνα τα δοκίμια που έχουν υποστεί πλήρη διείσδυση καθώς και κάποια από τα φαινόμενα που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1 (drop-out, undercut,...).

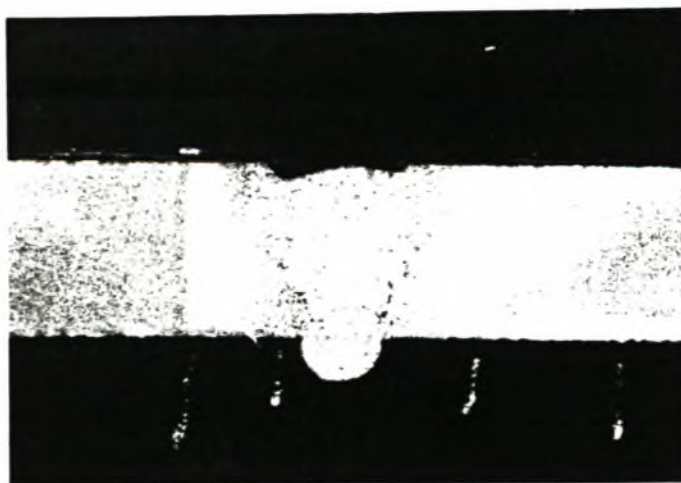
Στο σχήμα 4.2 φαίνεται μια μακροφωτογραφία στην οποία απεικονίζονται τα διάφορα 'κορδόνια' της σειράς A των περασμάτων (ενότητα 2). Επίσης το δοκίμιο B4 (σχήμα 4.3) έχει υποστεί το φαινόμενο 'undercut', δηλαδή δημιουργήθηκε ένα υπόσκαμα στη βάση της συγκόλλησης. Τα δοκίμια B7 και B23 (σχήμα 4.13) έχουν υποστεί ένα διαφορετικό φαινόμενο αυτό της καθίζησης ('drop-out'), ενώ το δοκίμιο B2 (σχήμα 4.14) δεν έχει πλήρη διείσδυση. Από την μακροσκοπική μελέτη διαπιστώνουμε ότι κατά την συγκόλληση laser έχουμε την δημιουργία κάποιων προβλημάτων τα οποία δεν επηρεάζουν την ποιότητα της συγκόλλησης. Στα σχήματα 4.2 έως 4.14 παρατηρούμε την δημιουργία ενός εξογκώματος πάνω στην επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης. Αυτό το εξογκωμα σε συνάρτηση με τα 'αυλάκια' που δημιουργούνται ακριβώς στο τέλος του εξογκώματος είναι αποτέλεσμα της πίεσης του προστατευτικού αερίου. Το υλικό τήκεται με αποτέλεσμα το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης να μειώνονται δραματικά. Έτσι όταν το προστατευτικό αέριο πέφτει πάνω στο τηγμένο μέταλλο με μια πίεση -σχετικά υψηλή- το παραμορφώνει, με άμεσο αποτέλεσμα την δημιουργία του εξογκώματος και των 'αυλακιών'. Βέβαια το μέγεθος των παραπάνω ατελειών δεν επηρεάζει την κατεργαστικότητα και την λειτουργικότητα του δημιουργούμενου συγκολλημένου κομματιού. Τέλος στο δοκίμιο B8 φαίνεται η θέση του σημείου εστίασης, που είναι 1mm κάτω από την επιφάνεια (έχουμε αύξηση του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης στη θέση αυτή).



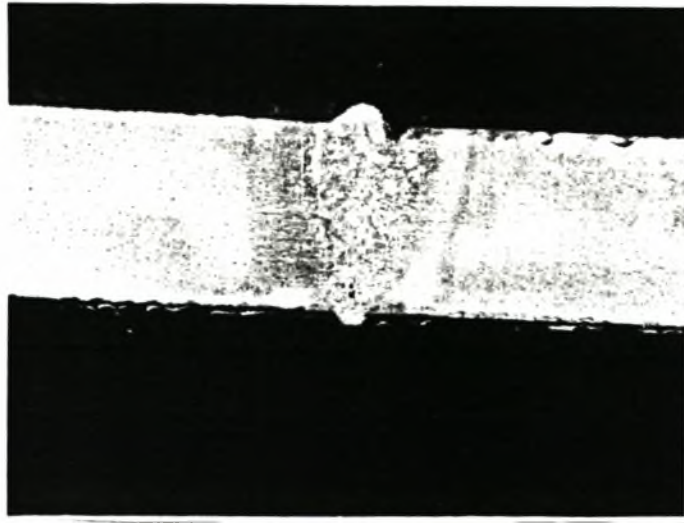
Σχήμα 4.1 : Περιοχές συγκόλλησης σύμφωνα με προδιαγραφή του ΕΛΟΤ



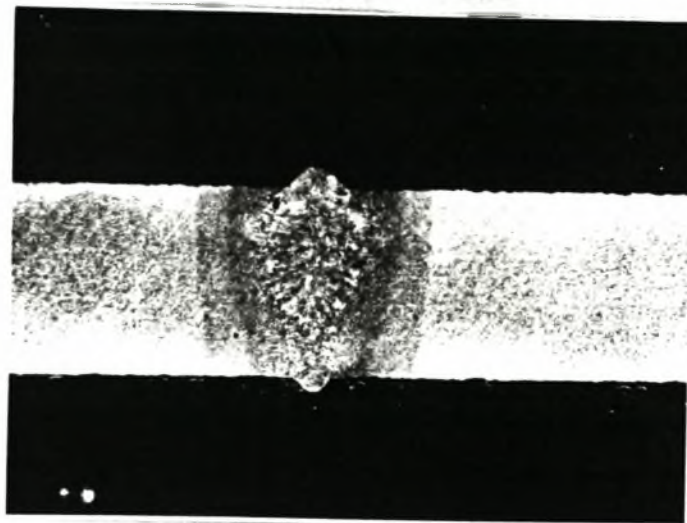
Σχήμα 4.2 : Μακροφωτογραφία της Α' σειράς των δοκιμίων ('κορδόνια)



Σχήμα 4.3 : Δοκίμιο Β4 - 6x (πλήρης διείσδυση)



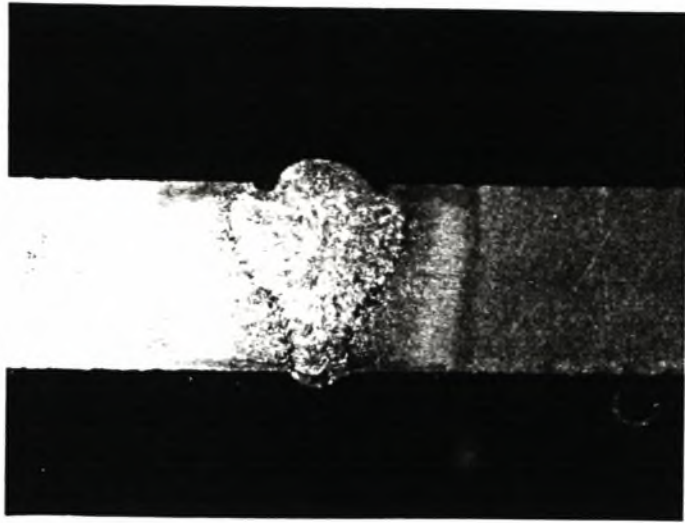
Σχήμα 4.4 : Δοκίμιο B5 - 6x (πλήρης διείσδυση)



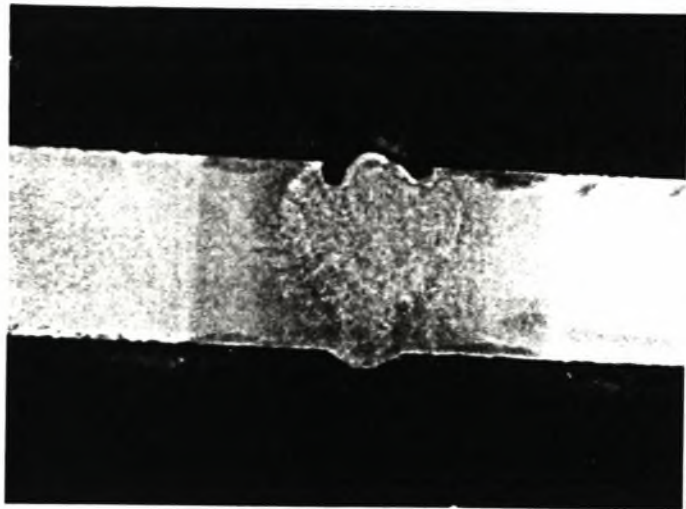
Σχήμα 4.5: Δοκίμιο B8 - 6x (πλήρης διείσδυση)



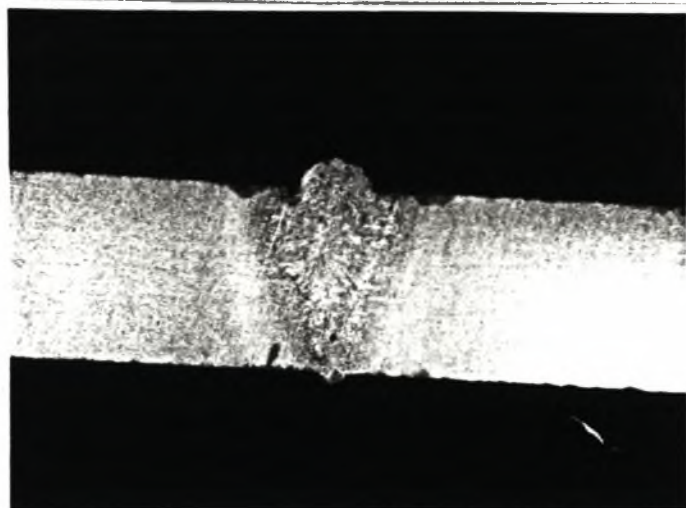
Σχήμα 4.6 : Δοκίμιο B9 - 10x (πλήρης διείσδυση)



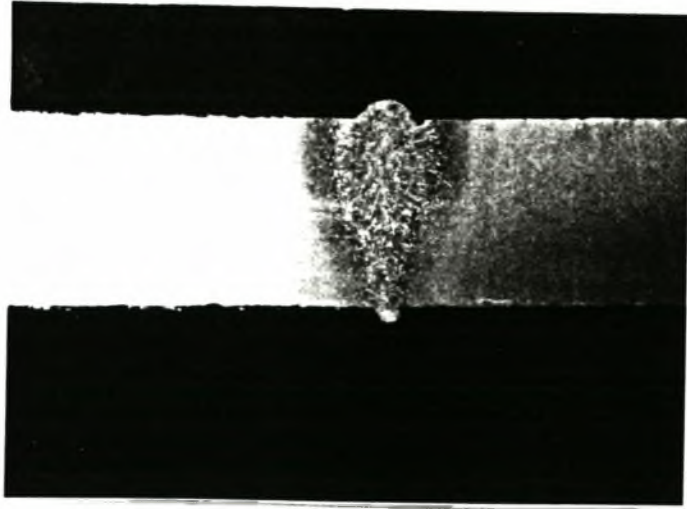
Σχήμα 4.7 : Δοκίμιο B14 - 6x (πλήρης διείσδυση)



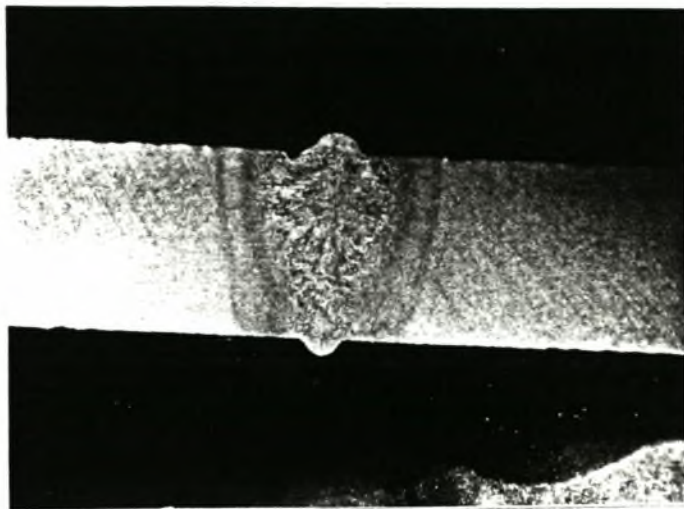
Σχήμα 4.8 : Δοκίμιο B17 - 6x (πλήρης διείσδυση)



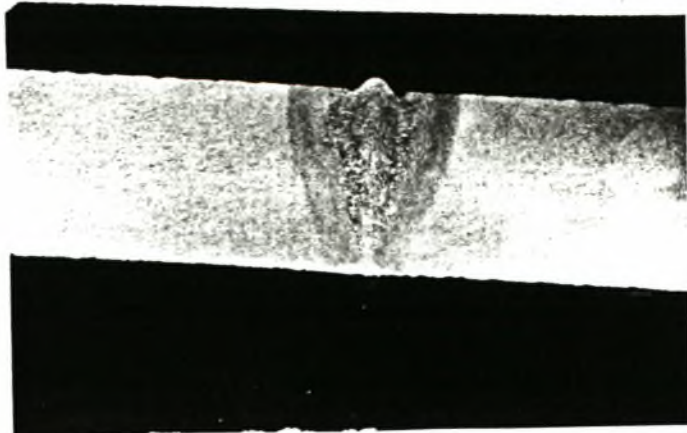
Σχήμα 4.9 : Δοκίμιο B18 - 6x (πλήρης διείσδυση)



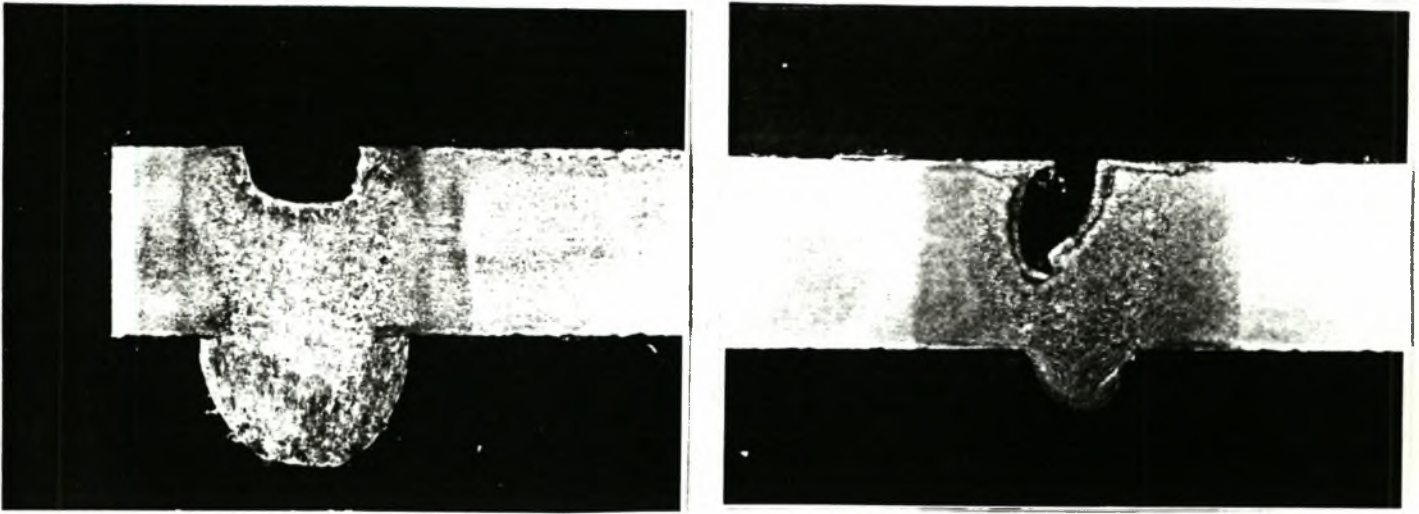
Σχήμα 4.10 : Δοκίμιο B24 - 6x (πλήρης διείσδυση)



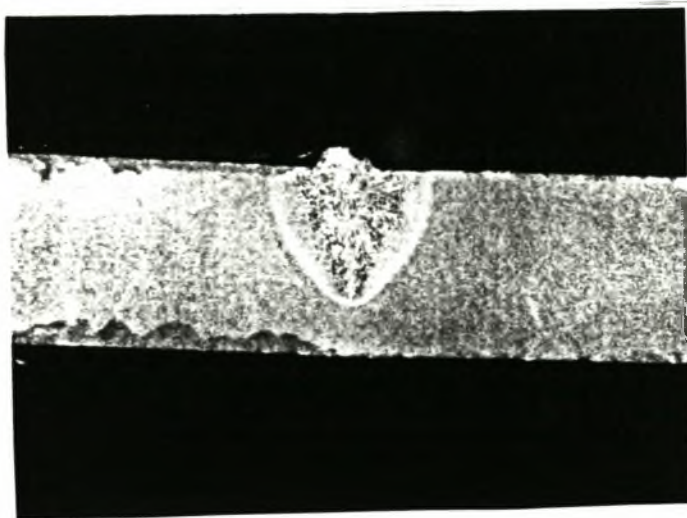
Σχήμα 4.11 : Δοκίμιο B27 - 6x (πλήρης διείσδυση)



Σχήμα 4.12 : Δοκίμιο B28 - 6x (πλήρης διείσδυση)



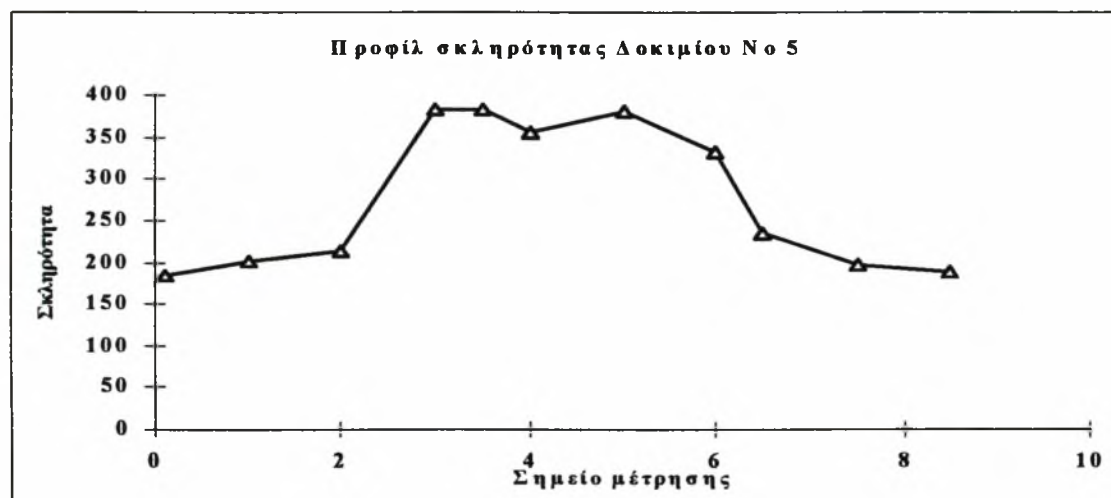
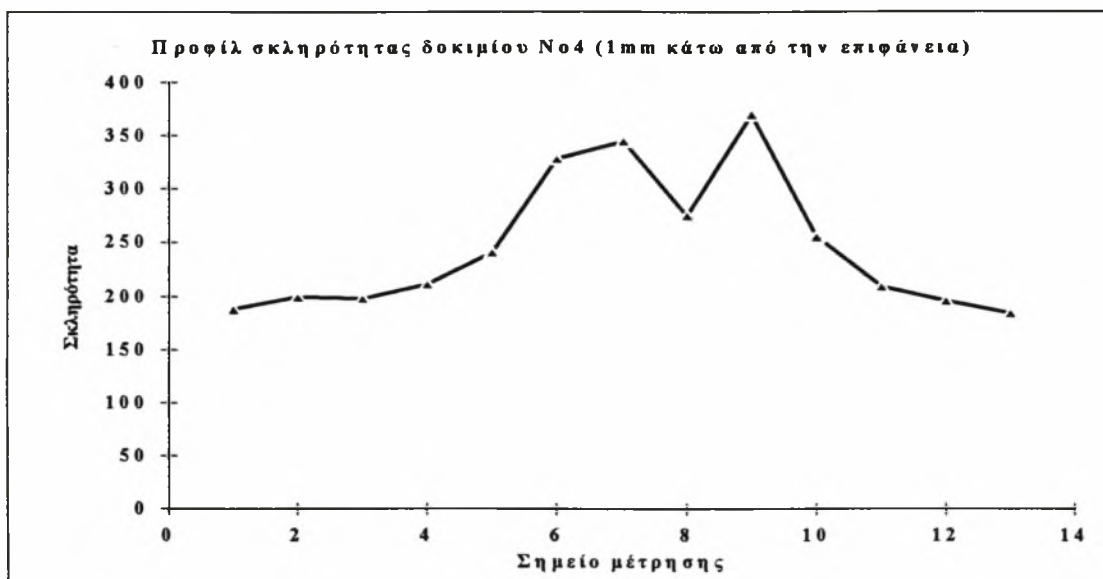
Σχήμα 4.13 : Δοκίμιο B7-B23 6x (drop - out) (200mm/min)



Σχήμα 4.14 : Δοκίμιο B2 - 6x (ατελής διείσδυση)

4.3 ΠΡΟΦΙΛ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ.

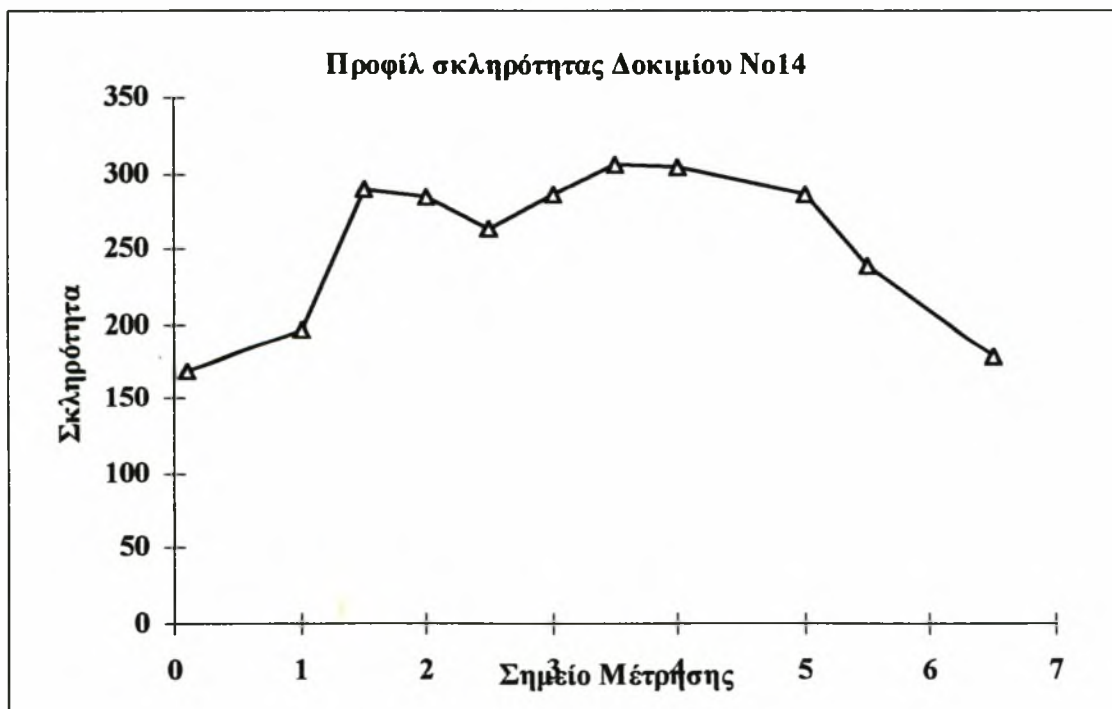
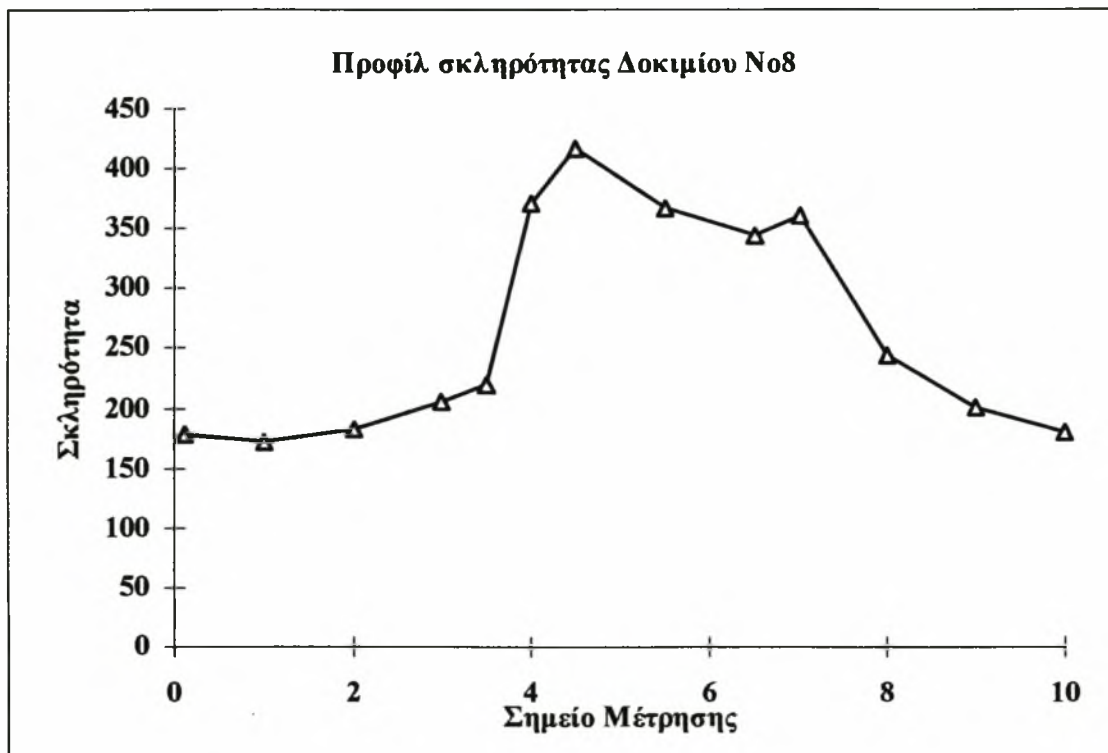
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθούν τα διάφορα προφίλ σκληρότητας των επιλεγμένων δοκιμίων καθώς και τα μεγέθη της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και της λίμνης συγκόλλησης.



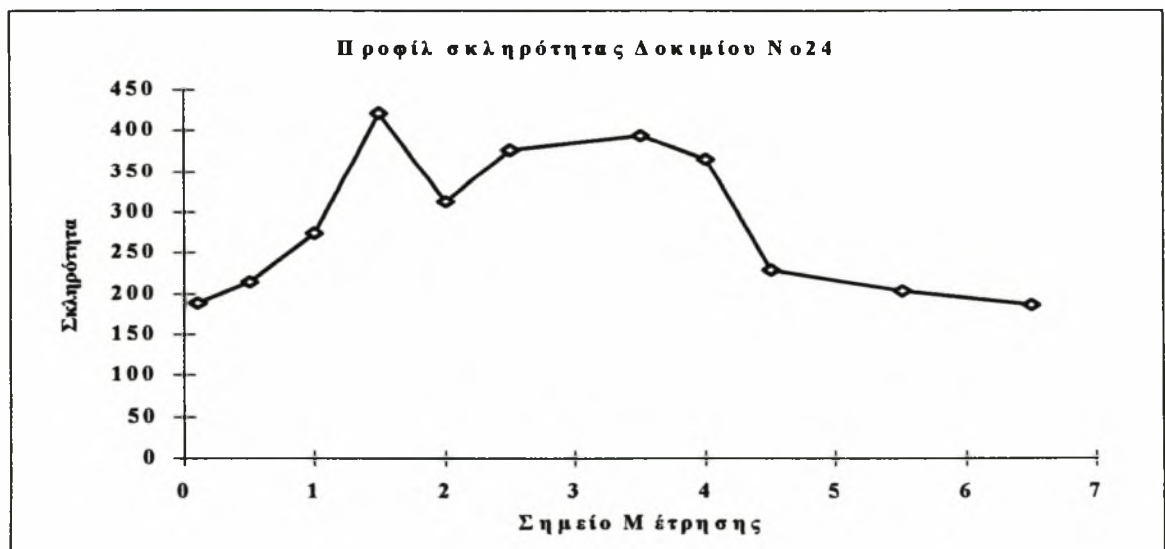
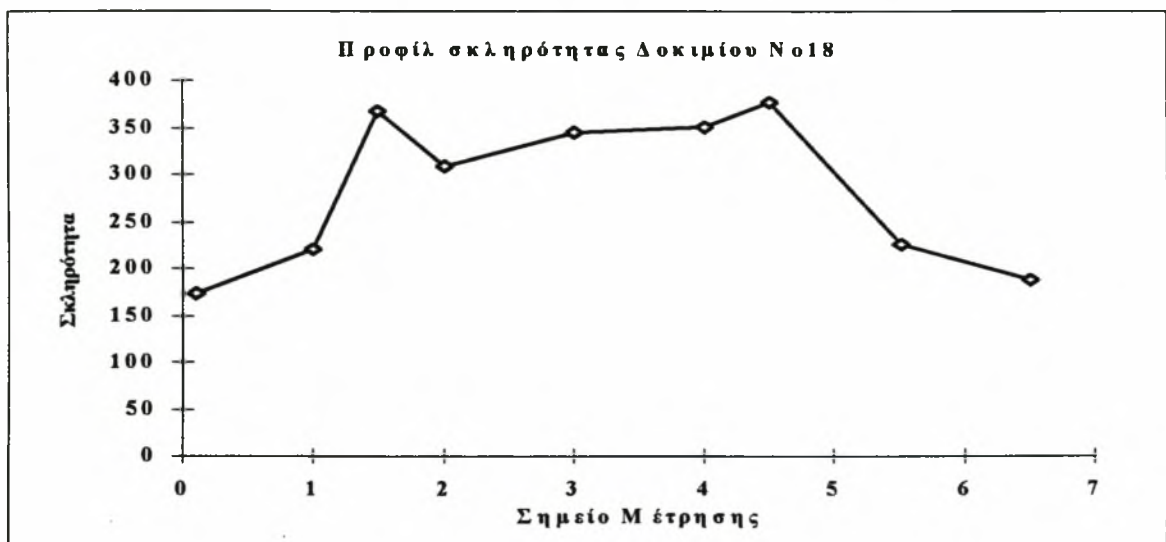
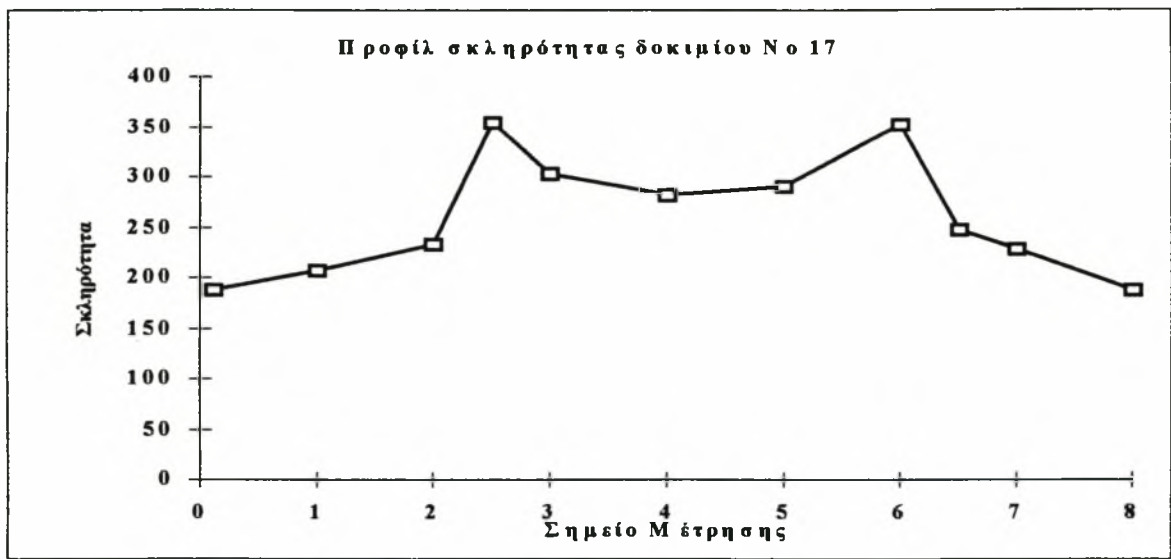
Σχήμα 4.14 : Προφίλ σκληρότητας για τα δοκίμια B4 και B5

Στα διάφορα προφίλ σκληρότητας παρατηρούμε την απότομη αύξηση της σκληρότητας καθώς εισερχόμαστε μέσα στη λίμνη συγκόλλησης ενώ σε πολλές περιπτώσεις βλέπουμε την δημιουργία 'αυτιών', δηλαδή την απότομη αύξηση της σκληρότητας στην ζώνη τήξης και κατόπιν την σταθεροποίησή της, σε χαμηλότερη τιμή, στη λίμνη συγκόλλησης. Η δημιουργία

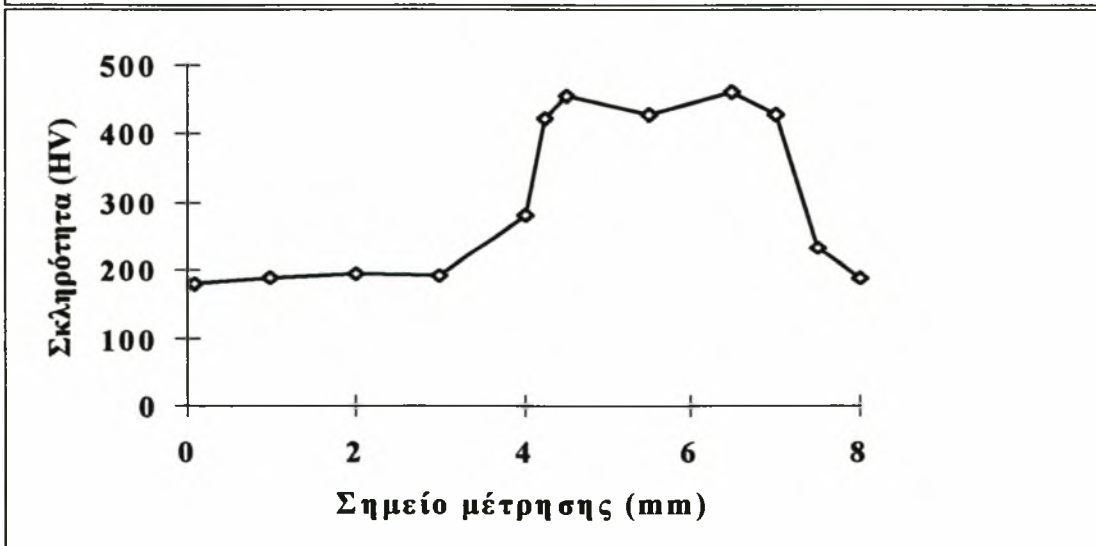
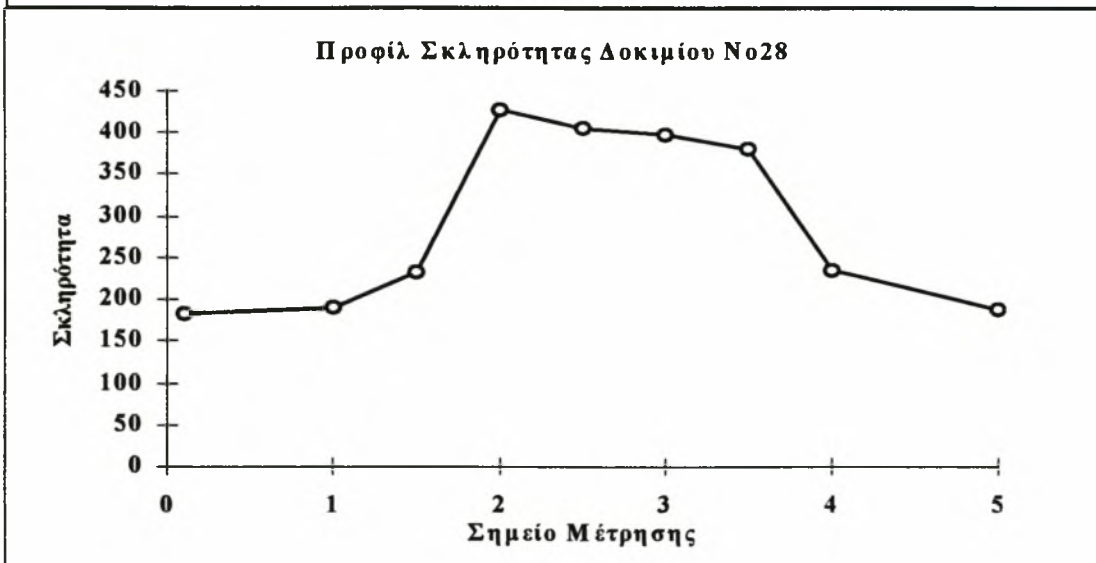
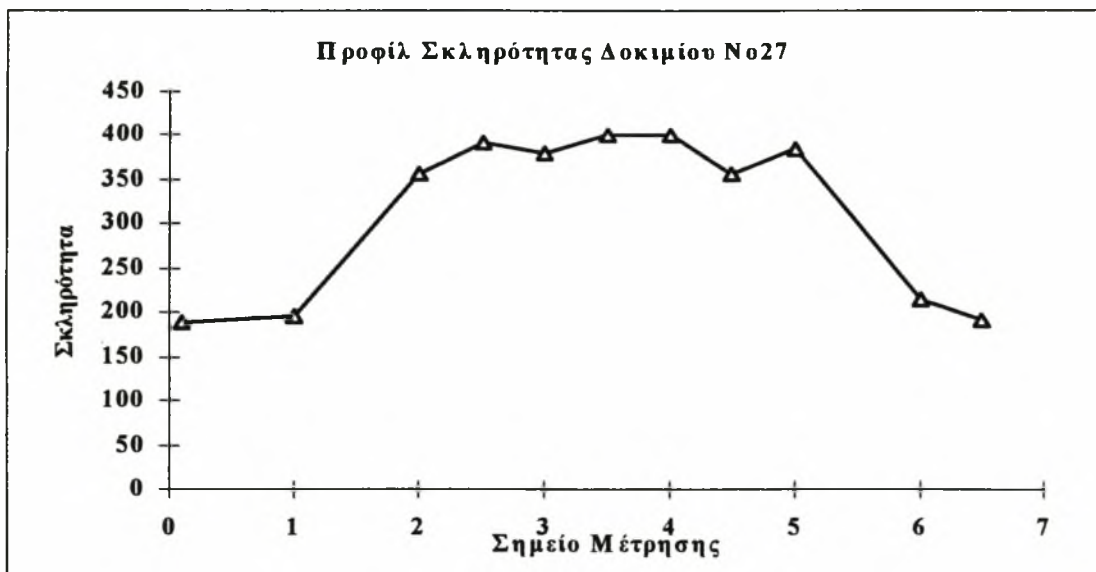
των 'αυτιών' οφείλεται στη δημιουργία μαρτενσίτη στη ζώνη τήξης και είναι δύσκολο να επιτευχθεί τέτοια κατανομή (δυσκολία εύρεσης μαρτενσίτη) όπως αυτή του δοκιμίου B17 που είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα.



Σχήμα 4.15 : Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων B8 και B14



Σχήμα 4.16 : Προφίλ σκληρότητας Δοκιμίων B17-B18-B24



Σχήμα 4.17 : Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων B27-B28-B9

Για να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα γύρω από τις σκληρότητες των διαφόρων δοκιμών δημιουργήθηκε ο πίνακας 4.1 όπου φαίνεται η μέγιστη και η μέση τιμή των σκληροτήτων που μετρήθηκαν.

Πίνακας 4.1 : Κατανομή δοκιμών με βάση την μέση σκληρότητα

Αρ.Δοκιμίου	<i>B14</i>	<i>B4</i>	<i>B17</i>	<i>B5</i>	<i>B8</i>	<i>B18</i>	<i>B24</i>	<i>B28</i>	<i>B27</i>	<i>B9</i>
Μέγιστη σκληρότητα	305	370	355	383	416	377	394	428	402	460
Μέση σκληρότητα	255	255	261	273	283	285	289	308	317	330

Από τον πίνακα 4.1 φαίνεται ότι στα δοκίμια όπου ο ρυθμός ψύξης ήταν αρκετά υψηλός η σκληρότητα παίρνει μεγάλες τιμές.

4.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΗΣ Θ.Ε.Ζ. ΚΑΙ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ - ΒΗΜΑ 2^ο

Παραπάνω εκλέχθηκαν δέκα δοκίμια ως τα καταλληλότερα από την σκοπιά της διεύθυνσης. Κατόπιν θα πρέπει να εκλεχθεί ποια από τα δοκίμια έχουν την μικρότερη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και την μικρότερη λίμνη συγκόλλησης. Η απαίτηση αυτή είναι αναγκαία διότι όσο αυξάνει ο όγκος της λίμνης συγκόλλησης τόσο αυξάνουν οι παραμένουσες τάσεις (κατ' επέκταση και οι παραμορφώσεις). Βέβαια μεταλλογραφικά η δομή που προκύπτει σε μεγάλη λίμνη συγκόλλησης ίσως να είναι πιο επιθυμητή σε σχέση με μια μικρή λίμνη συγκόλλησης όπου οι ρυθμοί ψύξης είναι υψηλοί. Μεγάλη λίμνη συγκόλλησης σημαίνει μεγάλος όγκος υλικού που τήκεται με άμεση συνέπεια την αύξηση του κινδύνου της ενσωμάτωσης ξένων προσμίξεων κατά την στερεοποίηση. Επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η Θ.Ε.Ζ τόσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή του υλικού και η αλλαγή της δομής του και των ιδιοτήτων του σε μεγάλο εύρος, πράγμα ανεπιθύμητο. Με βάση τα παραπάνω απαιτείται να δημιουργηθεί ένας πίνακας με τα δοκίμια που επιλέχθηκαν και με το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης και της Θ.Ε.Ζ για το καθένα. Ο πίνακας 4.2 απεικονίζει τα

αποτελέσματα που θέλουμε. Με βάση τον πίνακα 4.2 και με βάση την παράγραφο 4.2 και 4.3 καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

Πίνακας 4.2 : Σύγκριση των μεγεθών της Θ.Ε.Ζ και της λίμνης συγκόλλησης για τα δοκίμια που επιλέχθηκαν από το βήμα 1

Αρ. Δοκιμίου	Μέγεθος Θ.Ε.Ζ (mm)	Μέγιστο πλάτος λίμνης συγκόλλησης (mm)	Μέση σκληρότητα(HV)
B4	2,4	4,7	255
B5	1,4	3,3	273
B8	1,5	3,6	283
B9	1	2,7	330
B14	1,4	4	255
B17	2,17	4,35	261
B18	1,1	3,6	285
B24	1	3,4	289
B27	11,1	3,4	314
B28	0,8	2,3	308

Για τα δοκίμια B4-B14-B17 παρατηρήθηκε μεγάλη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και πολύ μεγάλη λίμνη συγκόλλησης. Μάλιστα στα δοκίμια αυτά η σκληρότητα ήταν χαμηλή, συγκρινόμενη με τα υπόλοιπα. Τέλος παρατηρείται και το φαινόμενο δημιουργίας του υποσκάματος το οποίο αυξάνει το κόστος της κατεργασίας αφού απαιτείται πρόσθετη κατεργασία για την αφαίρεσή του. Η επιλογή του δοκιμίου αυτού μπορεί να γίνει μόνο στη περίπτωση όπου τα ελάσματα δεν μπορούν να έρθουν σε καλή επαφή ώστε το υλικό που βρίσκεται στο υπόσκαμα να συμπληρώσει τα διάφορα κενά που δημιουργούνται. Έτσι λοιπόν καταλήγουμε σε επτά δοκίμια από τον αρχικό αριθμό των 43 δοκιμίων. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι και στα δύο βήματα δεν υπήρξε δοκίμιο όπου το σημείο εστίασης να είναι ένα χιλιοστό πάνω από την επιφάνεια. Συνεπώς το πρώτο βασικό συμπέρασμα είναι ότι για συγκολλήσεις δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σημείο εστίασης πάνω από την επιφάνεια. Μάλιστα, εστιάζοντας μέσα στην επιφάνεια επιτυγχάνουμε καλύτερα αποτελέσματα, όσο πιο βαθιά εστιάζουμε. Από τα επιλεγμένα δοκίμια τρία έχουν

σημείο εστίασης -1mm (B5,B8,B9) και άλλα τρία έχουν σημείο εστίασης -2mm (B28,B27,B24) ενώ επιλέξαμε μόνο ένα με σημείο εστίασης πάνω στην επιφάνεια. Για τα δοκίμια αυτά θα γίνει η μελέτη της μικροδομής για να σχηματιστεί πλήρη εικόνα. Στη συνέχεια δεν πρόκειται να απορριφθεί άλλο δοκίμιο αφού και τα επτά πληρούν τις κατάλληλες προ υποθέσεις.

4.5 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ B5-B8-B9-B18-B24-B27-

B28

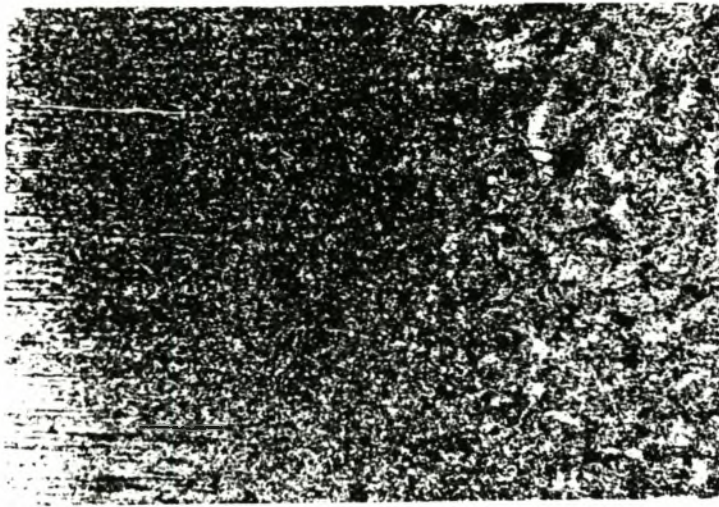
Σε όλα τα δοκίμια έγινε έλεγχος της μικροδομής και σε επόμενη παράγραφο θα αναφέρουμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση. Στη συγκεκριμένη παράγραφο αναλύονται οι μικροδομές των δοκιμίων που επιλέχθηκαν από τα προηγούμενα βήματα. Η ονοματολογία καθώς και η εξέταση των μικροδομών έγινε με βάση την θεωρία που αναπτύχθηκε στην ενότητα 1.

4.5.1 Δοκίμιο B5 (Q/60u=3,75)

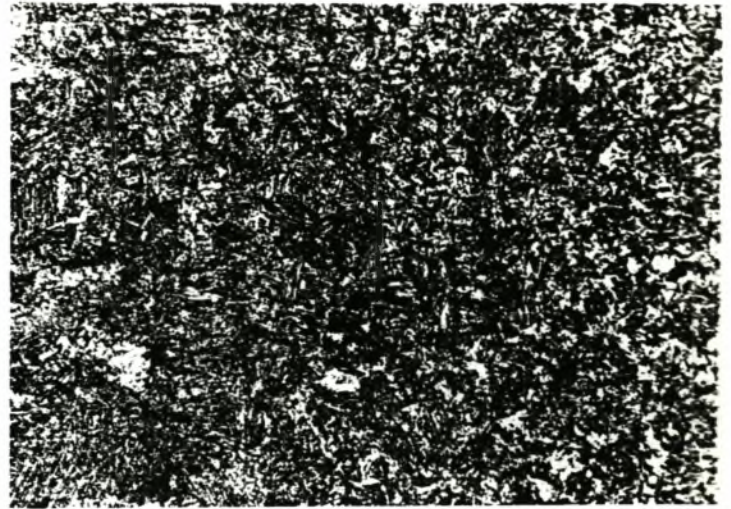
Στην εικόνα α) του σχήματος 4.18 παρατηρήθηκε η μετάβαση από το μέταλλο βάσης στη λίμνη συγκόλλησης. Η Θ.Ε.Ζ είναι η περιοχή εκείνη που έχει μαυρίσει περισσότερο. Καθώς προχωράμε συναντούμε μια δομή, περισσότερο λεπτόκοκκη όπου έχουμε την δημιουργία μαρτενσίτη, αλλά σε πολύ μικρό ποσοστό. Κατόπιν προχωρούμε μέσα στη λίμνη με την ανάπτυξη πιο χονδρόκοκκης δομής και την δημιουργία μπαινίτη και 'Widmastatten' φερρίτη. Ο φερρίτης 'Widmastatten' φαίνεται ξεκάθαρα στην εικόνα d) αφού ξεκινά από τα όρια των κόκκων και με την μορφή βελόνων προχωρά προς το εσωτερικό του. Στην εικόνα e) φαίνεται ο φερρίτης PF(G) (Grain boundary ferrite) ενώ στην εικόνα f) φαίνεται η δημιουργία του βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite) στην κατεύθυνση της ροής θερμότητας.

4.5.2 Δοκίμιο B8 (Q/60u=4,2)

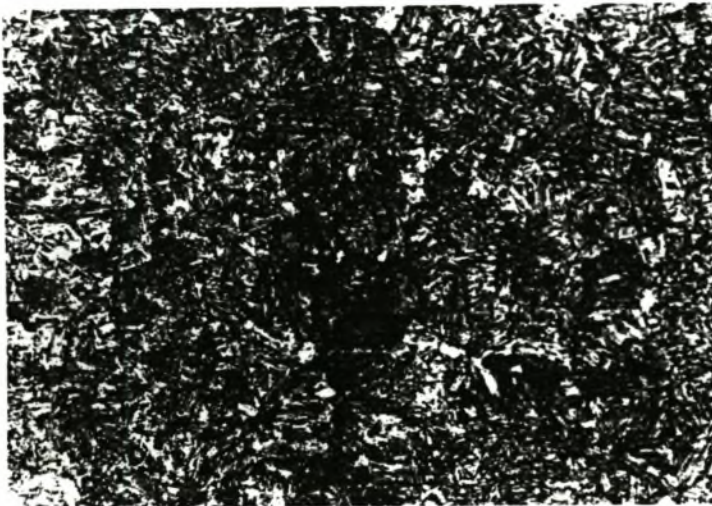
Στο δοκίμιο αυτό χαρακτηριστική είναι η δημιουργία λεπτόκοκκου μαρτενσίτη και του PF(G) φερρίτη. Μάλιστα όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.19 η Θ.Ε.Ζ αρχίζει να διακρίνεται από την λίμνη συγκόλλησης με πιο εύκολο τρόπο αφού η αλλαγή της δομής είναι πιο απότομη.



α. Μέταλλο βάσης Θ.Ε.Ζ Ζώνη τήξης (100X)



β. Όρια Θ.Ε.Ζ - Ζώνη τήξης (200X)



γ. Ζώνη τήξης (500X)



δ. (500X)

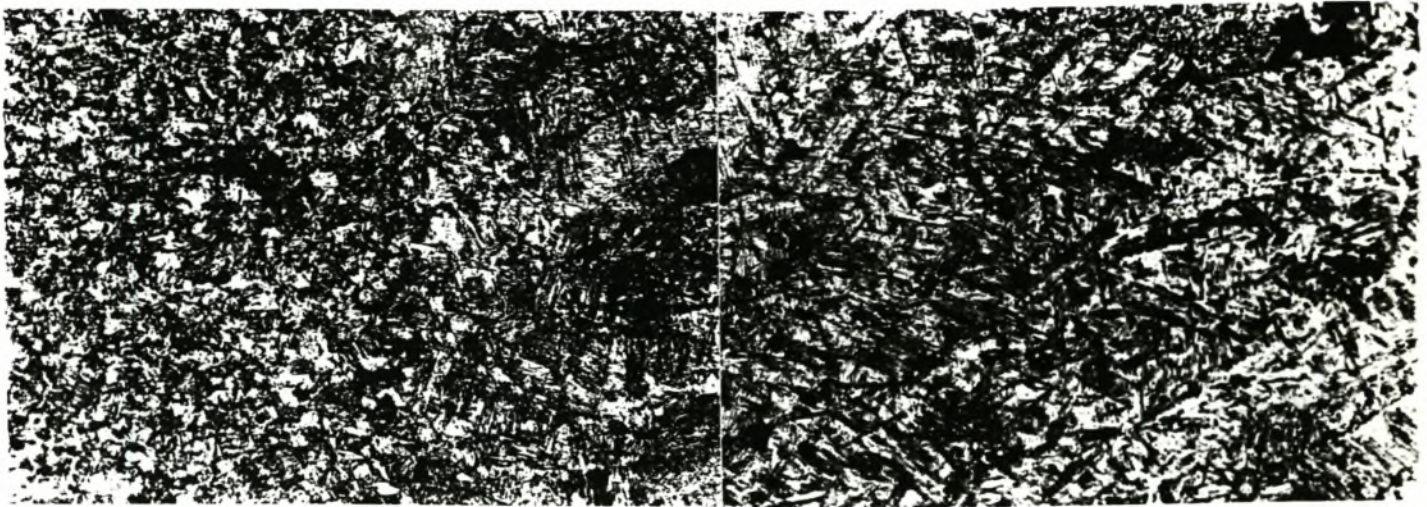


ε Λίμνη συγκόλλησης (500X)



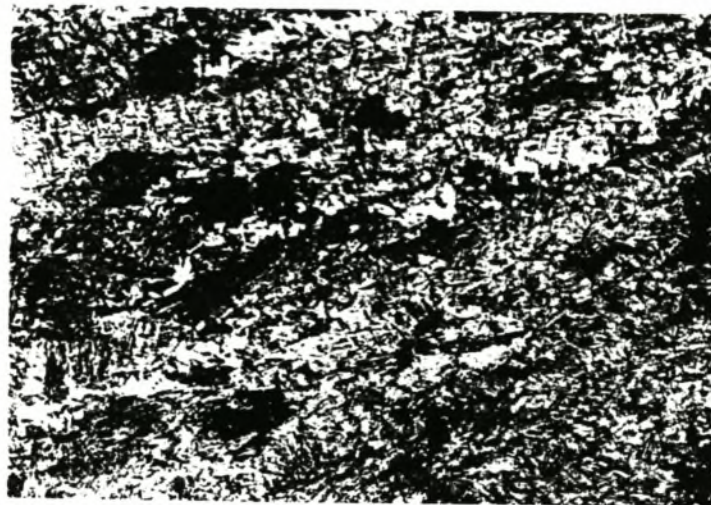
ς Λίμνη συγκόλλησης (500X)

Σχήμα 4.18 : Δοκίμιο **B5** - Μικροσκοπικός έλεγχος.



α. Όρια ζώνης τήξης - Λίμνης συγκόλλησης (100X)

β. Ζώνη τήξης (500X)



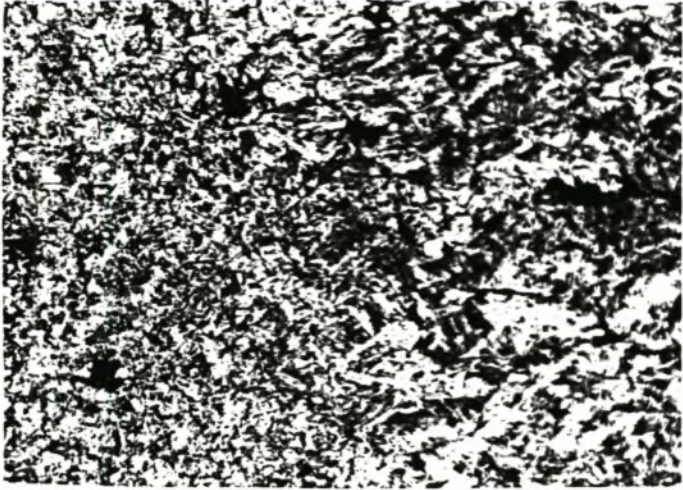
γ. Λίμνη συγκόλλησης (500X)

Σχήμα 4.19 : Δοκίμιο **B8** -Μικροσκοπικός έλεγχος

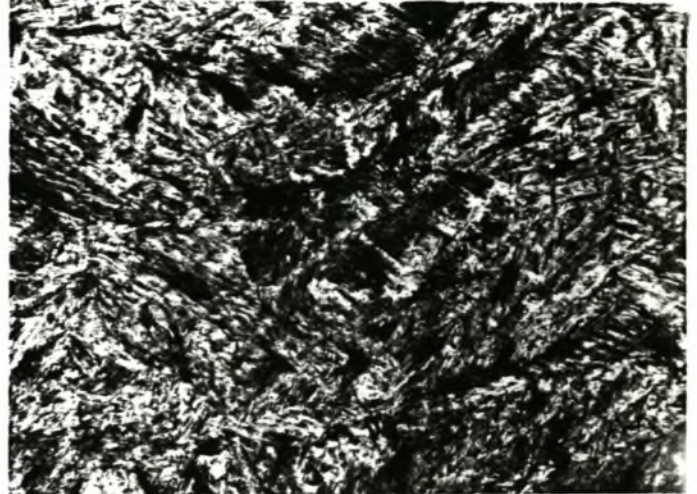
4.5.3 Δοκίμιο B9 (Q/60u=2,8)

Στο δοκίμιο B9 η δημιουργία του μαρτενσίτη είναι πιο έντονη και συγκρινόμενος με τον μαρτενσίτη του δοκιμίου B8, βλέπουμε ότι είναι πιο λεπτόκοκκος (συγκριτικά). Παράλληλα φαίνεται ότι υπάρχει μπαινίτης και ‘Widmastatten’ φερρίτης. Χαρακτηριστική είναι η μεταβολή της δομής καθώς μεταβαίνουμε στη λίμνη συγκόλλησης. Όσο αυξάνει η ταχύτητα τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα δημιουργίας μιας νοητής γραμμής μεταξύ της Θ.Ε.Ζ και της λίμνης συγκόλλησης (δηλαδή γίνεται πιο απότομη η αλλαγή της δομής). Με τον

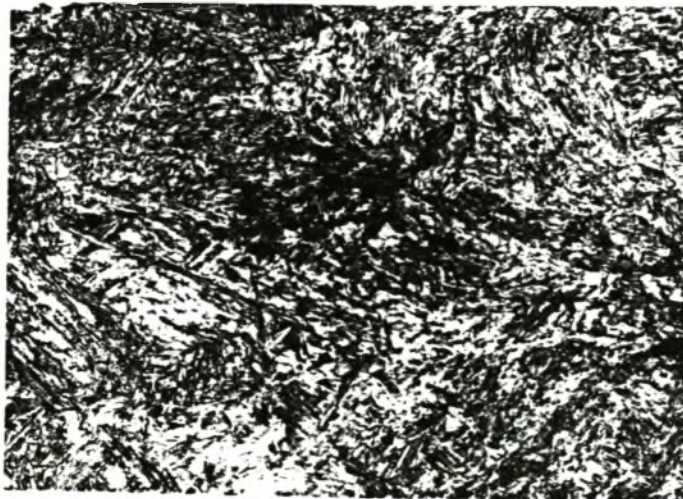
τρόπο αυτό έχουμε αύξηση του ποσοστού του μαρτενσίτη ο οποίος δεν είναι ανεπιθύμητος επειδή είναι σχετικά λεπτόκοκκος



α. Όρια Θ.Ε.Ζ - Λίμνης συγκόλλησης (200X)



β. Ζώνη τήξης (500X)



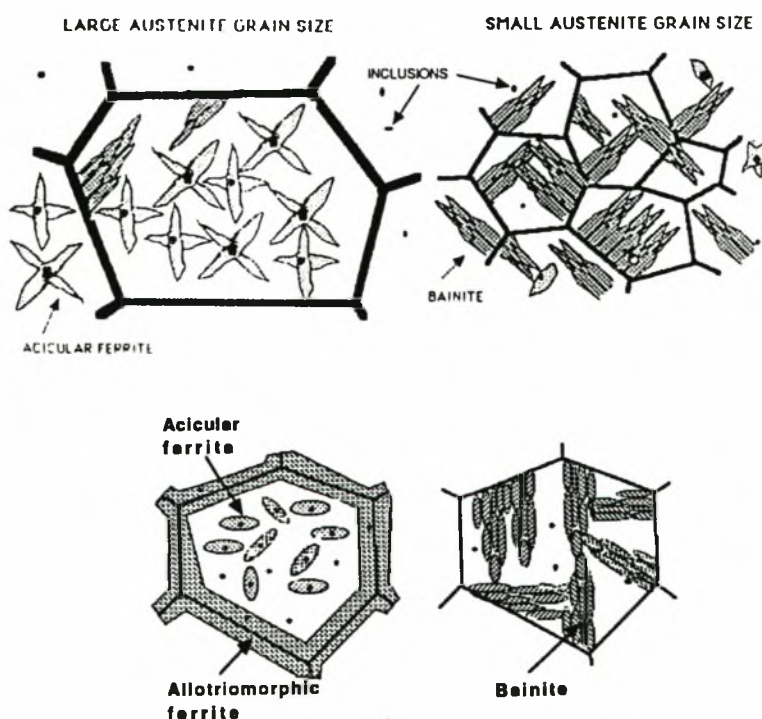
γ. Λίμνη συγκόλλησης (500X)

Σχήμα 4.20 : Δοκίμιο **B9** - Έλεγχος της μικροδομής

4.5.4 Δοκίμιο B18 (O/60u=4,2)

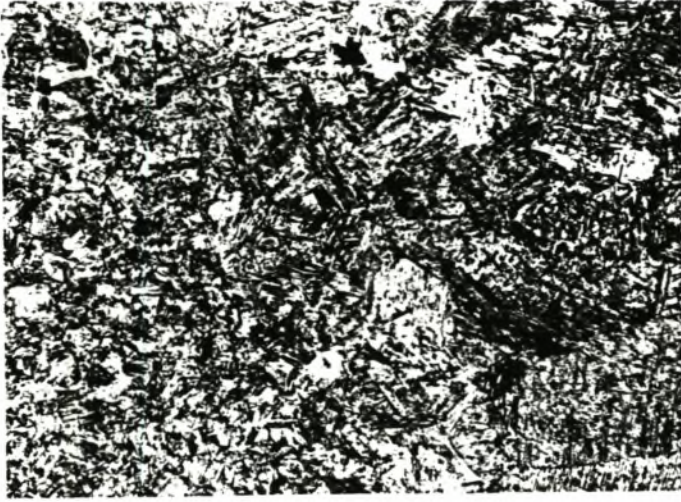
Η δημιουργία του 'Widmastatten' -φερρίτη μέσα στη λίμνη συγκόλλησης είναι έντονη ενώ χαρακτηριστική είναι η κατεύθυνση δημιουργίας του 'Widmastatten' φερρίτη. Η

δημιουργία των βελόνων (άσπρες γραμμές) ξεκινά από τα όρια των κόκκων, κάθετα σε αυτά. Τα όρια των κόκκων από όπου ξεκινά ο 'Widmastatten' φερρίτης συμπίπτουν με την κατεύθυνση της ροής θερμότητας. Μάλιστα στο συγκεκριμένο δοκίμιο απεικονίζεται η βηματική αλλαγή της δομής και πως δημιουργούνται οι διάφορες φάσεις. Κατά την στερεοποίηση η δομή των κόκκων, σύμφωνα με το διάγραμμα σιδήρου - άνθρακα, αρχικά είναι ωστενιτική. Κατόπιν από τα όρια των κόκκων ξεκινούν οι γραμμές του 'Widmastatten' φερρίτη, οι οποίες κάποια στιγμή σταματούν ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης. Στο εσωτερικό του κόκκου έχουμε την δημιουργία του βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite) και του 'primary ferrite'. Η δομή στο εσωτερικό του κόκκου είναι εξάρτηση πολλών παραμέτρων, αλλά στο συγκεκριμένο δοκίμιο στο εσωτερικό του κόκκου έχουμε την δημιουργία ακόμα και περλίτη (στο εσωτερικό του κόκκου ο ρυθμός ψύξης είναι χαμηλός). Στο σχήμα 4.21 γίνεται μια απεικόνιση της δημιουργίας των διαφόρων φάσεων στο συγκεκριμένο δοκίμιο, η οποία ισχύει για κάθε δοκίμιο που έχει σημείο εστίασης μέσα στο υλικό

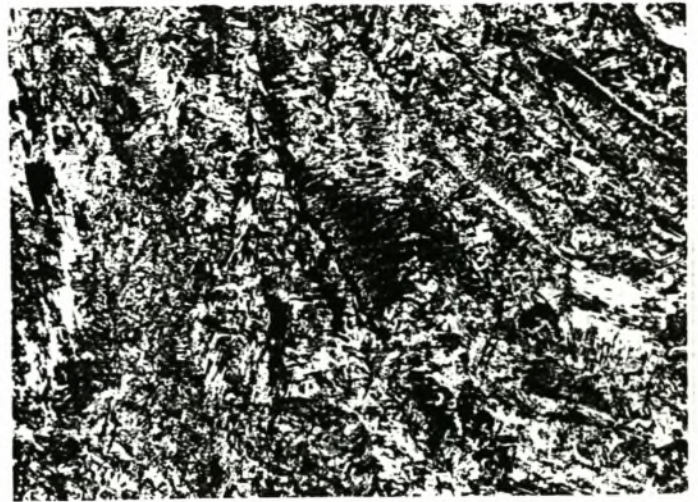


Σχήμα 4.21 : Δημιουργία των διαφόρων φάσεων μέσα στο εσωτερικό ενός κόκκου

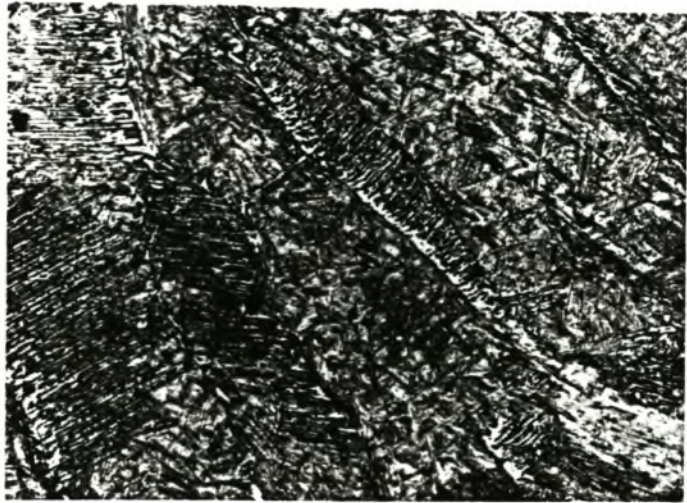
a.



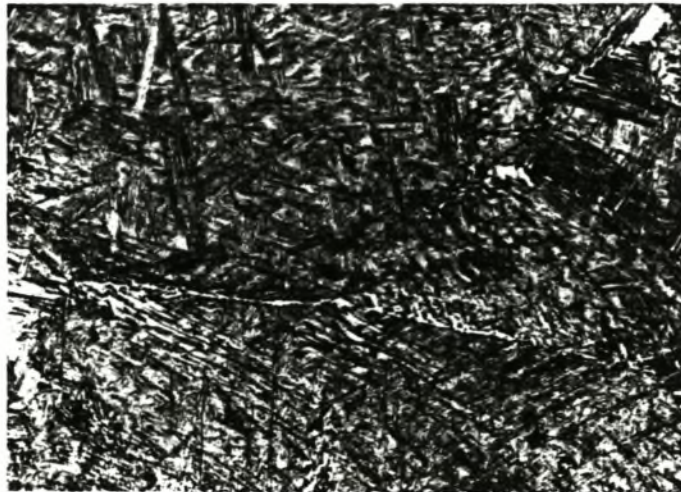
b.



c.



d.

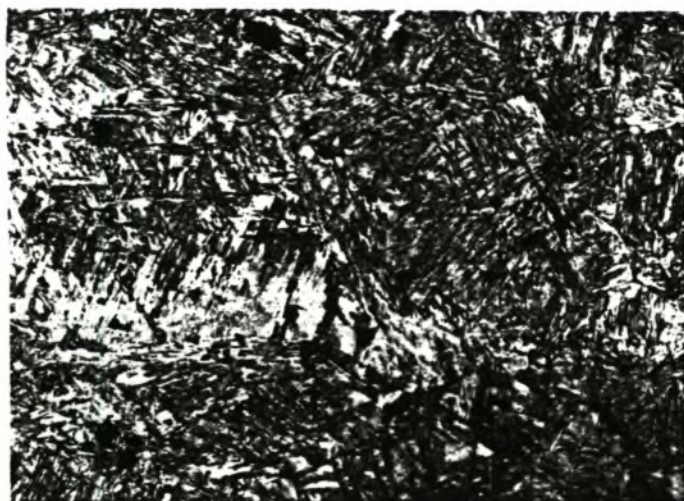


Σχήμα 4.22 : Δοκίμιο **B18** - a)Μετάβαση από την Θ.Ε.Ζ στη λίμνη συγκόλλησης b)-c)-d)

Λίμνη συγκόλλησης

4.5.5 Δοκίμιο B24 (O/60u=3,75)

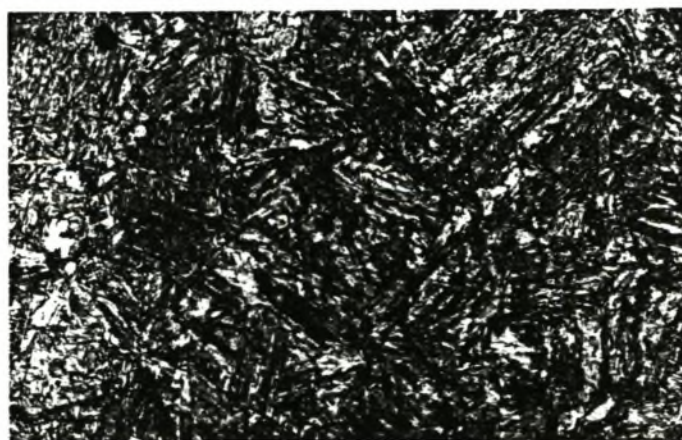
Τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με αυτά του δοκιμίου B18, μόνο που η δημιουργία του 'Widmastatten' φερρίτη δεν έχει ολοκληρωθεί σε μεγάλο βαθμό και οι νοητές γραμμές της ροής θερμότητας αποτελούνται από φερρίτη PF(G) και PF(I). Η μη ολοκλήρωση της βελονοειδούς μορφής του 'Widmastatten' φερρίτη οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος Q/60u στο δοκίμιο B18 είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο λόγο του δοκιμίου B24, με άμεση συνέπεια την μείωση του ρυθμού ψύξης και την δυνατότητα ολοκλήρωσης του μετασχηματισμού.



α Λίμνη συγκόλλησης (500X)



β Λίμνη συγκόλλησης (500X)

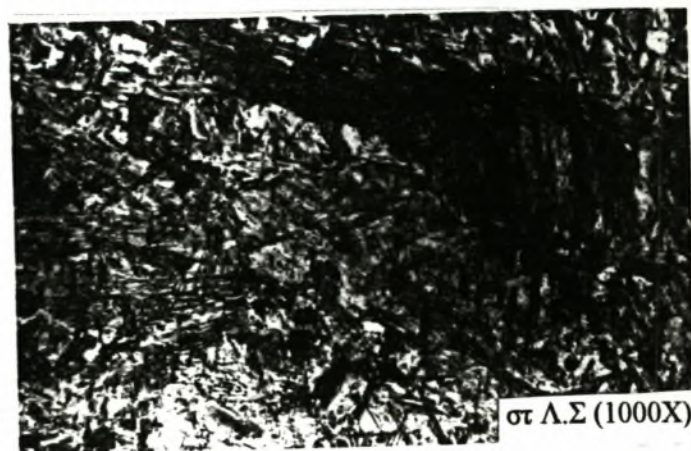
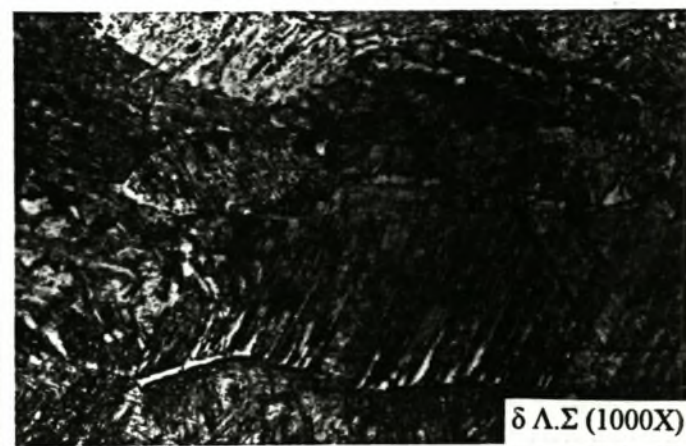
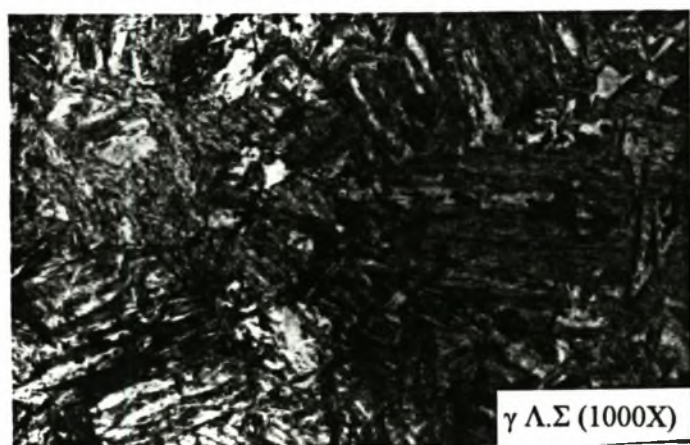


γ Ζώνη τήξης (500X)

Σχήμα 4.23 : Δοκίμιο B24 - Έλεγχος μικροδομής

4.5.6 Δοκίμιο B27 ($O/60u=4,2$)

Στο δοκίμιο B27 είναι εμφανής η δημιουργία 'Widmastatten' φερρίτη ενώ η δομή είναι πιο λεπτόκοκκη και στο εσωτερικό του κόκκου έχουμε την δημιουργία του βελονοειδή φερρίτη (acicular ferrite) αλλά και μεγάλου ποσοστού PF ('primary ferrite'), εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού ψύξης. Επίσης δημιουργείται μπαινίτης και ένα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη.



Σχήμα 4.24 : Μικροδομή του δοκιμίου B27

4.5.7 Δοκίμιο B28 (Q/60u=2,8)

Στο δοκίμιο αυτό η δημιουργία του μαρτενσίτη είναι εντονότατη, ενώ το ποσοστό του 'Widmastatten' φερρίτη μειώνεται δραματικά. Με την μείωση του ποσοστού του 'Widmastatten' φερρίτη έχουμε αύξηση του ποσοστού μπαινίτη.



α. Ζώνη τήξης (500X)



β. Λίμνη συγκόλλησης (500X)



γ. Λ.Σ (500X)



δ. Λ.Σ (1000X)



ε. Λ.Σ (1000X)

Σχήμα 4.25 : Μικροδομή του δοκίμιου B28

4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται όσα παρατηρήθηκαν κατά την μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων B4-B5-B8-B9-B14-B17-B18-B24-B27-B28, καθώς και των δοκιμίων της 1^{ης} σειράς -όπου το σημείο εστίασης ήταν +1mm πάνω από την επιφάνεια-. Μάλιστα τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται με τους διαφόρους παράγοντες της συγκόλλησης laser οι οποίοι επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την εξέλιξη της δομής.

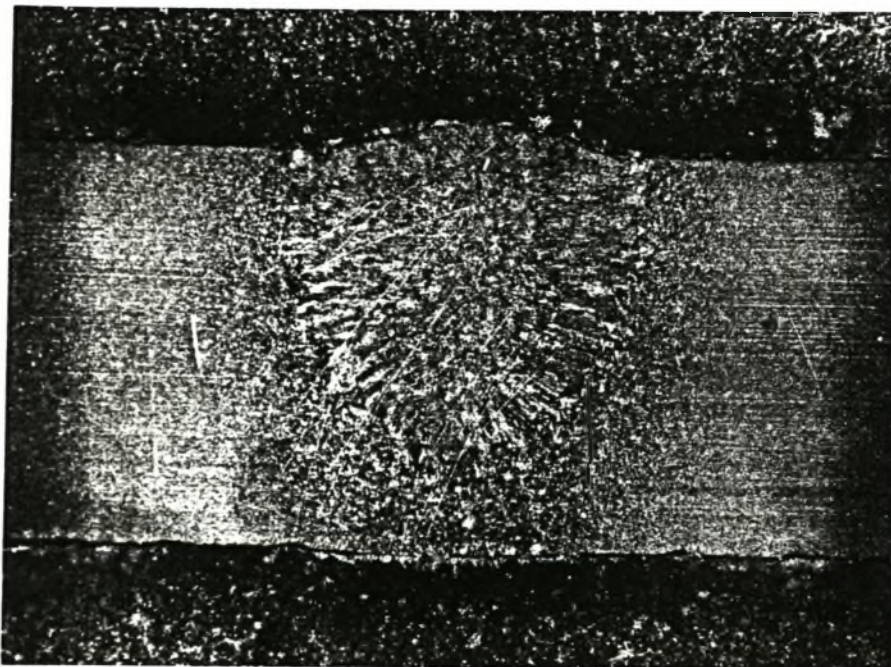
4.6.1 ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ Α (ΣΗΜΕΙΟ ΕΣΤΙΑΣΗΣ= +1mm)

Το πρώτο φαινόμενο που παρατηρούμε είναι στο δοκίμιο A4, όπου εξαιτίας του σημείου εστίασης η ζώνη τήξης δεν έχει τριγωνικό σχήμα, αλλά τετραγωνικό (σχήμα 4.26). Μάλιστα η λίμνη συγκόλλησης είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με όλες τις δημιουργούμενες λίμνες. Το ίδιο συμβαίνει και με την ζώνη τήξης αλλά και με την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.

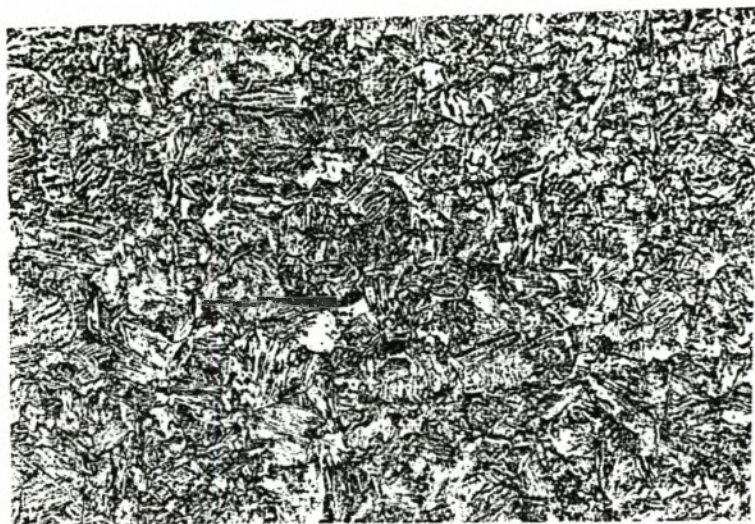


Σχήμα 4.26 : Δοκίμιο A4 (σημείο εστίασης = +1mm)

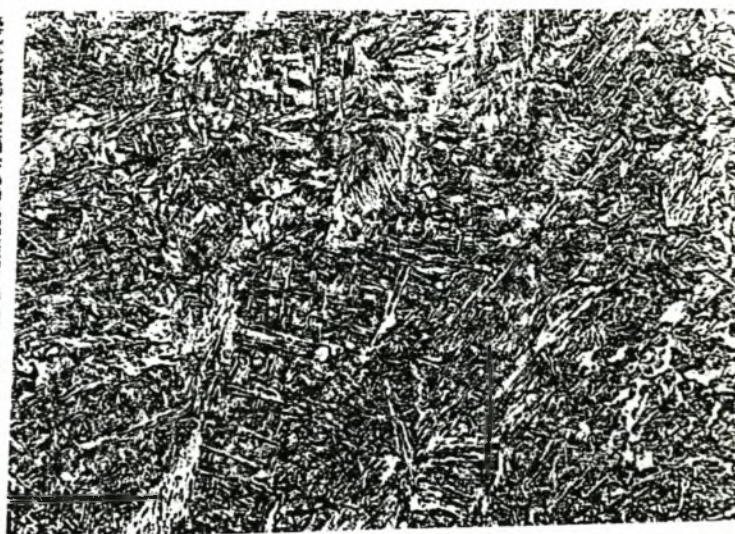
Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται το δοκίμιο A9 της Α σειράς πειραμάτων, που είχε την μεγαλύτερη διείσδυση. Παρατηρούμε ότι στα δοκίμια με σημείο εστίασης πάνω από την επιφάνεια δεν υπάρχει η δυνατότητα πλήρους διείσδυσης και κατά την στερεοποίηση της λίμνης συγκόλλησης δεν έχουμε την δημιουργία του 'drop-out', του 'undercut', του εξογκώματος και των 'αυλακιών'. Η ζώνη τήξης και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη στα δοκίμια της σειράς Α είναι μεγάλες με αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλου ποσοστού μαρτενσίτη αλλά και μπαινίτη. Εκτός αυτών έχουμε και την δημιουργία του 'Widmstätten' φερρίτη μέσα στη λίμνη συγκόλλησης. Όλες οι παραπάνω δομές απεικονίζονται στο σχήμα 4.28. Κατόπιν στο σχήμα 4.29 φαίνεται η δημιουργία ενός τεράστιου πόρου στο κέντρο της λίμνης συγκόλλησης, εξαιτίας της διακοπής της παροχής του προστατευτικού αερίου. Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα που έχουμε εάν χρησιμοποιήσουμε ως προστατευτικό αέριο N₂. Το άζωτο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην κοπή.



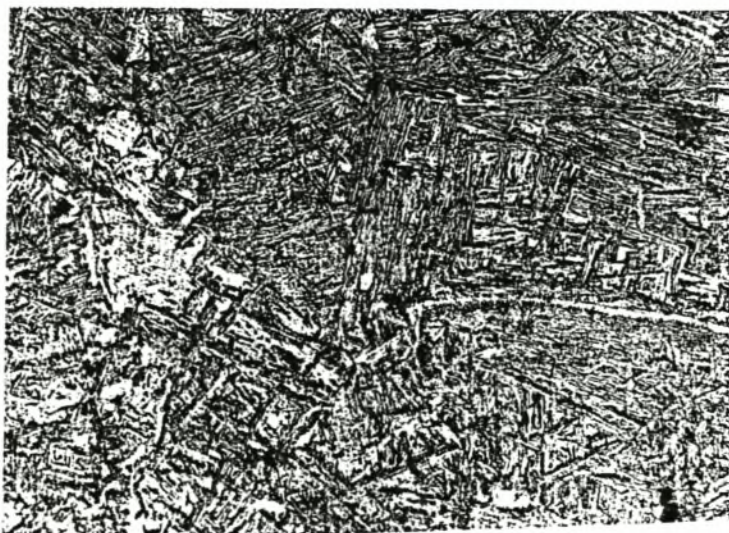
Σχήμα 4.27 : Δοκίμιο A9 - Μεγαλύτερη δυνατή διείσδυση με σημείο εστίασης + 1mm.



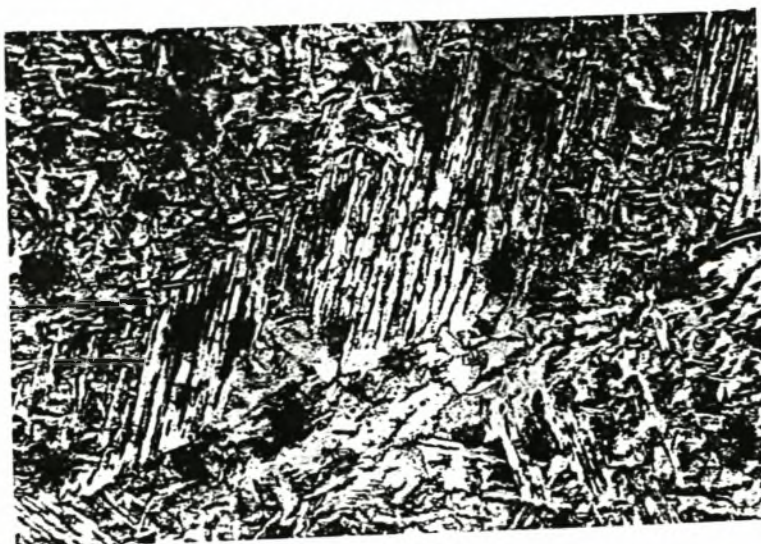
α. Όρια Θ.Ε.Ζ - Ζώνη τήξης (500X)



β. Λίμνη συγκόλλησης (500X)

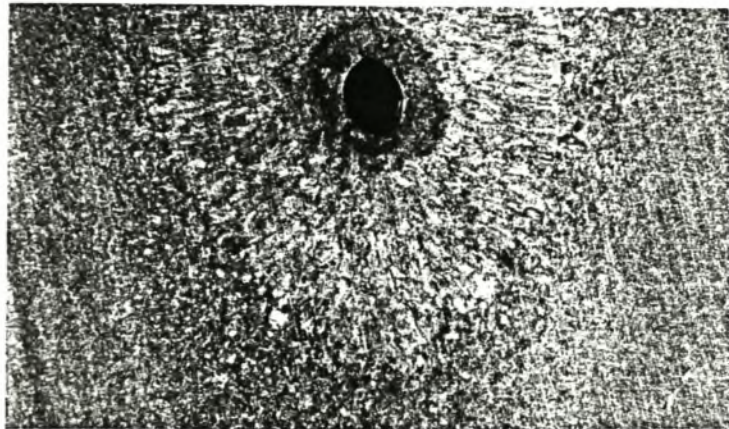
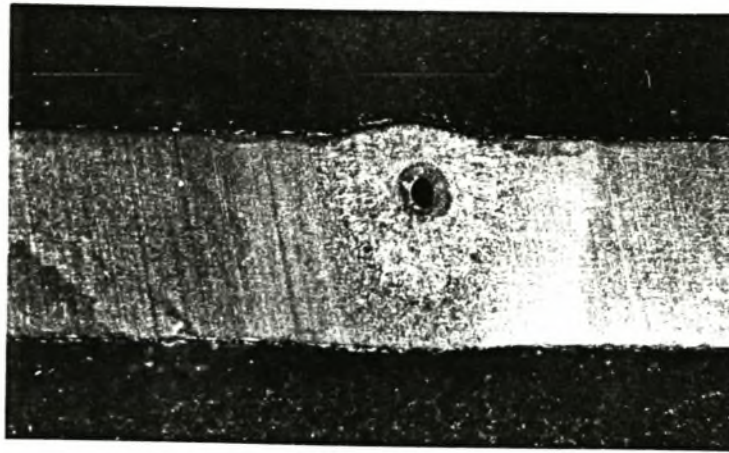


γ. Λ.Σ (500X)

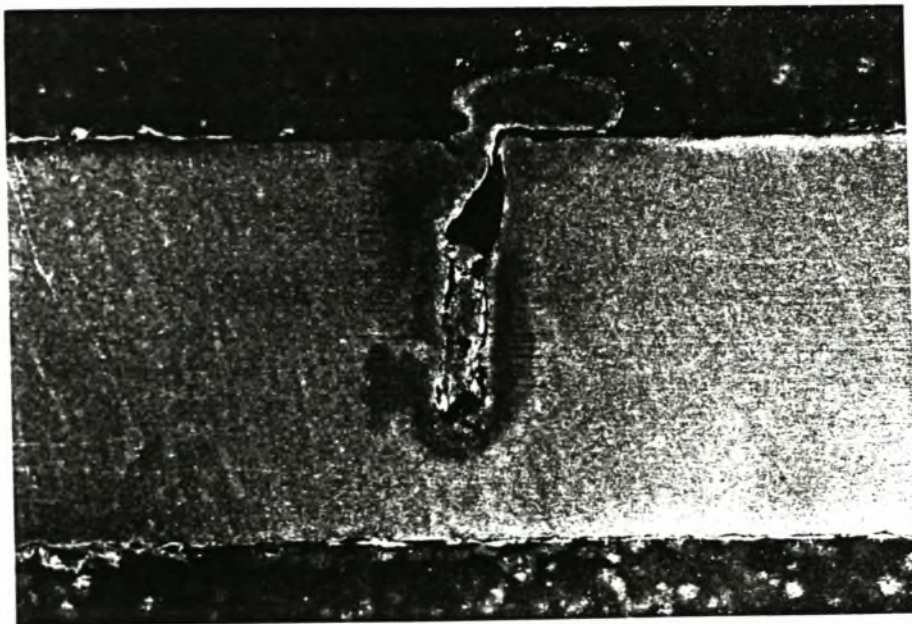


δ. Λ.Σ (1000X)

Σχήμα 4.28 : Δημιουργούμενη μικροδομή στα δοκίμια με σημείο εστίασης +1mm.



Σχήμα 4.29 : Δοκίμιο A8 - Μη χρησιμοποίηση προστατευτικού αερίου



Σχήμα 4.30 : Δοκίμιο A11 - Χρησιμοποίηση αζώτου ως προστατευτικό αέριο

4.6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΟΥΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER.

Κατά την διάρκεια της συγκόλλησης laser μπορούμε να παρατηρήσουμε την δημιουργία διαφόρων φαινομένων τα οποία στηρίζονται στην μεταβολή της δομής. Όλα τα φαινόμενα που παρατηρούνται εξαρτώνται από τον ρυθμό ψύξης και κατ' επέκταση από τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας (Q/u).

Αρχικά θα αναφερθούν όσα φαινόμενα αλλαγής της δομής λαμβάνουν χώρα και στη συνέχεια θα γίνει μια προσπάθεια συσχέτισης των φαινομένων αυτών με τους παράγοντες που επηρεάζουν την συγκόλληση laser.

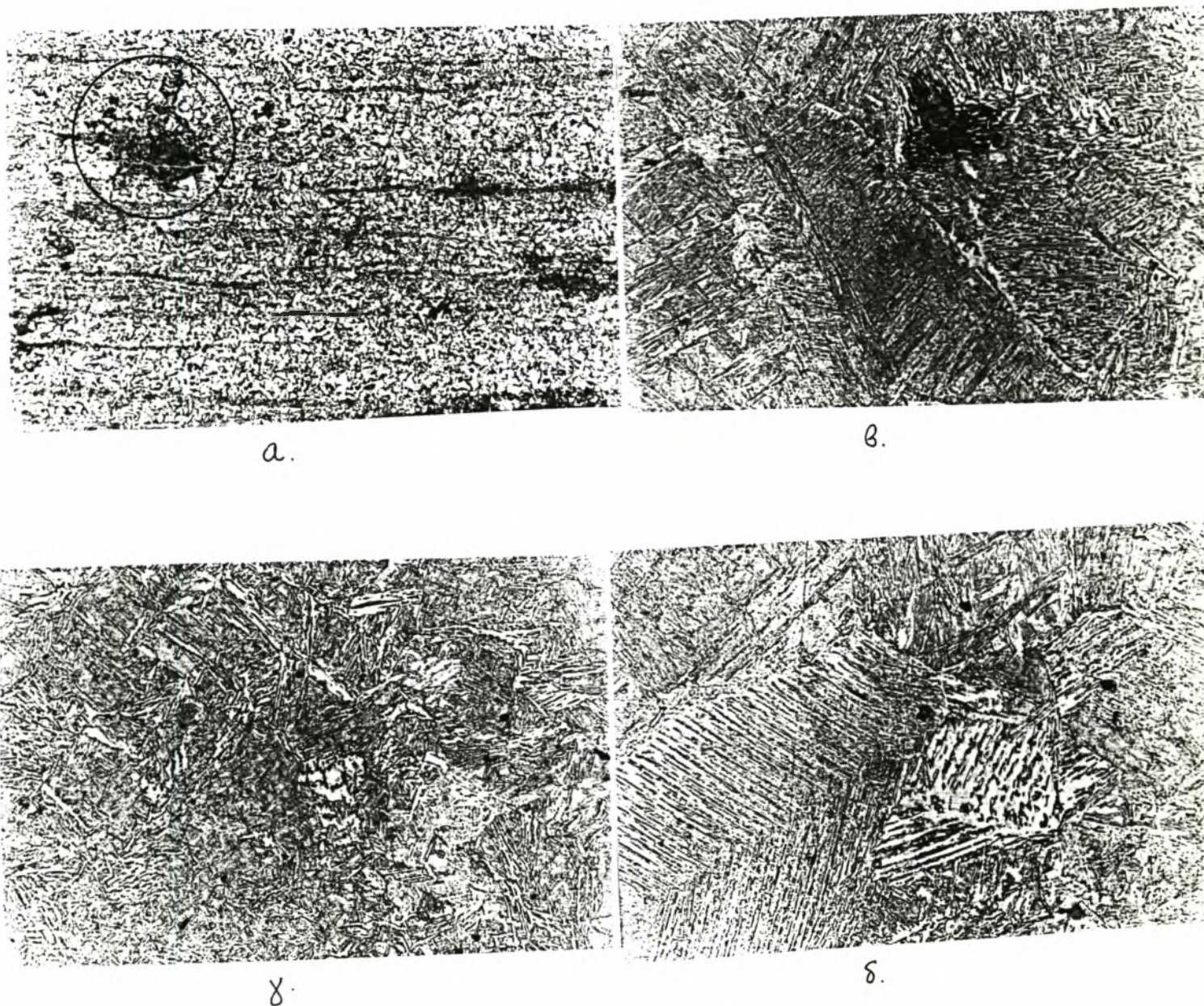
Στο σχήμα 4.31 α) παρατηρούμε ότι στο υλικό συμβαίνει ανακρυστάλλωση, τοπικά στα όρια της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και του μετάλλου βάσης. Ανακρυστάλλωση είναι η πυρήνωση νέων, χωρίς παραμόρφωση, κόκκων σ' ένα παραμορφωμένο (αρχικά) κρυσταλλικό υλικό. Στο σχήμα 4.31 α) αυτό που φαίνεται είναι μια τοπική 'διάλυση' των παράλληλων γραμμών του περλίτη (που είχε παραμορφωθεί κατά την έλαση του υλικού) και την δημιουργία των ανακρυσταλλομένων περιοχών.

Στο σχήμα 4.31 β) βλέπουμε ότι έχουμε την δημιουργία περλίτη, ενώ στη γύρω περιοχή υπάρχει και μπαινίτης. Τέλος στα σχήματα 4.31 γ)-δ) φαίνεται ένα σύμπλεγμα δομών όπου η εμφάνιση του βελονοειδή φερρίτη και του 'Widmstätten' φερρίτη είναι έντονη. Όλα τα παραπάνω φαινόμενα λαμβάνουν χώρα στο δοκίμιο B4 όπου ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι ιδιαίτερα υψηλός ($Q/u=7,5$).

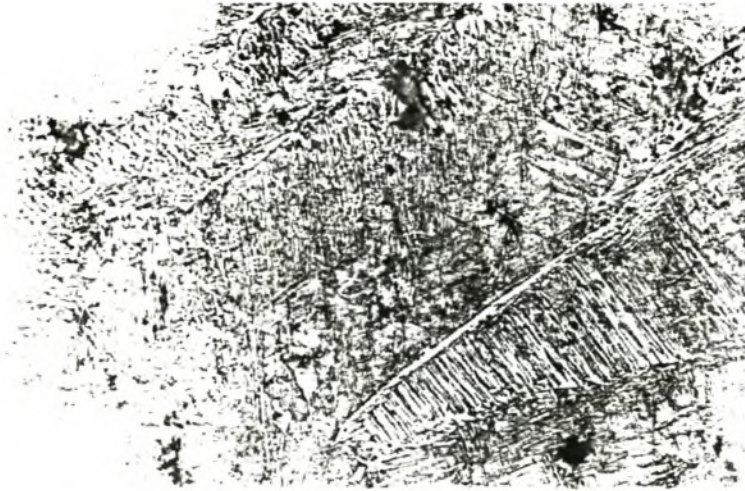
Κατόπιν στο σχήμα 4.32 απεικονίζεται μια χαρακτηριστική περιοχή της δομής των δοκιμίων B14 και B17 όπου ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι ιδιαίτερα υψηλός. Στο σχήμα 4.32 α) έχουμε την δημιουργία του 'Widmstätten' φερρίτη (δοκίμιο B14) ενώ στα σχήματα β)-γ) απεικονίζεται η έντονη δημιουργία περλίτη, του PF (primary ferrite) και του PF(G) (δες ενότητα 1).

Από την παραπάνω μελέτη στα δοκίμια που απορρίφθηκαν στο 2^ο βήμα (B14-B17-B4) φαίνεται ότι εξαιτίας του υψηλού λόγου Q/u έχουμε χαμηλούς ρυθμούς ψύξης με αποτέλεσμα στο εσωτερικό της λίμνης συγκόλλησης να δημιουργείται περλίτης (σύμφωνα με το διάγραμμα Fe-C), αλλά και όλων των ειδών οι φάσεις, που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2. Μόνο που το ποσοστό του μπαινίτη και του μαρτενσίτη περιορίζεται έντονα. Με την ανακρυστάλλωση αλλά και εξαιτίας του χαμηλού ρυθμού ψύξης η σκληρότητα της λίμνης συγκόλλησης, αλλά και της Θ.Ε.Ζ είναι χαμηλή, ενώ έχουμε και την δημιουργία των

λεγόμενων 'αυτιών' δηλαδή περιοχών με 100% μαρτενσιτική δομή. Βέβαια οι περιοχές αυτές περιορίζονται αισθητά.



Σχήμα 4.31 : Δοκίμιο B4 α) Ανακρυστάλλωση της Θ.Ε.Ζ β)-γ) Λίμνη συγκόλλησης (500X)



B4



B14



B17

Σχήμα 4.32 : Χαρακτηριστικές δομές των δοκιμίων B4-B14-B17 (500X)

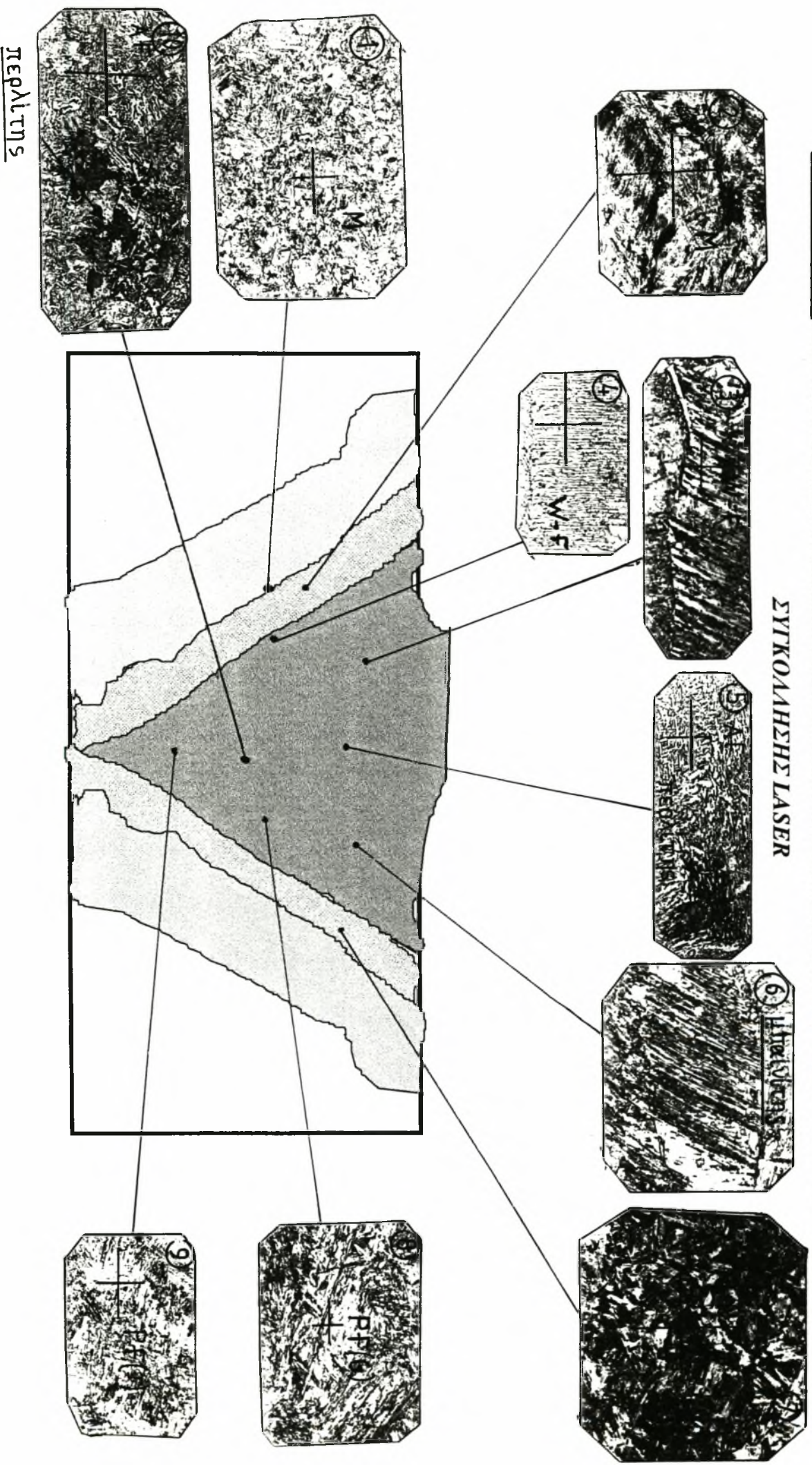
4.6.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER

Στο σχήμα 4.33 έγινε μια προσπάθεια χαρτογράφησης της μικροδομής που εμφανίζεται στις διάφορες περιοχές συγκόλλησης. Βέβαια η εξάρτηση της δομής από τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας είναι σημαντική αλλά και πάλι οι δομές που απεικονίζονται στο σχήμα 4.33 θα εμφανιστούν ανεξάρτητα από τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας. Ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας επηρεάζει την δομή ποσοτικά και όχι ποιοτικά. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος $Q/60u$ τόσο μειώνεται το ποσοστό του δημιουργούμενου μαρτενσίτη και μπαινίτη. Μαρτενσίτης δημιουργείται κατά βάση στη ζώνη τήξης της οποίας το μέγεθος ελαττώνεται με μείωση του λόγου $Q/60u$. Παρακάτω περιγράφονται οι δομές που απεικονίζονται στο σχήμα 4.33

- 1. Λεπτόκοκκος μαρτενσίτης στα όρια της ζώνης τήξης και της Θ.Ε.Ζ
- 2. Δημιουργία μαρτενσίτη μέσα στη ζώνη τήξης
- 3.- 4. Δημιουργία του Widmstätten - φερρίτη στα όρια της ζώνης τήξης και της λίμνης συγκόλλησης καθώς και μέσα σ' αυτήν.
- 5. Βρισκόμαστε στο εσωτερικό ενός κόκκου όπου έχουμε την δημιουργία του περλίτη και του βελονοειδή φερρίτη.
- 6. Μπαινιτική δομή
- 7. Μαρτενσιτική δομή και πάλι στη ζώνη τήξης μόνο που ο λόγος $Q/60u$ είναι μικρότερος σε σχέση με την εικόνα 1.-2.
- 8.-9.-10. Δημιουργία των διαφόρων ειδών φερρίτη στο εσωτερικό ενός κόκκου με υψηλό λόγο $Q/60u$.

ΣΧΗΜΑ 4.33 : ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΣΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

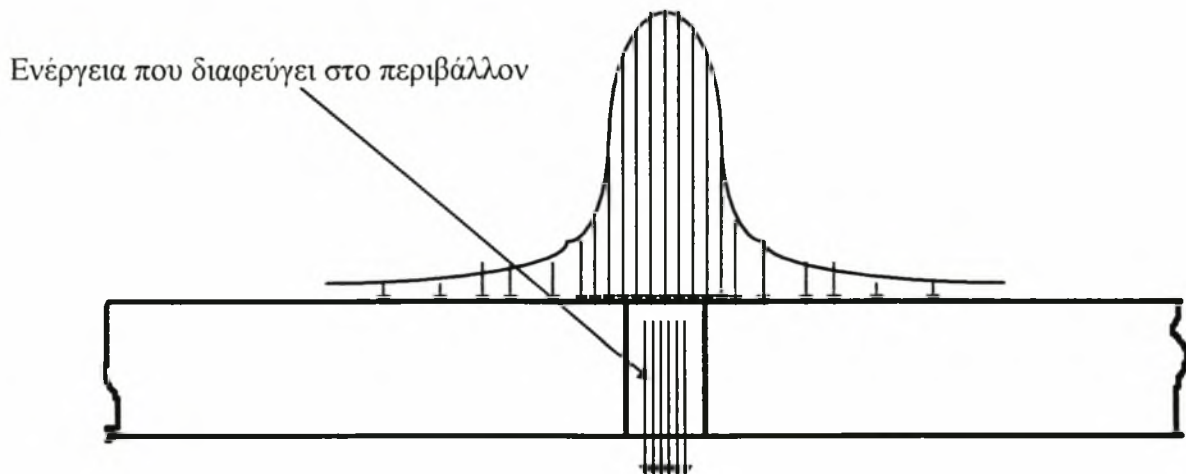
ΣΥΓΚΟΛΙΣΗΣ LASER



4.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ LASER ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΥΟ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΜΕΝΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Εκτός από την μελέτη για την εκλογή των διαφόρων συνθηκών, θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνει μια προσπάθεια εφαρμογής όλων των θεωρητικών φαινομένων και των αποτελεσμάτων που παρείχθηκαν από την συνολική μελέτη για την τεχνική συγκόλλησης με laser. Η προσπάθεια συγκόλλησης δύο ελασμάτων απέτυχε για πολλούς λόγους τους οποίους θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε στη συνέχεια. Βέβαια αυτό δε σημαίνει ότι είναι αδύνατο να γίνει η συγκόλληση, αλλά χρειάζεται επιπλέον μελέτη και προσπάθεια ώστε να πραγματοποιηθεί μια συγκόλληση laser. Στην παρούσα ενότητα θα δοθούν όλες οι πιθανές αιτίες που οδήγησαν στη μη πραγματοποίηση της ένωσης δύο ελασμάτων.

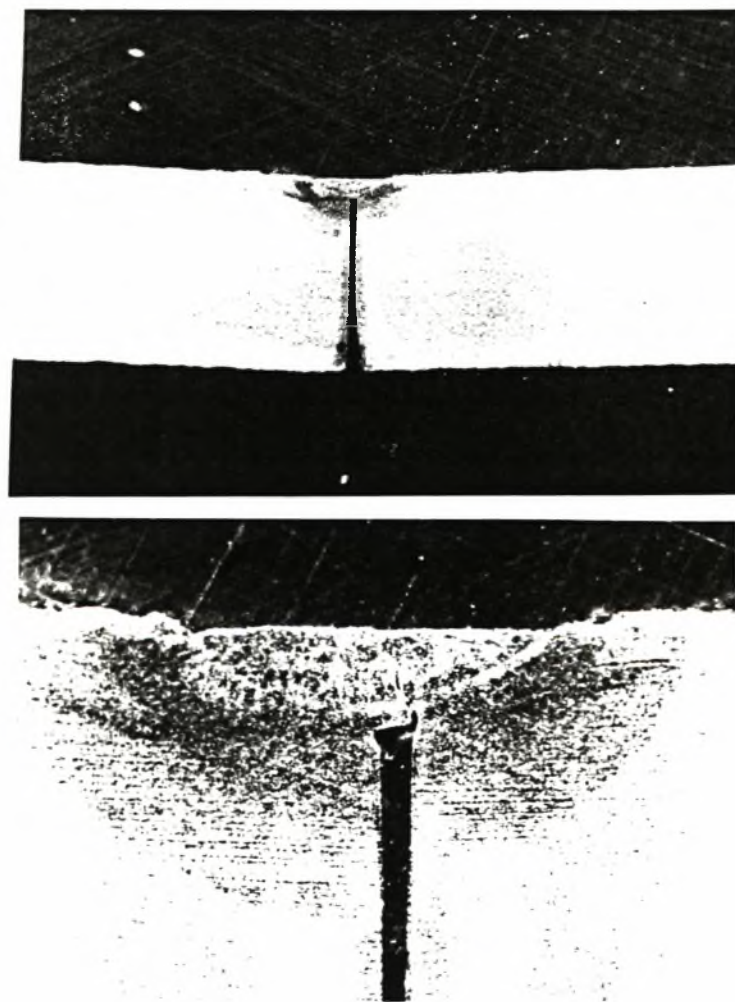
Η βασική αιτία της μη πραγματοποίησης πλήρους διείσδυσης έγκειται στο εξής γεγονός: Κατά την ένωση των δύο ελασμάτων δεν έχουμε πλήρη επαφή με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα μεγάλο κενό ενδιάμεσα στα δύο ελάσματα. Αριθμητικά το κενό αυτό ίσως να είναι αμελητέο, ωστόσο αν κανείς λάβει υπόψη του το μέγεθος της δέσμης και κάνει μια σύγκριση τότε το κενό γίνεται αυτομάτως τεράστιο. Στο σχήμα 4.33 απεικονίζεται το πρόβλημα.



Σχήμα 4.34 : Σχηματική παράσταση της διαφυγής μιας μεγάλης ποσότητας της προσπίπτουσας ενέργειας στο περιβάλλον

Εξαιτίας του κενού που δημιουργείται ένα σημαντικό μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας διαφεύγει στο περιβάλλον. Μάλιστα επειδή η κατανομή της προσπίπτουσας ενέργειας είναι 'Gaussian', το μεγαλύτερο μέρος της πρέπει -σύμφωνα με την ευθυγράμμιση- να πέφτει

ακριβώς πάνω από την ‘διαχωριστική’ γραμμή ένωσης των δύο ελασμάτων. Έτσι αν υπάρχει κενό (ατμοσφαιρικός αέρας) ενδιάμεσα, χάνεται το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας και η πυκνότητα ενέργειας ελαττώνεται σημαντικά. Ακόμα και η τεχνική που περιγράφηκε στην ενότητα 2 δεν είναι ικανή να μειώσει το κενό που δημιουργείται. Βέβαια με την τεχνική αυτή μειώνεται σε μεγάλο βαθμό το κενό, αλλά το μέγεθος της δέσμης είναι της τάξης του ενός χιλιοστού (δες ενότητα 2). Η πολύ μικρή δέσμη σε συνάρτηση με την ύπαρξη του κενού (το οποίο είναι δύσκολο να αποφευχθεί) επιφέρει το πρόβλημα. Το πρόβλημα επιβαρύνεται από την εστίαση της δέσμης, που σύμφωνα με προηγούμενη παράγραφο, το σημείο εστίασης θα είναι μέσα στο υλικό. Έτσι όλο και περισσότερη ενέργεια χάνεται, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν ακόμα και οι συνθήκες των δοκιμών B7 (drop-out) και B4 (undercut) και η διεύθυνση που επιτεύχθηκε να είναι της τάξης του ενός χιλιοστού. Στο σχήμα 4.34 παρουσιάζεται η τομή ενός εκ των ραφών που επιχειρήθηκε να πραγματοποιηθούν.



Σχήμα 4.35 : Εφαρμογή συνθηκών όμοιων με αυτές του δοκιμίου B4, για την συγκόλληση δύο διαφορετικών ελασμάτων.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER

5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή θα γίνει η παραμετρική ανάλυση ώστε να υπάρξει πλήρη εικόνα για την συγκόλληση του χάλυβα D36 με την τεχνική laser. Οι παράμετροι που επηρεάζουν και επηρεάζονται από την συγκόλληση laser είναι:

1. Η ισχύς της δέσμης Q [=] Watts
2. Η ταχύτητα της δέσμης u [=] mm/min
3. Το σημείο εστίασης της δέσμης F.P.
4. Η διείδυση της λίμνης συγκόλλησης ως προς το πάχος του υλικού [=] mm
5. Το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης [=] mm
6. Το μέγεθος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (πλάτος) [=] mm

Στον πίνακα 6.1 δίδονται τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τις παραπάνω παραμέτρους. Η μέτρηση έγινε στο εργαστήριο υλικών με την βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4 ο λόγος Q/u εκφράζει την ενέργεια που προσδόθηκε στο κομμάτι προς τα χλιοστά που συγκολλήθηκαν. Ο λόγος αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός αφού μπορεί να εκφράσει την επιρροή δύο παραμέτρων συγχρόνως. Μάλιστα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια αποτελέσματα αρκεί να αναφέρονται στον ίδιο χάλυβα. Για παράδειγμα όταν ο λόγος Q/u πάρει μία συγκεκριμένη τιμή τότε έχουμε πλήρη διείδυση για το έλασμα των 4mm. Εάν χρειαστεί να κολληθεί ένα έλασμα από το ίδιο υλικό αλλά με μεγαλύτερο πάχος τότε θα πρέπει η επιλογή παραμέτρων Q και u να είναι τέτοια ώστε ο λόγος τους να είναι ίσος με αυτόν όπου έχουμε πλήρη διείδυση (στο έλασμα των 4mm). Εξάλλου πρόκειται για μια σημαντική μεταβλητή στην συγκόλληση τήξης, από την οποία εξαρτιούνται οι ρυθμοί ψύξης και θέρμανσης καθώς και το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης. Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος αυτός τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός ψύξης και τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της λίμνης της συγκόλλησης. Επίσης από τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας (Q/u) εξαρτώνται και το μέγεθος των κόκκων στην θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Παρακάτω δίδονται όλοι εκείνοι οι πίνακες και τα διαγράμματα για την πληρέστερη ανάλυση των παραμέτρων, ξεχωριστά ο καθένας. Η απαίτηση της παραμετρικής ανάλυσης είναι να δούμε πως επηρεάζουν η ισχύς, η ταχύτητα και το σημείο εστίασης της δέσμης το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης, το μέγεθος της Θ.Ε.Ζ, την

διείσδυση και την μορφή της συγκόλλησης. Τα παρακάτω αποτελέσματα ισχύουν για όλους σχεδόν τους χάλυβες, ποιοτικά και όχι ποσοτικά. Για παράδειγμα δεν μπορούν να εφαρμοσθούν, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, στο αλουμίνιο ή σε κράματά του.

Πίνακας 5.1 : Πειραματικά αποτελέσματα των παραμέτρων της συγκόλλησης.

Αριθμός Δοκιμίου	Q (Watt)	u (mm/min)	(Q/60u) (Joule/mm)	Διείσδυση	Πλάτος Ζώνης Τήξης	Πλάτος Θ.Ε.Ζ
A1	1140	800	1,425	1,35	1,15	0,4
A2	1140	400	2,85	2,14	1,8	0,9
A3	1140	200	5,7			
A4	1140	80	14,25	4	5	1,87
A5	1500	800	1,875	1,8	1,85	0,74
A6	1500	600	2,5	2	2,66	0,53
A7	1500	400	3,75	2,8	2,72	0,9
A8	1500	200	7,5	3,05	3,5	1,4
A9	1500	200	7,5	3,05	3,5	1,4
A10-14	* Στα δοκίμια αυτά είχαμε ως προστατευτικό αέριο N ₂ . ** Στο δοκίμιο Νο8 δεν είχαμε προστατευτικό αέριο.					
B1	1140	200	5,7	2,9	3,8	1,5
B2	1140	400	2,85	2,8	2,8	0,85
B3	1140	600	1,9	2,2	2,6	0,6
B4	1500	200	7,5	4	4,7	2,4
B5	1500	400	3,75	4	3,3	1,4
B6	1500	600	2,5	3,6	2,8	0,45
B7	1680	200	8,4	Drop-out	Drop-out	Drop-out
B8	1680	400	4,2	4	3,6	1,5
B9	1680	600	2,8	3,8	2,7	1
B10	1680	800	2,1	3,4	2,5	0,53
B11	1140	200	5,7	3,2	4	0,8
B12	1140	400	2,85	2,8	2,8	0,48
B13	1140	600	1,9	2	1,8	0,2
B14	1500	200	7,5	4	4	1,4
B15	1500	400	3,75	3,5	3,5	1
B16	1500	600	2,5	3	2,	0,6
B17	1680	200	8,4	4	4,35	2,17
B18	1680	400	4,2	4	3,6	1,1
B19	1680	600	2,8	3,6	2,2	0,6
B20	1140	200	5,7	3,2	3,8	1
B21	1140	400	2,85	2,8	2,6	0,5
B22	1140	600	1,9	1,8	2,5	0,3
B23	1500	200	7,5	Drop-out	Drop-out	Drop-out
B24	1500	400	3,75	4	3,4	1
B25	1500	600	2,5	3,6	2,5	0,5
B26	1680	200	8,4	4	4,4	2
B27	1680	400	4,2	4	3,4	1,1
B28	1680	600	2,8	3,8	2,3	0,8
B29	1680	800	2,1	3,5	2,1	0,6

5.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

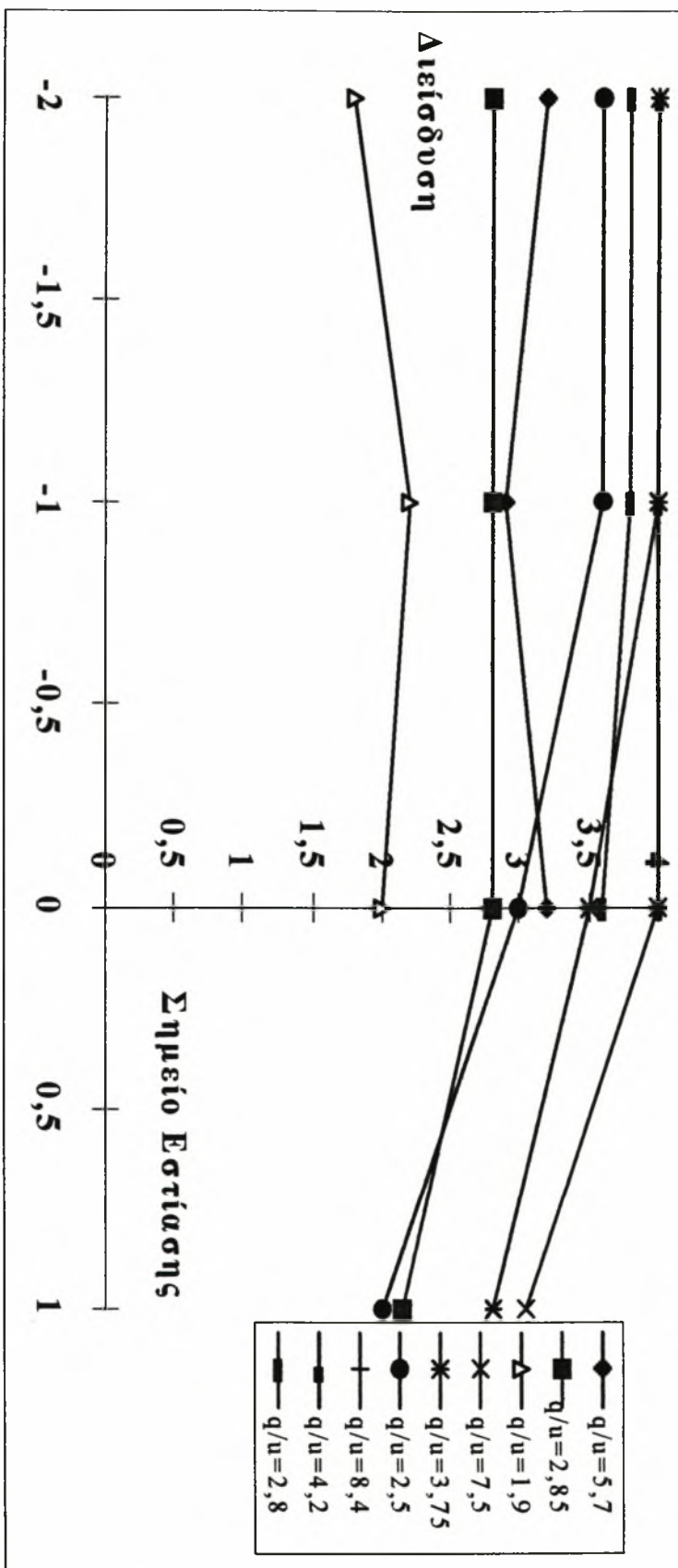
Αρχικά αυτό που θα αναλυθεί είναι η επιρροή του σημείου εστίασης στην διείσδυση της λίμνης συγκόλλησης (ζώνη τήξης). Φαίνεται ξεκάθαρα από το σχήμα 5.1 και από τον πίνακα 5.2 ότι όταν το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό ελάχιστα επηρεάζει την διείσδυση. Όταν το σημείο εστίασης είναι έξω από την επιφάνεια του υλικού τότε όσο αυξάνει η απόσταση από την επιφάνεια τόσο μειώνεται η διείσδυση. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ο λόγος του παραπάνω φαινομένου. Όταν το σημείο εστίασης είναι έξω από το υλικό τότε η πυκνότητα θερμοροής ελαττώνεται. Πυκνότητα θερμοροής ορίζουμε την ποσότητα της θερμότητας, η οποία ανά μονάδα χρόνου μεταδίδεται μέσα από τη μονάδα της επιφάνειας και είναι $q = Q / A$.

Εξυπακούεται, με βάση τον παραπάνω ορισμό, ότι όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του ελάσματος η επιφάνεια A αυξάνεται με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της πυκνότητας ενέργειας. Η μείωση της πυκνότητας ενέργειας είναι η κύρια αιτία της μείωσης της διείσδυσης. Βέβαια όταν το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό, σε οποιαδήποτε θέση, δεν επηρεάζει την επιφάνεια A γι' αυτό και η διείσδυση παραμένει σταθερή.

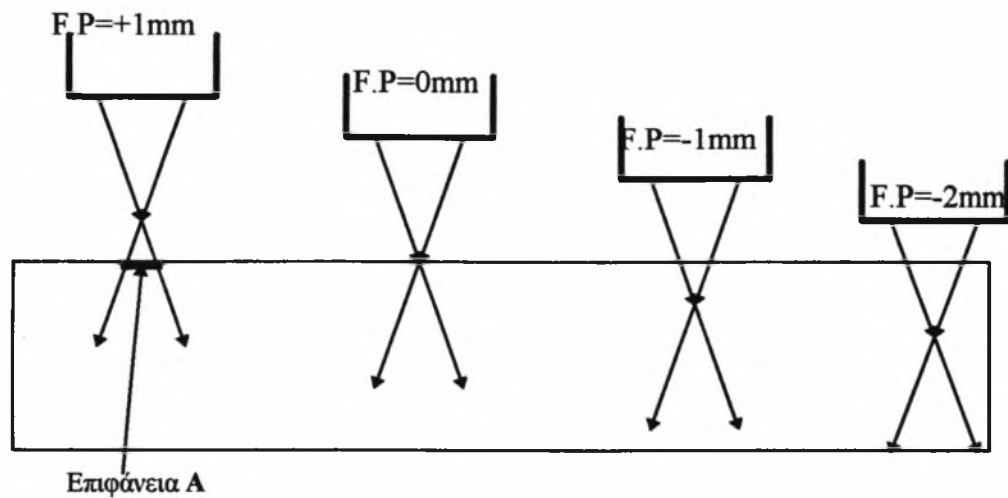
		Σημείο Εστίασης (Focal Point)					
		+1	0	-1	-2		
Q (Watt)	u (mm/min)					Q/60u	Μέση τιμή της διείσδυσης
1140	200		3,2	2,9	3,2	5,7	3,1
1140	400	2,14	2,8	2,8	2,8	2,85	2,8
1140	600		2	2,2	1,8	1,9	2
1500	200	3,05	4 (undercut)	4	drop-out	7,5	4
1500	400	2,8	3,5	4	4	3,75	3,85
1500	600	2,0	3	3,6	3,6	2,5	3,4
1680	200		4	Drop-out	4	8,4	4
1680	400		4	4	4	4,2	4
1680	600		3,6	3,8	3,8	2,8	3,75

Πίνακας 5.2 : Πειραματικά αποτελέσματα για την διείσδυση της ζώνης τήξης κατά το πάχος του υλικού

Διάγραμμα Σημείου Εστίασης-Διείσδυσης για σταθερό λόγο $Q/60u$

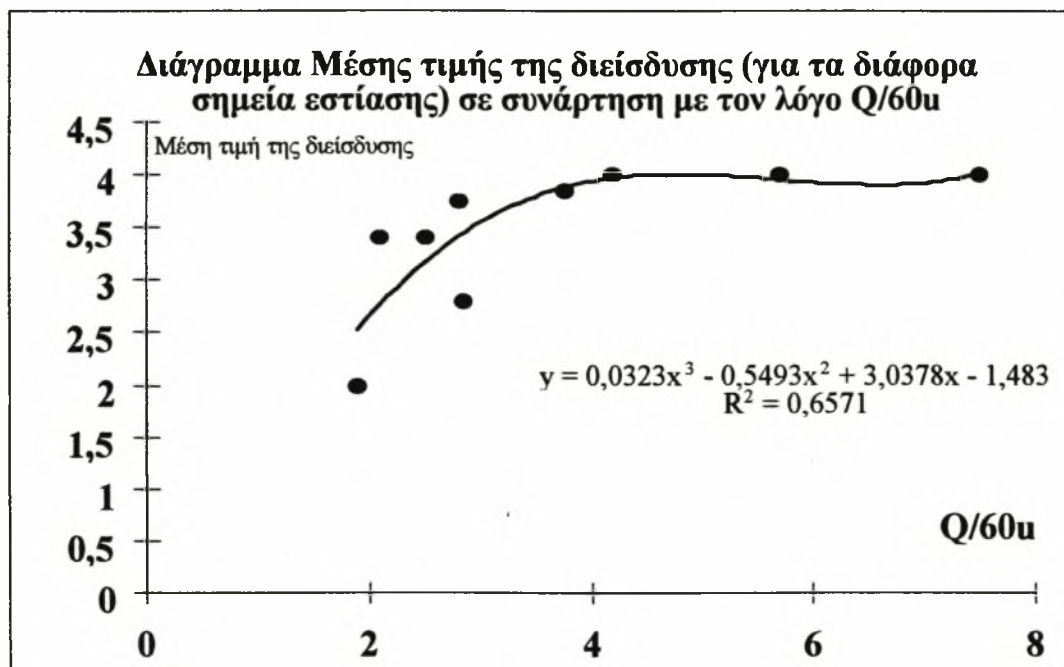


Σχήμα 5.1: Διάγραμμα σημείου εστίασης-διείσδυσης για σταθερό λόγο $Q/60u$



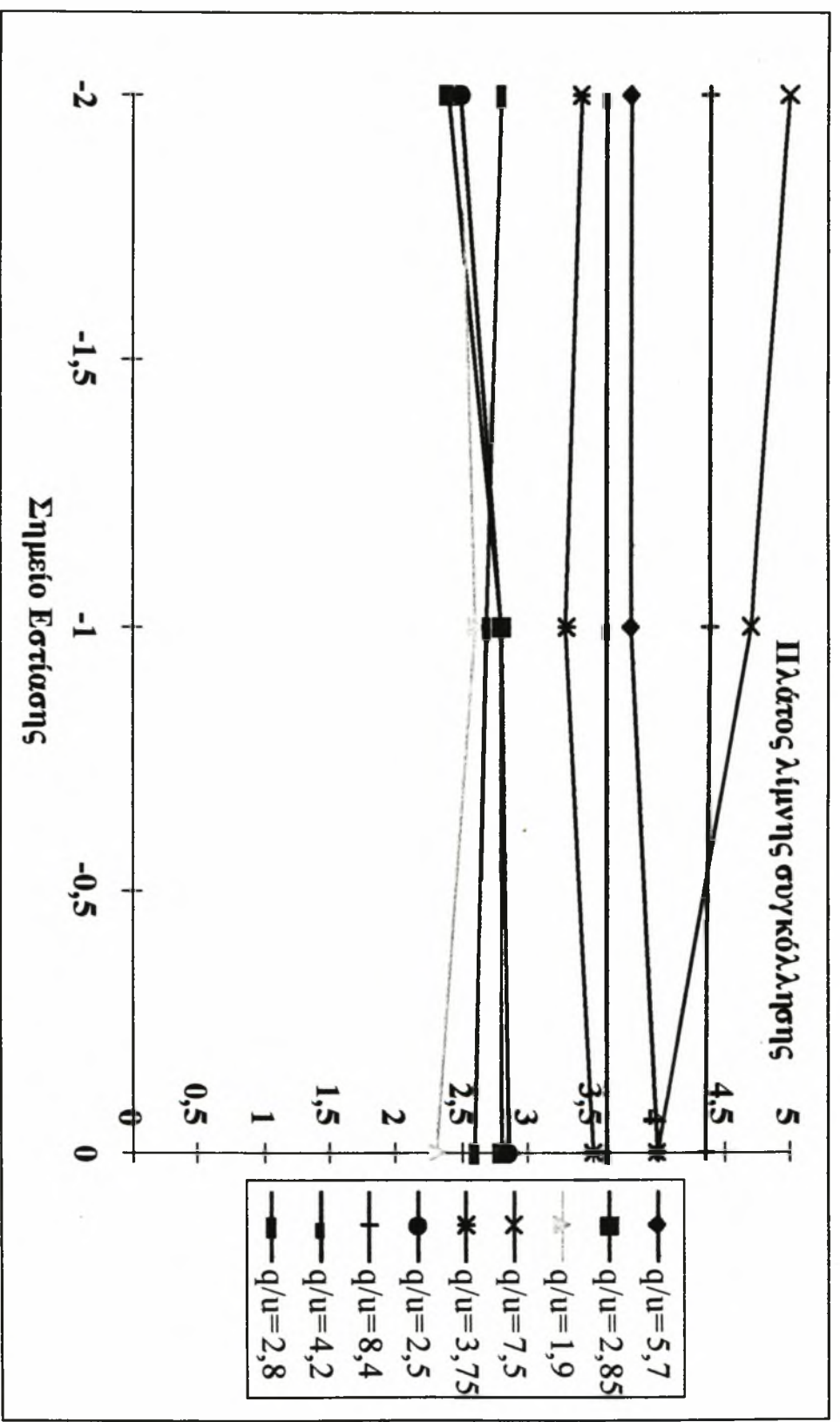
Σχήμα 5.2 : Σημείο εστίασης και επιφάνεια πρόσπτωσης της δέσμης

Επίσης στον πίνακα 5.2 βλέπουμε ότι η διείσδυση δεν μεταβάλλεται πάρα πολύ σε σχέση με το σημείο εστίασης. Έτσι θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα διάγραμμα της μέσης τιμής της διείσδυσης σε συνάρτηση με τον λόγο Q/u ώστε να δούμε την επιρροή του στην διείσδυση. Στο σχήμα 5.3 παρατηρούμε ότι με αύξηση του λόγου Q/u έχουμε αύξηση της διείσδυσης (έγινε γραμμική παρεμβολή).



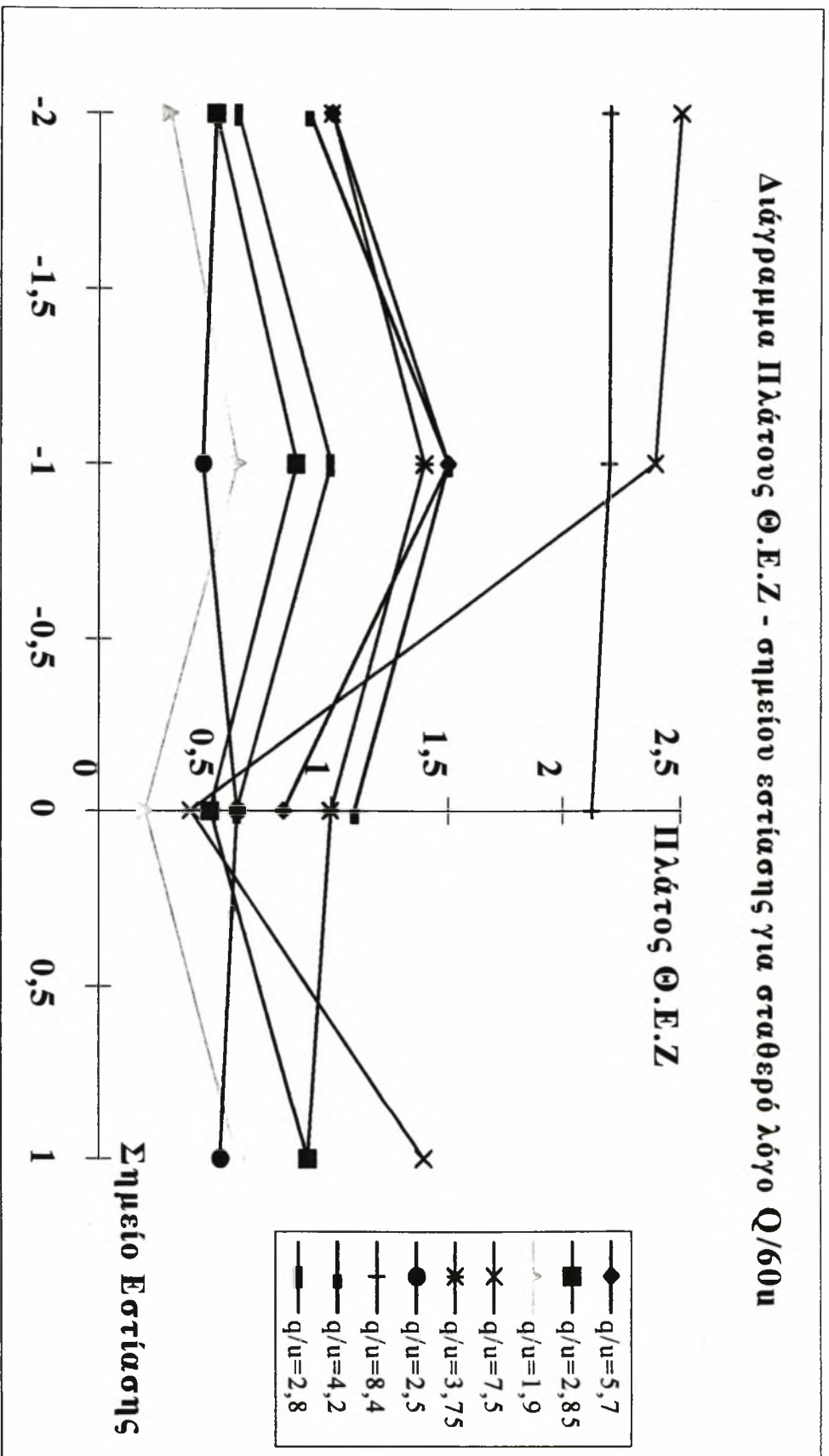
Σχήμα 5.3 : Επιρροή του λόγου $Q/60u$ πάνω στην διείσδυση της λίμνης συγκόλλησης

Με τον ίδιο τρόπο προχωρούμε στην επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων για το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης και του μεγέθους της Θ.Ε.Ζ.

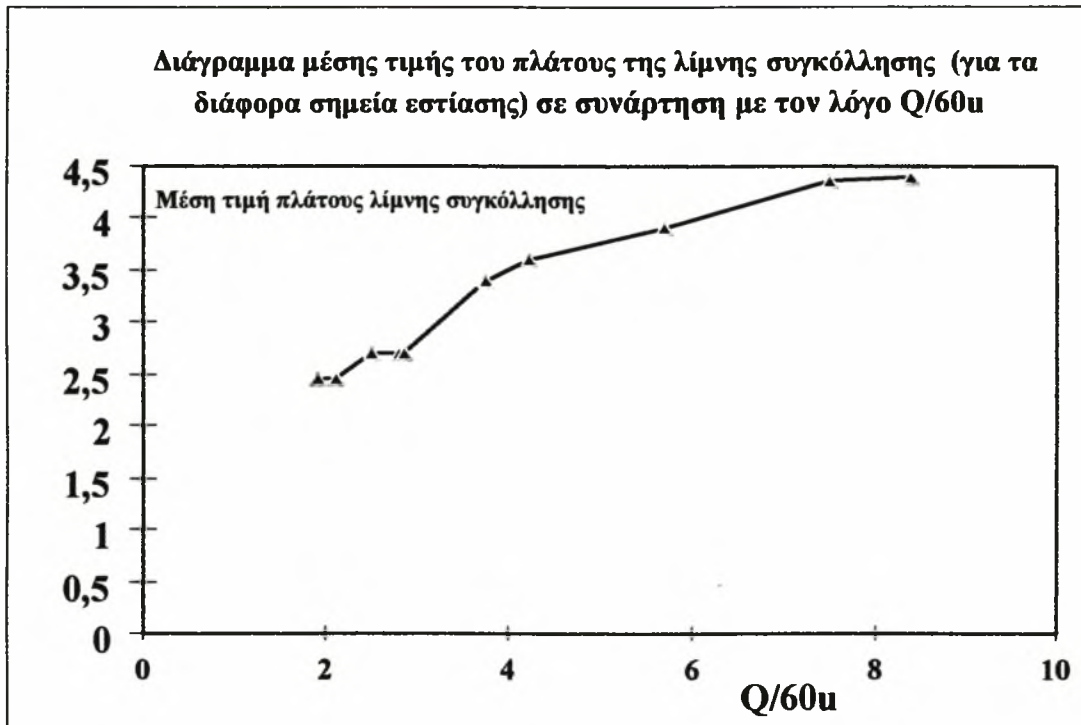


Σχήμα 5.4 : Διάγραμμα πλάτους της Δίμνης συγκόλλησης σε συνάρτηση με το σημείο εστίασης για σταθερό λόγο $Q/60u$

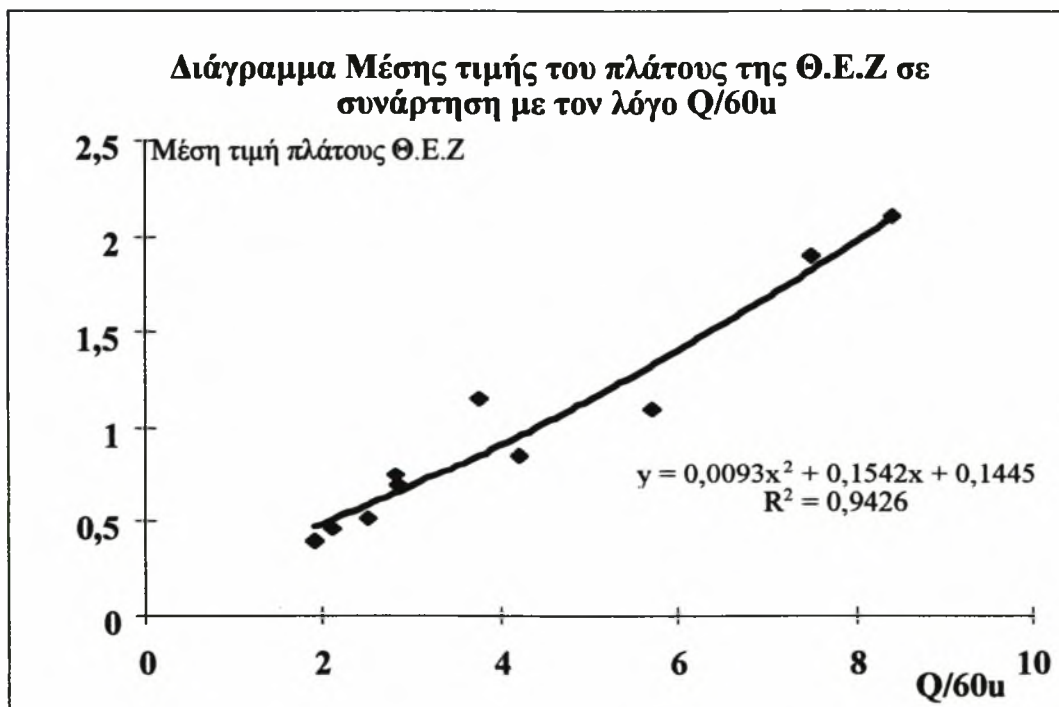
Διάγραμμα Πλάτους Θ.Ε.Ζ - σημείου εστίασης για σταθερό λόγο $Q/60u$



Σχήμα 5.6 : Πλάτος της Θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης σε συνάρτηση με το σημείο εστίασης και τον λόγο $Q/60u$



Σχήμα 5.5 : Επιρροή του λόγου Q/60u στο πλάτος της λίμνης συγκόλλησης

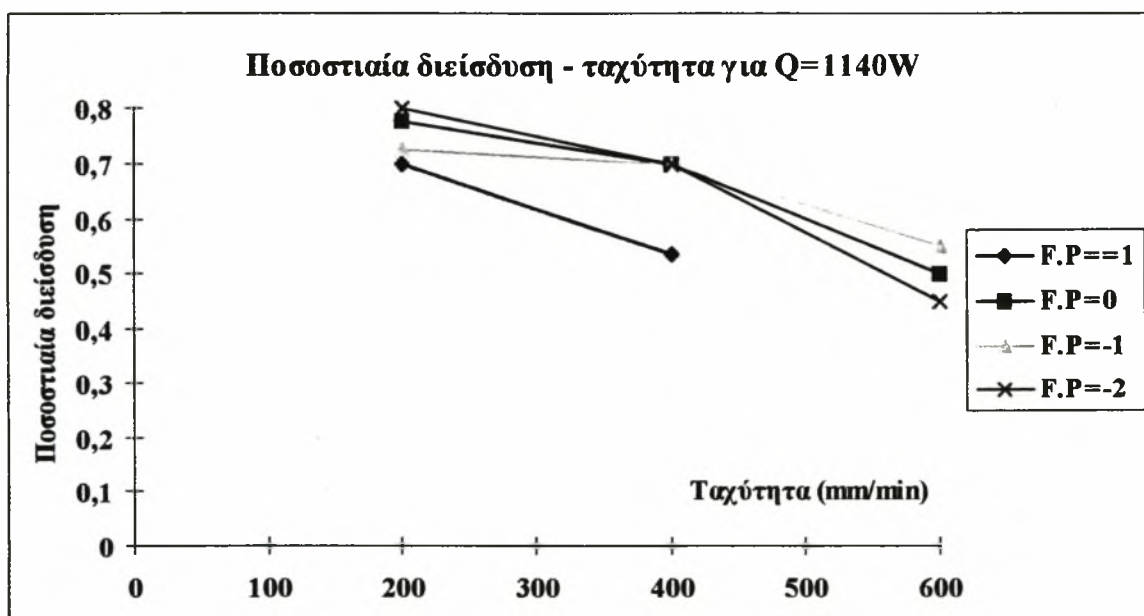


Σχήμα 5.7 : Επιρροή του λόγου Q/60u στο μέγεθος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης

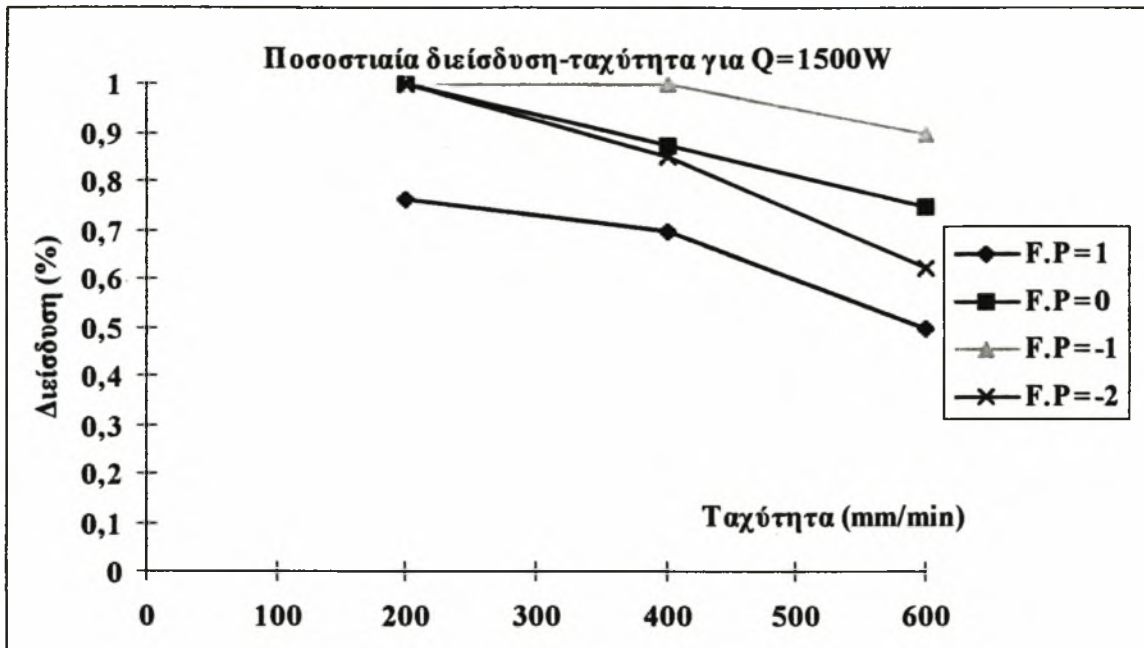
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 το σημείο εστίασης ελάχιστα επηρεάζει το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης ειδικά όταν βρίσκεται εντός του υλικού. Στον πίνακα 5.1

φαίνεται ότι όταν το σημείο εστίασης είναι πάνω από την επιφάνεια του υλικού το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης μειώνεται εξαιτίας της μείωσης της πυκνότητας ενέργειας. Μάλιστα η ελάχιστη επιρροή του Σ.Ε μας δίνει την δυνατότητα να δούμε την επιρροή του λόγου Q/u με μεγαλύτερη ακρίβεια (ουσιαστικά το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης παραμένει σταθερό μεταβάλλοντας το Σ.Ε). Έτσι με αύξηση του λόγου Q/u έχουμε αύξηση του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης (σχήμα 5.5). Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για το μέγεθος της Θ.Ε.Ζ μόνο που η επιρροή του σημείου εστίασης δεν είναι το ίδιο ομαλή. Παρουσιάζεται ένα μέγιστο πλάτος της Θ.Ε.Ζ όταν το σημείο εστίασης βρίσκεται -1mm κάτω από την επιφάνεια.

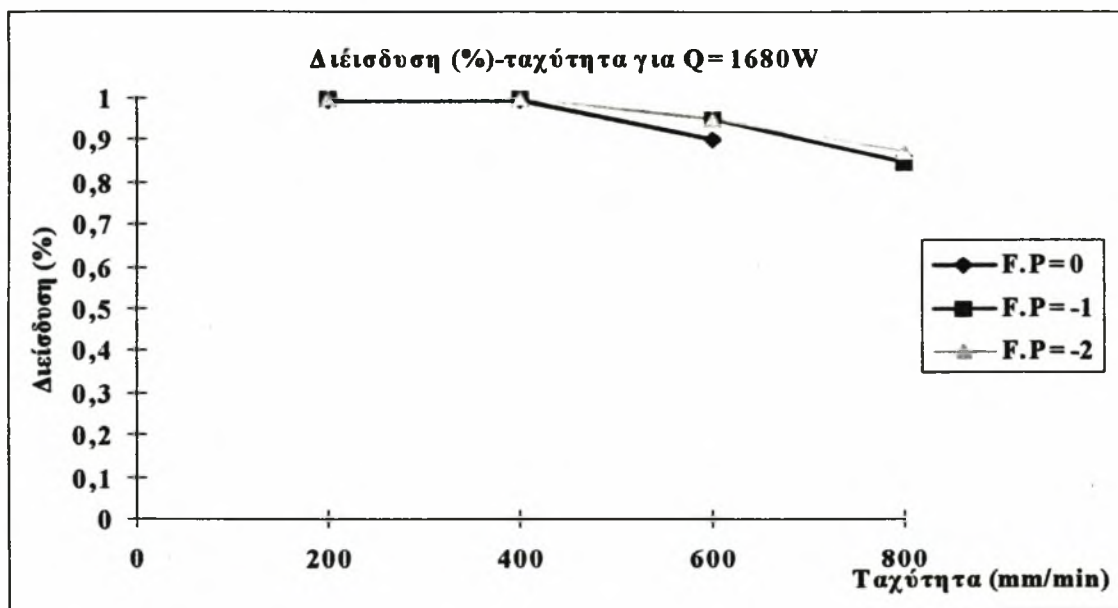
Γενικά θα λέγαμε ότι το σημείο εστίασης επιδρά στο υλικό κατά τέτοιο τρόπο ώστε: Όταν το σημείο εστίασης βρίσκεται εκτός υλικού τότε όσο είμαστε πιο μακριά από την επιφάνεια τόσο μειώνεται η διείσδυση, το μέγεθος της ζώνης τήξης και της Θ.Ε.Ζ. Από την άλλη μεριά όταν το Σ.Ε βρίσκεται μέσα στο υλικό τότε ελάχιστα επηρεάζει τα μεγέθη που προαναφέραμε (όσο πιο βαθιά εστιάζουμε τόσο μεγαλύτερη διείσδυση,....., έχουμε), άλλα συγκρινόμενο με την εστίαση εκτός υλικού, σίγουρα τα μεγέθη αυτά αυξάνονται. Η επιρροή του λόγου Q/u είναι ξεκάθαρη. Αύξηση του λόγου αυτού (δηλαδή μείωση της ταχύτητας ή αύξηση της ισχύος) επιφέρει αύξηση της διείσδυσης, του μεγέθους της Θ.Ε.Ζ και της ζώνης τήξης.



Σχήμα 5.8 : Διάγραμμα ποσοστιαίας διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα της δέσμης για ισχύ Q=1140Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης.



Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα ποσοστιαίας διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα της δέσμης για ισχύ Q=1500Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης.

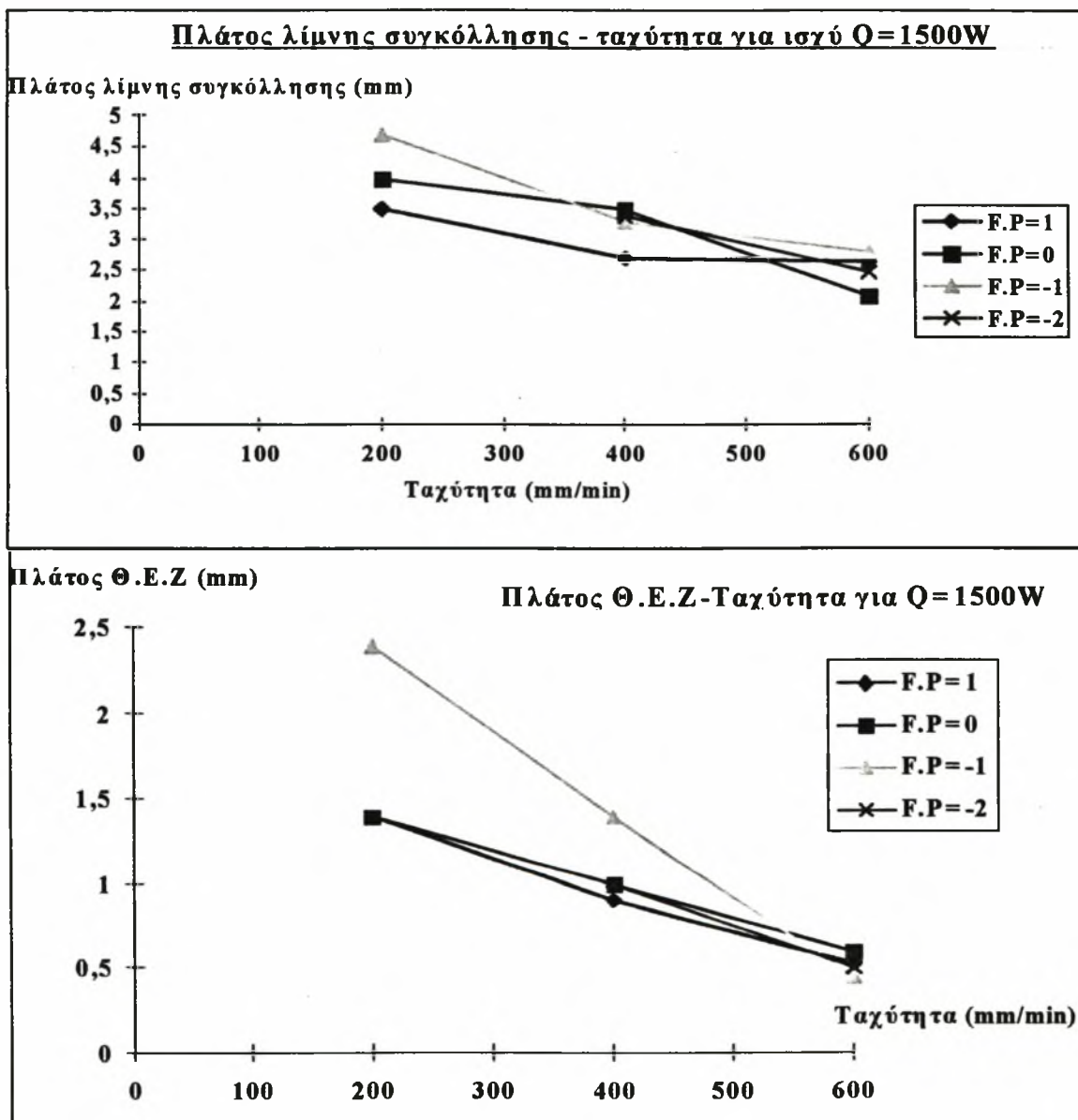


Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα ποσοστιαίας διείσδυσης σε σχέση με την ταχύτητα της δέσμης για ισχύ Q=1680Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης.

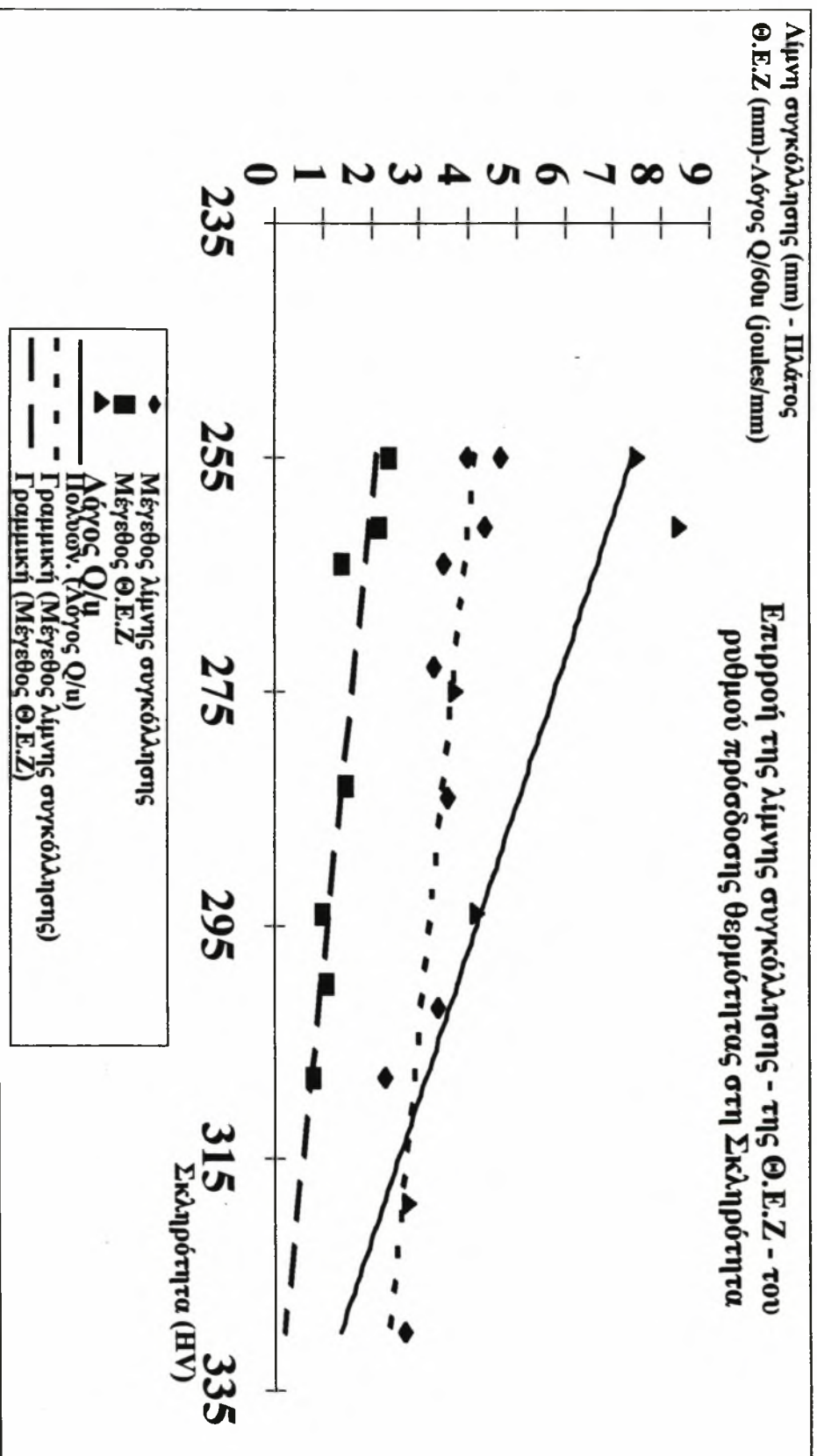
Στα σχήματα 5.8-5.9-5.10 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα με μια διαφορετική μορφή ώστε να κατανοηθούν καλύτερα. Παρατηρούμε ότι η κλίση των διαγραμμάτων αλλάζει ανάλογα με το μέγεθος της ισχύος. Μάλιστα μειώνοντας την ισχύ αυξάνεται και η κλίση. Αύξηση της κλίσης σημαίνει μεγαλύτερη ευαισθησία του υλικού στην ταχύτητα της

δέσμης. Επίσης φαίνεται ότι σε μεγαλύτερες τιμές της ισχύος υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερης διείσδυσης και χρησιμοποίησης μεγαλύτερου εύρους ταχυτήτων. Τέλος παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα τόσο μειώνεται η διείσδυση.

Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζονται ανάλογα διαγράμματα για την εξάρτηση του πλάτους της ζώνης τήξης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης από την ταχύτητα της δέσμης. Όταν αυξάνεται η ταχύτητα έχουμε μείωση των παραγόντων που αναφέραμε και η μείωση αυτή γίνεται πιο αισθητή και πιο απότομη στην Θ.Ε.Ζ απ' ότι στη ζώνη τήξης.



Σχήμα 5.11 : Διαγράμματα του πλάτους της ζώνης τήξης και της Θ.Ε.Ζ για Q=1500Watt και για τα διάφορα σημεία εστίασης



Σχήμα 5.12 : Επιρροή του μεγέθους της λίμνης συγκόλλησης, του πλάτους της Θ.Ε.Ζ και του λόγου Q/60u στην μέση σκλιρότητα της περιοχής συγκόλλησης

Στο σχήμα 5.12 φαίνεται η επιρροή των διαφόρων θερμικά επηρεαζόμενων περιοχών στην σκληρότητα των περιοχών αυτών. Όσο αυξάνει το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης τόσο μειώνεται η σκληρότητα της περιοχής αυτής, εξαιτίας της μείωσης του ρυθμού ψύξης. Η μείωση του ρυθμού ψύξης επιφέρει μια ανακατανομή των διαφόρων φάσεων που δημιουργούνται και έτσι δημιουργείται πιο χονδρόκοκκη δομή με αποτέλεσμα την μείωση της σκληρότητας. Τα ίδια ισχύουν και για την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη όπου η μείωση του ρυθμού ψύξης μειώνει το ποσοστό του δημιουργούμενου μαρτενσίτη (πολύ σκληρή φάση ιδιαίτερα αν είναι λεπτόκοκκος).

ΕΝΟΤΗΤΑ 6 :ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΕΛΙΟ ΤΩΝ

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη παρούσα ενότητα εφαρμόστηκαν 2 μοντέλα για τον υπολογισμό της θερμοκρασιακής κατανομής γύρω από μια συγκόλληση laser. Η πρώτη θεωρία στηρίζεται στην αναλυτική λύση του K.Masubushi [4] και πρόκειται για ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Η δεύτερη θεωρία αναφέρεται σε μια δημοσίευση του Ashby και η λύση αφορά το μονοδιάστατο πρόβλημα. Και οι δύο λύσεις απέχουν από την πραγματικότητα εξαιτίας των παραδοχών που γίνονται ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα ευκολότερα. Ωστόσο το μονοδιάστατο μοντέλο επιφέρει χρήσιμα συμπεράσματα όταν εφαρμοσθεί σε μικρά πάχη (κάτω του 1mm). Το τρισδιάστατο μοντέλο είναι πιο ακριβές αλλά αποκλίνει από την πραγματικότητα, εξαιτίας των παραδοχών που έγιναν για να λυθεί πιο εύκολα. Και τα δύο μοντέλα κωδικοποιήθηκαν σε πρόγραμμα Fortran στον ηλ. υπολογιστή ώστε να είναι πιο εύκολη η χρήση τους (Παράρτημα Γ).

6.2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

6.2.1 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ LASER

Πολλές φορές για να μπορέσουμε να περιγράψουμε την ένταση της πηγής θερμότητας χρησιμοποιούμε τον όρο :

$$\mathbf{h=Q/u} \quad (6.1)$$

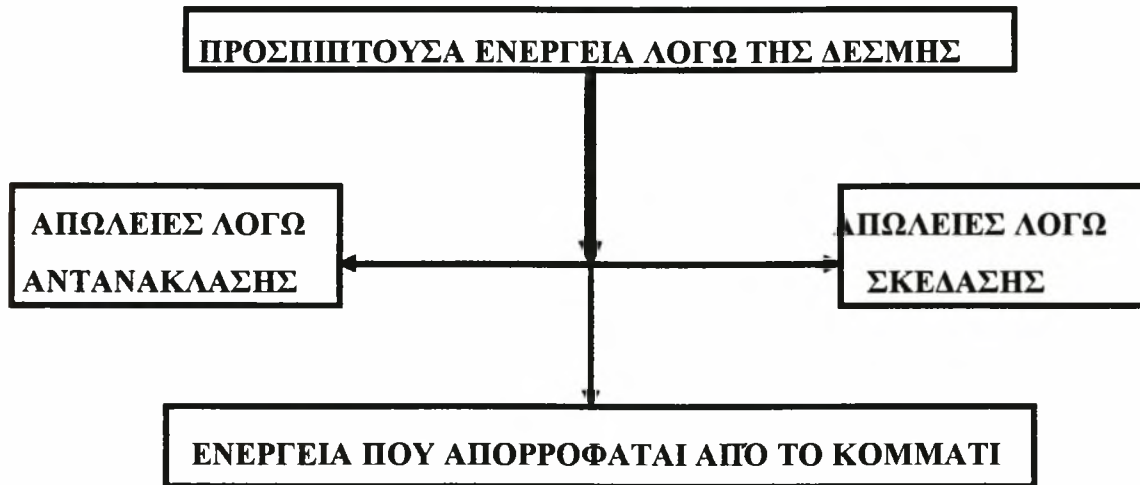
όπου: Q.....Η προσδιδόμενη από το laser ισχύς (Watts)

u.....Η ταχύτητα της συγκόλλησης (m/sec)

Ο όρος αυτός εκφράζει την θερμότητα που δόθηκε στο κομμάτι ανά μονάδα επιφανείας που συγκολλήθηκε και χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την εκλογή των διαφόρων παραμέτρων.

Ένα γενικό ισοζύγιο ενέργειας για την συγκόλληση laser παρουσιάζεται παραστατικά στο σχήμα 6.1. Όπως φαίνεται η ολική ενέργεια η οποία απορροφάται από το κομμάτι είναι πολύ δύσκολο να υπολογισθεί διότι ενώ ξέρουμε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα, είναι δύσκολο να τα εκφράσουμε μαθηματικά. Η τήξη είναι

το κυρίαρχο πρόβλημα αφού η μελέτη της είναι εξαιρετικά δύσκολη. Θεωρούμε ότι δεν έχουμε τήξη ή εξάτμιση του υλικού οπότε οι απώλειες λόγω σκέδασης είναι αμελητέες. Οι απώλειες λόγω σκέδασης (scattering losses) οφείλονται στην τήξη του υλικού και στην εκβολή του υλικού από την επιφάνειά του, κατά την διάρκεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ laser και μετάλλου.



Σχήμα 6.1 : Ισοζύγιο ενέργειας για την συγκόλληση laser

Μετά από τις παραπάνω παραδοχές η ενέργεια που απορροφά το κομμάτι είναι :

$$Q = (1-R) P \quad (6.2)$$

όπου Q..... Η απορροφούμενη ενέργεια από το κομμάτι

P..... Η ισχύς της δέσμης

R.... Η ανακλαστικότητα του υλικού

Το συγκεκριμένο ισοζύγιο αναφέρεται για την συγκόλληση laser γενικά και δεν λαμβάνει υπόψη την θεωρία της 'μαύρης τρύπας' που προαναφέραμε στην ενότητα 1. Η δημιουργία της 'keyhole' έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφητικότητας στη μέγιστη τιμή που είναι $A=1$. Έστω και τοπικά η απορροφητικότητα του υλικού μεγιστοποιείται και η απορροφούμενη ενέργεια εξισώνεται με την ισχύ που ρυθμίζουμε από την συσκευή. Επομένως το παραπάνω ισοζύγιο ενέργειας ισχύει μέχρι την στιγμή που θα δημιουργηθεί η 'keyhole'. Πολλά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την θερμική ακτινοβολία του laser. Βέβαια η παρουσία υλικού στο χώρο (ανάμεσα από δύο σώματα) εμποδίζει την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία. Εξάλλου σε μια δημοσίευση των Dabby και Pack [5] παρουσιάζεται η σύμπτωση των θεωρητικών και των πειραματικών

αποτελεσμάτων, την στιγμή που η βασική θεώρηση ήταν ότι απορροφάται όλη η ισχύς του laser.

6.2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER

Οι πρώτες αναλύσεις για το πρόβλημα της ροής θερμότητας μιας κινούμενης πηγής θερμότητας δόθηκαν από τον Rosental [6] την περίοδο 1930-40. Τις ίδιες λύσεις, με μερικές τροποποιήσεις, θα χρησιμοποιήσουμε στο παρών κεφάλαιο. Θεωρούμε ότι έχουμε μια σταθερή, σημειακή πηγή θερμότητας η οποία κινείται με σταθερή ταχύτητα, λαμβάνοντας υπόψη ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Έχουμε δηλαδή μια ημιμόνιμη κατάσταση όπου η θερμοκρασιακή κατανομή είναι σταθερή και κινείται μαζί με την πηγή θερμότητας. Οι επιπλέον παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη είναι οι ακόλουθες:

- 1) Οι φυσικές ιδιότητες του αγωγίμου μέσου είναι σταθερές.
- 2) Οι απώλειες θερμότητας μεταξύ της διεπιφάνειας του αγωγίμου μέσου και της ατμόσφαιρας που το περιβάλλει είναι αμελητέες.
- 3) Δεν έχουμε αλλαγές φάσης και η συνοδευόμενη αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας μετασχηματισμού είναι αμελητέα.
- 4) Το αγωγίμο μέσο έχει ημίπειρο πάχος.
- 5) Η ενέργεια που παράγεται μέσα στο υλικό, ανά μονάδα όγκου και χρόνου, είναι αμελητέα.

Ήδη πολλές από τις μέχρι τώρα θεωρήσεις δεν είναι ρεαλιστικές. Όλα ξεκινούν από την θεώρηση μη ύπαρξης μετασχηματισμού φάσης. Βέβαια η τήξη περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή, όμως δεν παύει να είναι σημαντική. Επίσης η θεώρηση σημειακής πηγής θερμότητας δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αφού η δέσμη του laser έχει συγκεκριμένη ακτίνα. Με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις προκύπτει η ακόλουθη λύση:

Η αρχική εξίσωση επίλυσης του θερμοκρασιακού πεδίου είναι:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Phi + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}) \Rightarrow \text{(λόγω της παραδοχής 1)}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \cdot \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] \quad (6.3)$$

όπου $k = \lambda / c\rho$ Η θερμοδιαχυτότητα του υλικού

Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συντεταγμένων (w, y, z) που κινείται με την ίδια ταχύτητα όπως η πηγή θερμότητας, θα έχω:

$$\underline{w = x - u t} \quad (6.4)$$

Κάνοντας τους απαραίτητους μετασχηματισμούς προκύπτει (K. Masubushi) [4]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = - \frac{u}{k} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial w} \quad (6.5)$$

Η μεταβλητή θ , μετά τον παραπάνω μετασχηματισμό, είναι συνάρτηση μόνο της θέσης (w, y, z) . Την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να την χειρισθούμε πιο εύκολα εάν την αντικαταστήσουμε με την ακόλουθη έκφραση:

$$\theta = \theta_0 + \exp\left(-\frac{u}{2 \cdot k} \cdot w \cdot \Phi(w, y, z)\right) \quad (6.6)$$

όπου: θ_0 Αρχική θερμοκρασία

$\Phi(w, y, z)$ Η νέα άγνωστη συνάρτηση

Έτσι θα έχουμε:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial w^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \left(\frac{u}{2 \cdot k}\right)^2 \cdot \Phi = 0 \quad (6.7)$$

Για το ημίαπειρο έλασμα και για την υπόθεση της τρισδιάστατης θερμοροής καταλήγω στην εξίσωση (λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω παραδοχές) [4]:

$$\theta - \theta_0 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot e^{\left(\frac{-u}{2 \cdot k}\right) \cdot w} \cdot \frac{e^{\left(\frac{-u}{2 \cdot k}\right) \cdot R}}{R} \quad (6.8)$$

όπου :

$$R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2} \quad (6.9)$$

Για να μπορέσουμε να απλοποιήσουμε την παραπάνω εξίσωση από πλευράς αριθμητικών πράξεων κάνουμε τον εξής μετασχηματισμό:

$$\underline{\theta - \theta_0 = M \cdot F} \quad (6.10) \quad \text{όπου:}$$

$$M = \frac{Q \cdot u}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot k} \quad (6.11)$$

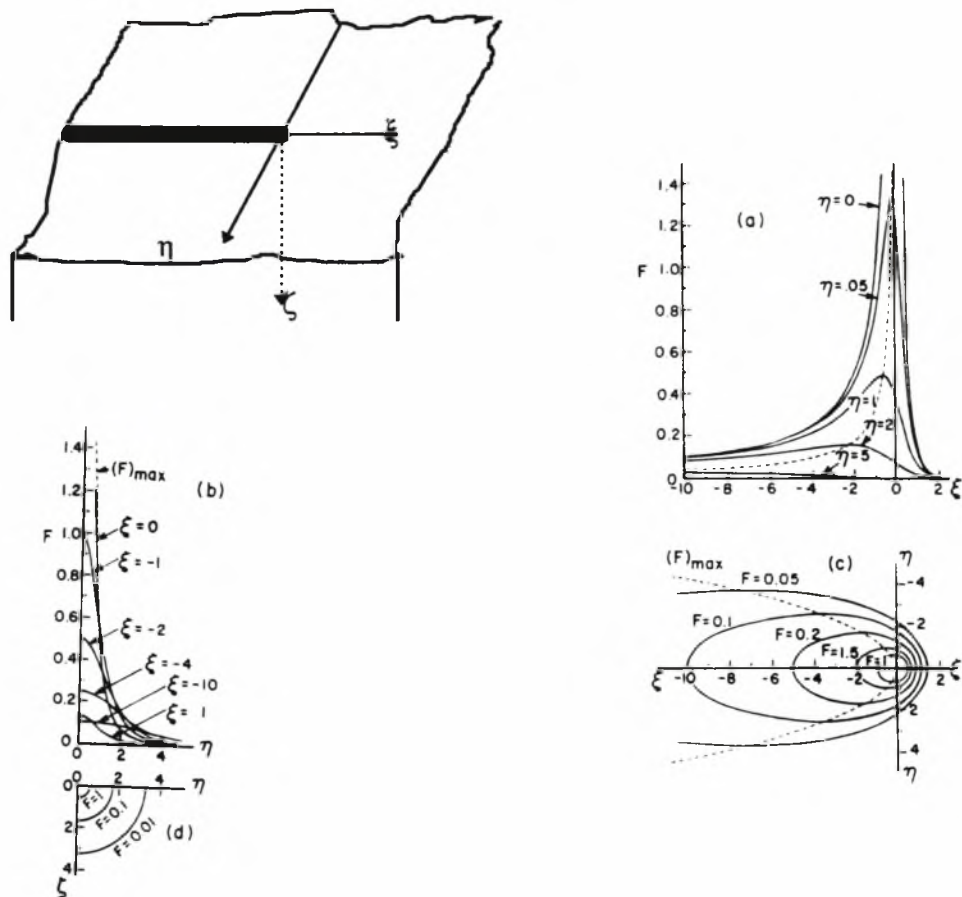
$$F = \frac{1}{\rho} \cdot e^{-(\rho + \xi)} \quad (6.12)$$

$$\xi = \frac{u}{2 \cdot k} \cdot w, (6.13) \quad \rho = \frac{u}{2 \cdot k} \cdot r (6.14)$$

$$\eta = \frac{u}{2 \cdot k} \cdot y, (6.15) \quad \zeta = \frac{u}{2 \cdot k} \cdot z (6.16)$$

$$r = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2} (6.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση βοηθά στην παραμετρική ανάλυση της θερμοκρασιακής κατανομής. Το σύστημα συντεταγμένων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου και δίνονται τα θεωρητικά αποτελέσματα του K.Masubushi [4] για την συγκεκριμένη εξίσωση.

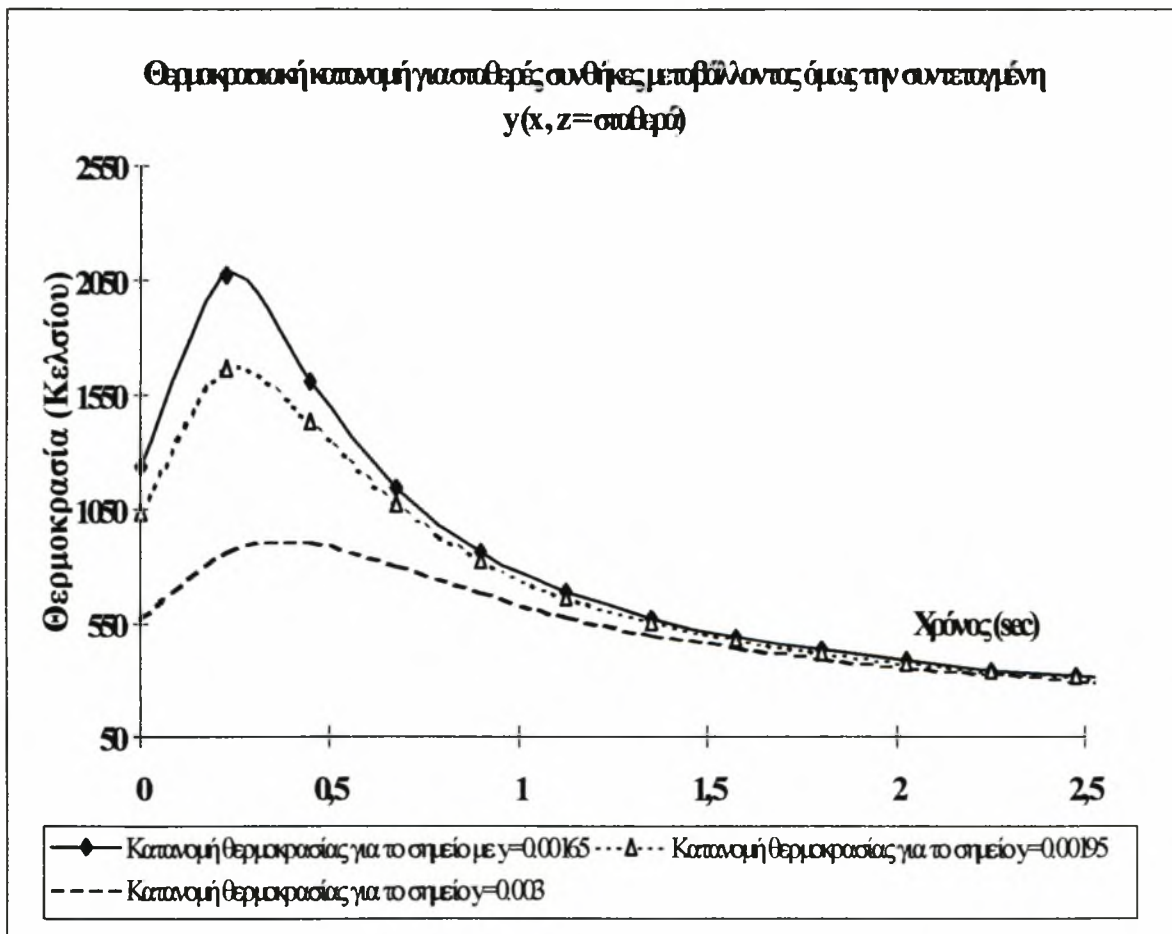


Σχήμα 6.2 : Ανάλυση της συνάρτησης F για την ροή θερμότητας σε ημιάπειρο στερεό και για κινούμενη πηγή θερμότητας

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις η θερμοκρασιακή διαφορά είναι συνάρτηση δύο παραγόντων, του M και του F. Η παράμετρος M εκφράζει το ποσό της θερμότητας. Εξαρτάται από την ένταση της πηγής Q, από την ταχύτητα της δέσμης u και από τις θερμικές ιδιότητες του υλικού λ, κ. Η διανυσματική συνάρτηση F ουσιαστικά

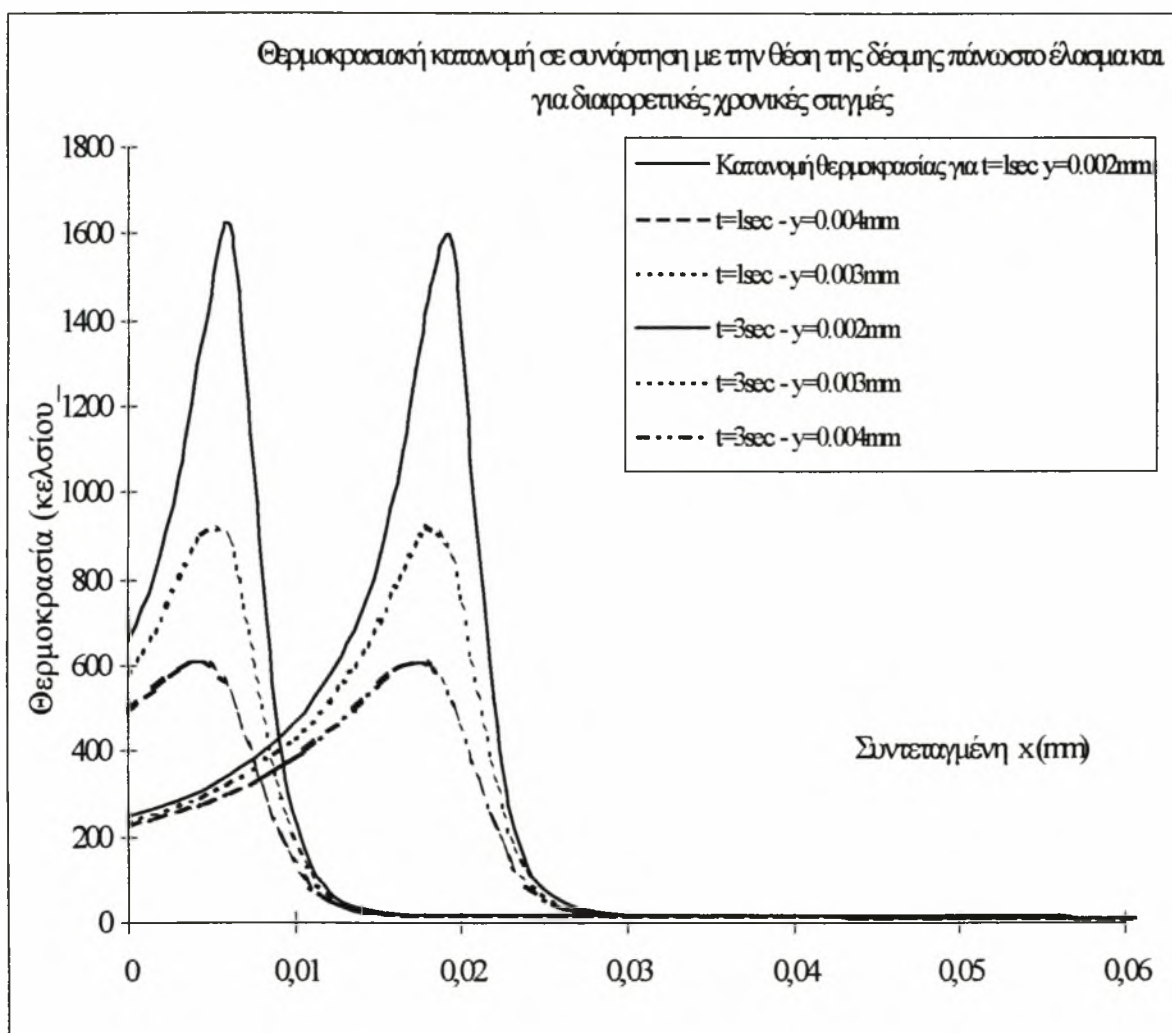
είναι αυτή που υπολογίζει την κατανομή της θερμοκρασίας και μπορεί να υπολογιστεί από τις διανυσματικές μεταβλητές ξ και ρ .

Την παραπάνω εξίσωση προσπαθήσαμε να την κωδικοποιήσουμε σε κώδικα Fortran ώστε να αποφύγουμε τις πολύπλοκες πράξεις. Το πρόγραμμα παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ μαζί με διάφορα αποτελέσματα, ενδεικτικά της χρησιμότητας του προγράμματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παραδοχή της σημειακής πηγής θερμότητας δημιουργεί διάφορα προβλήματα. Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα σε περιοχές έξω από την ακτίνα της δέσμης. Δηλαδή αν η ακτίνα της δέσμης είναι, για παράδειγμα, 1mm τότε η αναλυτική λύση που προαναφέραμε ισχύει και δίδει λογικά αποτελέσματα μόνο όταν θα θέτουμε : $y > 0,5\text{mm}$. Πρέπει επομένως να είναι γνωστή η ακτίνα της δέσμης και προσεγγιστικά να μην πλησιάζουμε κοντά σε αυτήν.



Σχήμα 6.3 : Θερμοκρασιακό πεδίο του δοκιμίου B5 καθώς απομακρυνόμαστε κατά την διεύθυνση του πλάτους του ελάσματος

Στα σχήματα 6.3 και 6.4 απεικονίζεται η εφαρμογή του προγράμματος πάνω στο δοκίμιο B5 (είναι ένα από τα επιλεγμένα δοκίμια-ενότητα 4). Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή καθώς απομακρυνόμαστε από την δέσμη κατά την διεύθυνση του άξονα y, δηλαδή κατά την διεύθυνση του πλάτους. Στο σχήμα 6.4 φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή των διαφόρων σημείων σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η μαύρη καμπύλη μας δείχνει την θερμοκρασιακή κατανομή την χρονική στιγμή $t=1\text{sec}$ ενώ η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει την θερμοκρασιακή κατανομή για $t=3\text{sec}$. Φαίνεται δηλαδή πως μεταβάλλεται το θερμοκρασιακό πεδίο για τα διάφορα σημεία του μήκους του ελάσματος καθώς προχωρά η δέσμη.



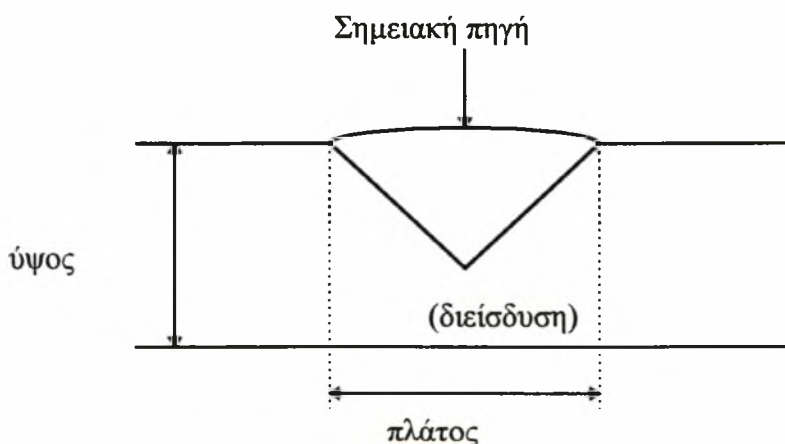
Σχήμα 6.4 : Θερμοκρασιακό πεδίο του δοκιμίου B5 καθώς κινείται η δέσμη με ταχύτητα 400mm/min, σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές

6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ D36 ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως προαναφέραμε η περιοχή χρήσης του μοντέλου περιορίζεται στην περιοχή όπου : $y > r_b$. Συνήθως η λίμνη συγκόλλησης, στη συγκόλληση laser, είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με την ακτίνα της δέσμης. Στη συγκόλληση ελασμάτων πάχους 4mm η λίμνη συγκόλλησης είναι τουλάχιστον διπλάσια από την ακτίνα της δέσμης. Συνεπώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα προγράμματα Fortran για να βρούμε το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης. Αυτό που κάνουμε είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προγράμματος με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η μεθοδολογία που θα ακολουθήσουμε περιγράφεται παρακάτω: Αρχικά ελέγχουμε το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης από τα πειραματικά δεδομένα. Για παράδειγμα, για το δοκίμιο B1 το μέγεθος της λίμνη συγκόλλησης είναι:

Πλάτος της λίμνης συγκόλλησης = 3,8mm Ύψος της λίμνης συγκόλλησης = 2,9mm

Τα δύο μεγέθη φαίνονται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα όπου η μορφή της λίμνης συγκόλλησης είναι ένα ισοσκελές τρίγωνο.



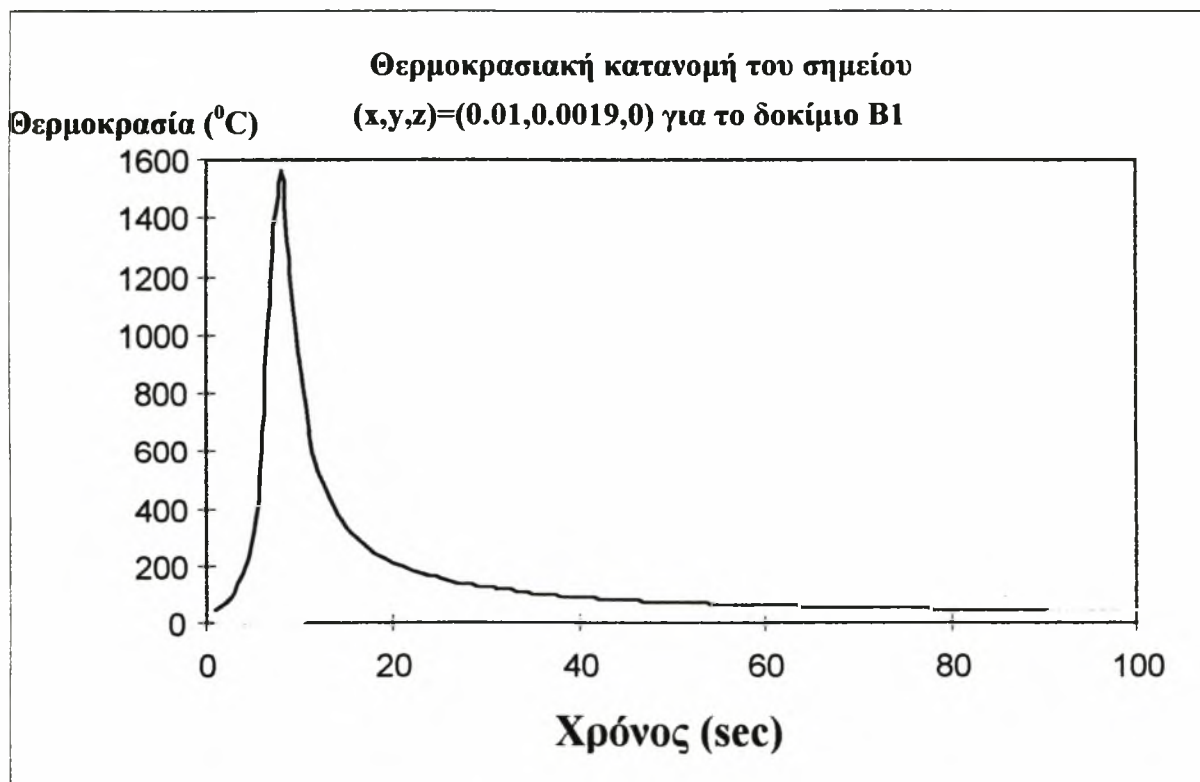
Σχήμα 6.5 : Μορφή της λίμνης συγκόλλησης

Η σημειακή πηγή κτυπάει το κομμάτι ακριβώς στο μέσο του πλάτους της λίμνη συγκόλλησης. Συνεπώς θα προσπαθήσουμε να βρούμε την θερμοκρασιακή κατανομή του σημείου $(x, y, z) = (x, \text{πλάτος} / 2, 0)$. Εάν από την κατανομή αυτή, σε σχέση με τον χρόνο, βρεθεί ότι σε μια δεδομένη χρονική στιγμή η θερμοκρασία ξεπερνά την θερμοκρασία τήξης T_m τότε η θεωρητική λύση συμπίπτει με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει, ανάλογα με την μέγιστη θερμοκρασία, να βρούμε το κατάλληλο y ώστε

μόλις να ξεπερνούμε την θερμοκρασία τήξης. Τα αποτελέσματα του προγράμματος φαίνονται στο παρακάτω πίνακα, ενώ στο σχήμα 6.4 φαίνεται η κατανομή θερμοκρασίας για το δοκίμιο B1 και για το σημείο $(x, y, z) = (x, 1.9\text{mm}, 0)$. Η επιλογή του x είναι αυθαίρετη αφού δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα που θέλουμε να ελένξουμε.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΧΡΟΝΟΣ
46.634380	1.000000E-04
67.793370	4.501045E-01
105.389700	9.001091E-01
175.222700	1.350114
312.828200	1.800118
601.906900	2.250123
1172.595000	2.700127
1562.825000	3.150132
1214.745000	3.600136
874.061500	4.050141
664.959200	4.500145

Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης για δοκίμιο B1 στο σημείο $(0.01, 0.0019, 0)$



Σχήμα 6.6 : Παράδειγμα θερμοκρασιακής κατανομής του δοκιμίου B1

Στον πίνακα 6.1 φαίνεται ότι μετά από 3.15 sec η θερμοκρασία του σημείου που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια και σε απόσταση 0.0019m από το κέντρο της δέσμης μόλις έχει ξεπεράσει την θερμοκρασία τήξης, που είναι 1500°C. Για να εξάγουμε τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Fortran domiki.for και τα δεδομένα που δώσαμε ήταν τα ακόλουθα:

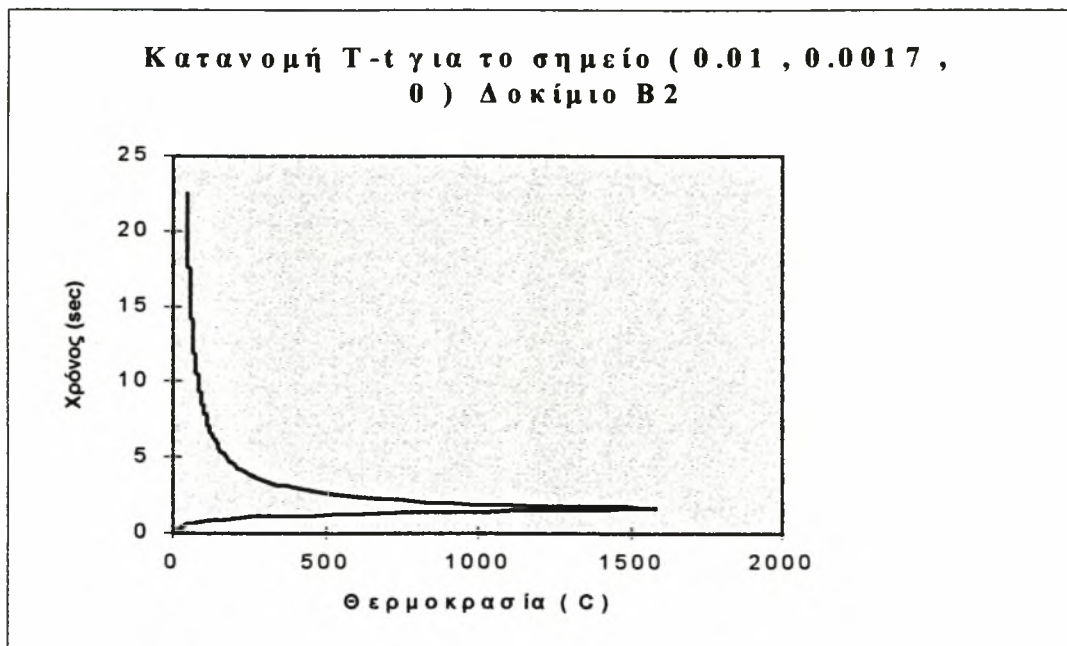
Θερμική αγωγιμότητα = 50 W/mK
Θερμοδιαχυτότητα = 0.00001389 m ² /sec
Αρχική θερμοκρασία = 15°C
*** Οι διαστάσεις του ελάσματος εκλέγονται αυθαίρετα
Q=1140W και u=200mm/min
x=0.01 y=0.0019 z=0.0

Πίνακας 6.2 : Δεδομένα και ιδιότητες για τον χάλυβα D36 και για την συγκόλληση laser του δοκιμίου B1

Από τις πειραματικές μετρήσεις το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης είναι 3.8mm πράγμα που αποδεικνύει ότι ακριβώς και η αναλυτική λύση. Παρακάτω παρουσιάζουμε την ίδια ακριβώς μελέτη για το δοκίμιο B2 και στην συνέχεια κάνουμε μια σύγκριση των πειραματικών με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

Θερμοκρασία -Χρόνος	
18.091180	1.000000E-04
22.334230	2.273727E-01
32.851250	4.546455E-01
59.986950	6.819182E-01
133.976300	9.091910E-01
349.498400	1.136464
954.878400	1.363736
1581.196000	1.591009
1247.824000	1.818282
894.196100	2.045555
679.932200	2.272827
545.487200	2.500100
454.955400	2.727373

Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα της αναλυτικής λύσης για το δοκίμιο B2 στο σημείο όπου y=0.0017



Σχήμα 6.7 : Παράδειγμα θερμοκρασιακής κατανομής του δοκιμίου B2

Όπως φαίνεται παραπάνω, για τα δοκίμια B1 και B2, η αναλυτική λύση δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά με τα πειραματικά. Στο δοκίμιο B1 σχεδόν συμπίπτουν, ενώ στο δοκίμιο B2 η απόκλιση είναι πολύ μικρή, αφού το θεωρητικό αποτέλεσμα θεωρεί ότι η λίμνη συγκόλλησης αρχίζει στο σημείο $y = 0.0017$ ενώ στην πραγματικότητα η αρχή της λίμνης συγκόλλησης είναι στο σημείο $y=0.0015$.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ της αναλυτικής λύσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων για την δεύτερη σειρά των δοκιμών. Επίσης δίδονται συνολικά τα πειραματικά αποτελέσματα.

Αρ.Δοκιμίου	Διείσδυση (mm)	Πλάτος Θ.Ε.Ζ (mm)	Πλάτος λίμνης συγκόλλησης (mm)
B1	2,9	1,5	3,8
B2	2,8	0,85	2,8
B3	2,2	0,6	2,6
B4	full	1,4-2,4	4,7
B5	ful	1-1,4	3,3
B6	3,6	0,45	2,8
B7	drop-out	drop-out	drop-out
B8	full	1,5	3,6
B9	full	1	2,7
B10	3,5	0,53	2,5
B11	3,2	0,8	4

B12	2,8	0,48	2,8
B13	2,5	0,2	1,8
B14	full	1,4	4
B15	3,4	1	3,5
B16	3	0,6	2,1
B17	full	2,17	4,35
B18	full	1,1	3,6
B19	3,8	0,6	2,2
B20	3,2	1	3,8
B21	2,8	0,5	2,8
B22	1,9	0,3	2,5
B23	drop-out	drop-out	drop-out
B24	full	1,0	3,4
B25	3,6	0,5	2,5
B26	full	2	4,4
B27	full	0,9	3,4
B28	3,9	0,6	2,3
B29	3,6	0,4	2,1

Πίνακας 6.4 : Πειραματικά αποτελέσματα της 2^{ης} σειράς των συγκολλήσεων (όπως αυτά καταγράφηκαν με την βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου)

Αρ. Δοκιμίου	Αποτελέσματα αναλυτικής λύσης (mm)	Πειραματικά αποτελέσματα (mm)
B1	1,9	1,9
B2	1,7	1,4
B3	1,55	1,3
B4	2,4	2,35
B5	1,95	1,65
B6	1,75	1,4
B7	drop-out	drop-out
B8	2,1	1,8
B9	1,9	1,35
B10	1,65	1,25
B11	2	2
B12	1,65	1,4

B13	1,5	1
B14	2,5	2
B15	2	1,75
B16	1,8	1,1
B17	2,45	2,2
B18	2,2	1,8
B19	1,85	1,1
B20	1,95	1,9
B21	1,6	1,4
B22	1,5	1,25
B23	drop-out	drop-out
B24	2,15	1,7
B25	1,8	1,3
B26	2,55	2,2
B27	2,2	1,7
B28	1,9	1,2
B29	1,7	1,1

Πίνακας 6.5 : Σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της αναλυτικής λύσης και των πειραμάτων για το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης ($z=0$).

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις η αναλυτική λύση δίδει πολύ ορθά αποτελέσματα και συγκρινόμενη με τα πειραματικά υπάρχει μια διαφορά της τάξης του ενός ή δύο δεκάτων του χιλιοστού. Μάλιστα φαίνεται ξεκάθαρα η επιρροή της παραδοχής της σημειακής πηγής θερμότητας, στο ότι τα αποτελέσματα αποκλίνουν από την πραγματικότητα όσο πλησιάζουμε την δέσμη. Η αναλυτική λύση μπορεί να εφαρμοσθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια σε περιοχές μακριά από την δέσμη. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν για την επιφάνεια του ελάσματος όπου $z=0$. Με την ίδια ακριβώς μεθοδολογία θα κάνουμε την σύγκριση και για την διείσδυση. Αυτό που θέλουμε να επιτύχουμε σε μια συγκόλληση laser είναι η πλήρης διείσδυση, δηλαδή να λιώσει το μέταλλο σε όλο το πάχος του.

Αρ.Δοκιμίου	Σημείο Εστίασης	Διείσδυση-θεωρητικά αποτελέσματα (mm)	Διείσδυση-Πειραματικά αποτελέσματα (mm)
B1	-1	2	2,9
B2	-1	1,9	2,6
B4	-1	2,4	full (undercut)
B9	-1	2	3,8
B11	0	2,1	3,2
B12	0	1,9	2,8
B19	0	2	3,6
B22	-2	1,5	1,9
B26	-2	2,75	full(=4,0)

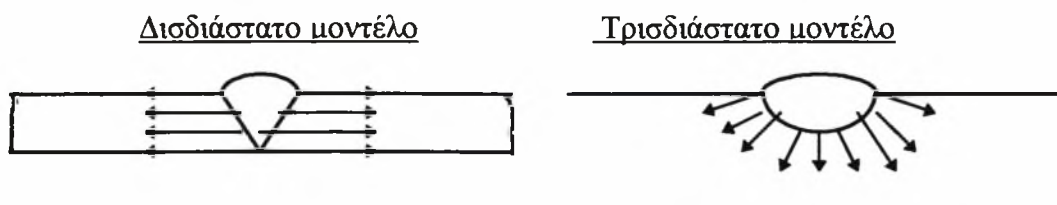
Πίνακας 6.6 : Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για την διείσδυση.

Στον πίνακα 5.6 φαίνεται ότι η αναλυτική λύση δεν μπορεί να εφαρμοσθεί για την εκτίμηση της διείσδυσης. Επίσης δίδεται και το σημείο εστίασης όπου φαίνεται ότι όταν το σημείο εστίασης πλησιάζει στην επιφάνεια του υλικού μειώνεται η απόκλιση από την πραγματική λύση. Αυτό έχει μια λογική εξήγηση αφού η προτεινόμενη αναλυτική λύση δεν λαμβάνει υπόψη το σημείο εστίασης της δέσμης. Έτσι λοιπόν εφαρμόζουμε την αναλυτική λύση για την 1^η σειρά των δοκιμίων όπου το σημείο εστίασης είναι 1mm πάνω από την επιφάνεια του ελάσματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.7 όπου παρατηρούμε ότι η απόκλιση είναι σχετικά μικρή. Μια ακόμη παρατήρηση είναι η απόκλιση των αποτελεσμάτων για τα δοκίμια, τα οποία έχουν υποστεί πλήρη διείσδυση. Και αυτή η απόκλιση οφείλεται στις παραδοχές που κάναμε για την εξαγωγή της αναλυτικής λύσης και συγκεκριμένα στην υπόθεση της τρισδιάστατης ροής θερμότητας.

Πιο συγκεκριμένα, η αναλυτική λύση μπορεί να υπολογίσει με καλή ακρίβεια το θερμοκρασιακό πεδίο αρκεί να υπάρχει ροή θερμότητας και προς τις τρεις κατευθύνσεις. Όταν έχουμε πλήρη διείσδυση, δηλαδή τήξη του υλικού σε όλο του το πάχος, τότε η ροή θερμότητας είναι διδιάστατη και η αναλυτική λύση μεταβάλλεται. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται παραστατικά στο σχήμα 6.6

Αρ Δοκιμίου	Διείσδυση- Αναλυτική λύση	Διείσδυση-Πειραματικά αποτελέσματα
A1	1,35	1,35
A2	1,8	2,14
A3	-	-
A4	2,5	full
A5	1,68	1,8
A6	1,85	2,0
A7	2,1	2,8
A8	2,4	3,05

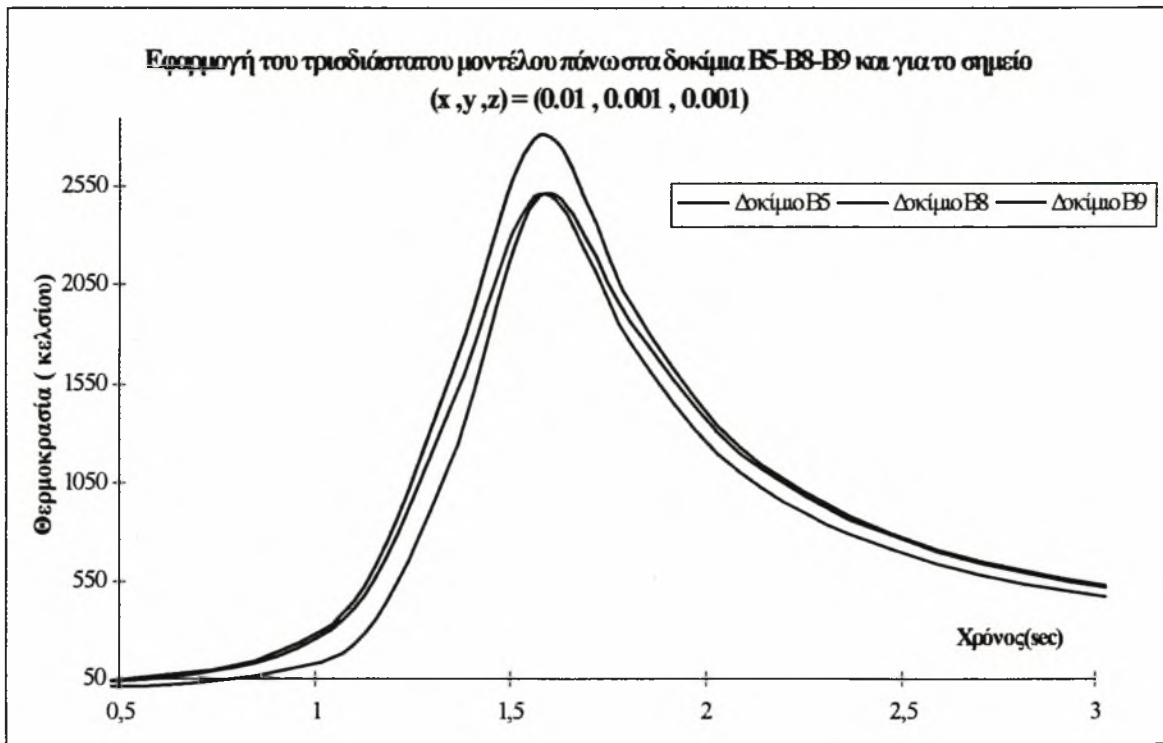
Πίνακας 6.7 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων για την 1^η σειρά δοκιμίων (σημείο εστίασης = +1mm)



Όπως φαίνεται παραπάνω η ροή θερμότητας, στο λεπτό έλασμα όπου έχουμε πλήρη διείσδυση, γίνεται μόνο προς τις δύο κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να μεταβαίνουμε από το 3-D στο 2-D μοντέλο.

Σχήμα 6.8 : Αιτία απόκλισης του αναλυτικού μοντέλου από την πραγματική λύση στα δοκίμια όπου έχουμε πλήρη διείσδυση.

Ως συμπέρασμα για την χρησιμότητα του προγράμματος μπορούμε να πούμε ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του πλάτους της ζώνης τήξης στο σημείο $z=0$. Θέλει ιδιαίτερη προσοχή η χρησιμοποίησή του διότι κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εντελώς λανθασμένα. Στο σχήμα 6.8 φαίνεται η εφαρμογή του τρισδιάστατου μοντέλου σε τρία επιλεγμένα δοκίμια (B5-B8-B9).

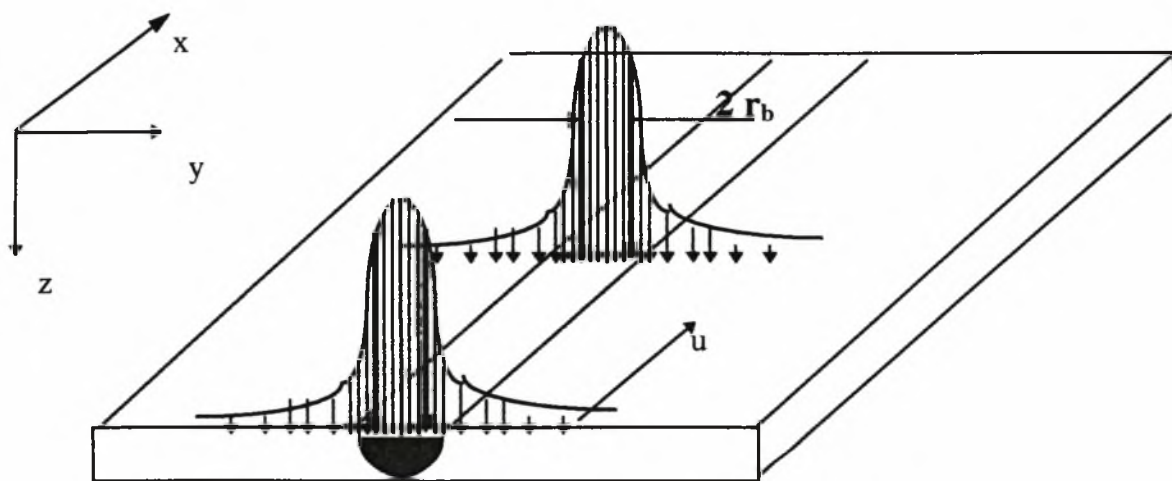


Σχήμα 6.8 : Ρυθμοί ψύξης για τα δοκίμια B5-B8-B9 σύμφωνα με το μοντέλο 3-D

6.4 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ

Η συγκόλληση με τη χρησιμοποίηση δέσμης LASER είναι μία κατεργασία η οποία είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί. Εάν υποθέσουμε ότι τα φαινόμενα τήξης δεν επηρεάζουν το συνολικό αποτέλεσμα τότε η μετάδοση θερμότητας, συμβαίνει μόνο μέσω αγωγής προς το εσωτερικό του υλικού. Εάν λοιπόν οι θερμικές ιδιότητες του υλικού καθώς και η απορροφούμενη από αυτό ενέργεια είναι γνωστές, τότε είναι δυνατόν να προϋπολογισθεί η κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υπό κατεργασία τεμαχίου. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, αφού έτσι δίνεται η δυνατότητα να γνωρίζουμε εκ των προτέρων το βάθος μέχρι το οποίο έχει επέλθει η τήξη ώστε να επιλέξουμε αν θα έχουμε πλήρη διείσδυση ή όχι.

Το πέρασμα της δέσμης LASER πάνω από την επιφάνεια του υλικού, κατά την εκτέλεση της κατεργασίας, φαίνεται στο σχήμα 6.9:



Σχήμα 6.9: Η δέσμη LASER κινούμενη με ταχύτητα u προς την κατεύθυνση x επάνω στην επιφάνεια του τεμαχίου

Όταν μία δέσμη LASER ισχύος q και ακτίνας r_b κινείται προς την κατεύθυνση x , με ταχύτητα u , επάνω από την επιφάνεια ενός στερεού, ένα τυχαίο σημείο με συντεταγμένες (y,z) κάτω από την επιφάνεια, υπόκειται σε ένα θερμικό

κύκλο $T(y,z,t)$, όπου t είναι ο χρόνος. Η ενέργεια της δέσμης LASER η οποία προσπίπτει στο στερεό θερμαίνει την επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια ψύχεται απότομα, καθώς η δέσμη συνεχίζει να κινείται.

Οι Ashby και Easterling προτείνουν το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο, το οποίο υπολογίζει την κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κατανομή της θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους (z) και του χρόνου (t) δίνεται από την εξίσωση:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{Aq}{2\pi\lambda u[(t+t_0)]^{1/2}} \times \exp\left[-\frac{(z+z_0)^2}{4at}\right] \quad (6.18)$$

όπου:

T_0 ... η αρχική μέση θερμοκρασία του τεμαχίου

A ... συντελεστής απορροφητικότητας της επιφάνειας του τεμαχίου

q ... ισχύς της δέσμης LASER

u ... ταχύτητα της δέσμης LASER

λ ... συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού του τεμαχίου

$t_0 = (rb^2)/(4\alpha)$

r_b ... ακτίνα της δέσμης LASER

α ... θερμοδιαχυτότητα του υλικού του τεμαχίου

$e=2.718$

Η σταθερά t_0 εκφράζει το χρόνο που απαιτείται ώστε η θερμότητα να διαχυθεί σε μία απόσταση ίση με την ακτίνα της δέσμης LASER. Όσον αφορά τη σταθερά z_0 , αυτή εκφράζει την απόσταση μέχρι την οποία προλαβαίνει να διαχυθεί η θερμότητα, κατά τη διάρκεια του χρόνου αλληλεπίδρασης της δέσμης LASER με το σημείο της επιφάνειας (x,y), το οποίο εξετάζεται κάθε φορά. Ο χρόνος αυτός έχει ουσιαστικά την τιμή r_b/u .

Η σταθερά z_0 δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις:

I. εάν $t \ll t_0$ τότε είναι:

$$z_0^2 = \frac{\pi\alpha r_b}{2eu} \quad (6.19)$$

II. εάν $t \gg t_0$, τότε είναι:

$$z_0^2 = \frac{\pi^{1/2} r_b}{e} \left(\frac{\alpha r_b}{u} \right)^{1/2} \quad (6.20)$$

Το μαθηματικό μοντέλο των Ashby και Easterling λαμβάνει υπόψη και την περίπτωση όπου ένα μέρος της επιφάνειας τήκεται. Όταν έχουμε τήξη στην επιφάνεια του υλικού, ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται σαν λανθάνουσα θερμότητα από το υγρό το οποίο σχηματίζεται. Αν και η ενέργεια αυτή απελευθερώνεται αργότερα, προσωρινά αφαιρείται από την προσδιδόμενη ενέργεια και δεν είναι διαθέσιμη για να τήξει και άλλη ποσότητα υλικού. Ο όγκος του υλικού που τήκεται, ανά δευτερόλεπτο, ισούται με $2\Gamma_b z_m u$, όπου z_m είναι το βάθος μέχρι το οποίο έχουμε τήξη. Επομένως η ενέργεια που απομένει διαθέσιμη για να ανεβάσει την θερμοκρασία του υπόλοιπου στερεού δίδεται από τη σχέση:

$$q^* = q - 2\Gamma_b z_m u L \quad (6.21)$$

όπου: L είναι η λανθάνουσα θερμότητα του υλικού ανά μονάδα όγκου. Η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο βάθος z_m προκύπτει και πάλι χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (6.) και (6.) ή (6.), αυτή τη φορά όμως αντικαθιστώντας το q με το q^* .

Επίσης, είναι χρήσιμο, για κάποια δεδομένη ισχύ δέσμης q και ακτίνα δέσμης r_b , να γνωρίζουμε την ποσότητα της ενέργειας η οποία θα προκαλέσει την τήξη της επιφάνειας. Η ενέργεια αυτή δίδεται ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού και καθορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{q}{ur_b} = \frac{\pi^3}{4} \left[\frac{(T_m - T_0)r_b}{A} \right]^2 \frac{\rho c \lambda}{q} \quad (6.22)$$

όπου T_mθερμοκρασία τήξης του υλικού

ρπυκνότητα του υλικού

cειδική θερμότητα του υλικού

Όπως είναι φανερό, για μία σημειακή πηγή ενέργειας τα t_0 και z_0 μηδενίζονται, με

αποτελεσμα το μοντέλο αυτό να καταλήγει ουσιαστικά στην εξίσωση Rosenthal. Όταν όμως το πλάτος της δέσμης ($2r_0$) είναι συγκρίσιμο ή ακόμη και μεγαλύτερο από το βάθος της σκληρυμένης ζώνης κάτω από την επιφάνεια του υλικού, τότε τα t_0 και z_0 είναι μη μηδενικά και συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιείται η εξίσωση του μαθηματικού μοντέλου, όπως δόθηκε παραπάνω.

Στην ουσία το μοντέλο των Ashby και Easterling θεωρεί ότι υπάρχει μετάδοση θερμότητας μόνο προς την κατεύθυνση του βάθους z του υλικού. Είναι δηλαδή ένα μοντέλο μονοδιάστατης μετάδοσης θερμότητας. Επίσης στην εξίσωση του μοντέλου λαμβάνεται υπόψη και ο χρόνος t . Σαν αρχή μέτρησης του χρόνου ορίζεται, για κάποιο τυχαίο σημείο της επιφάνειας με συντεταγμένες (x,y) , η στιγμή κατά την οποία η δέσμη LASER φτάνει πάνω στο σημείο αυτό.

Με απλά λόγια αυτό σημαίνει το εξής:

Εάν θεωρήσουμε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ($z=ct$) κάτω από την επιφάνεια του υλικού, τότε μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας για το επίπεδο αυτό σε συνάρτηση με το χρόνο.

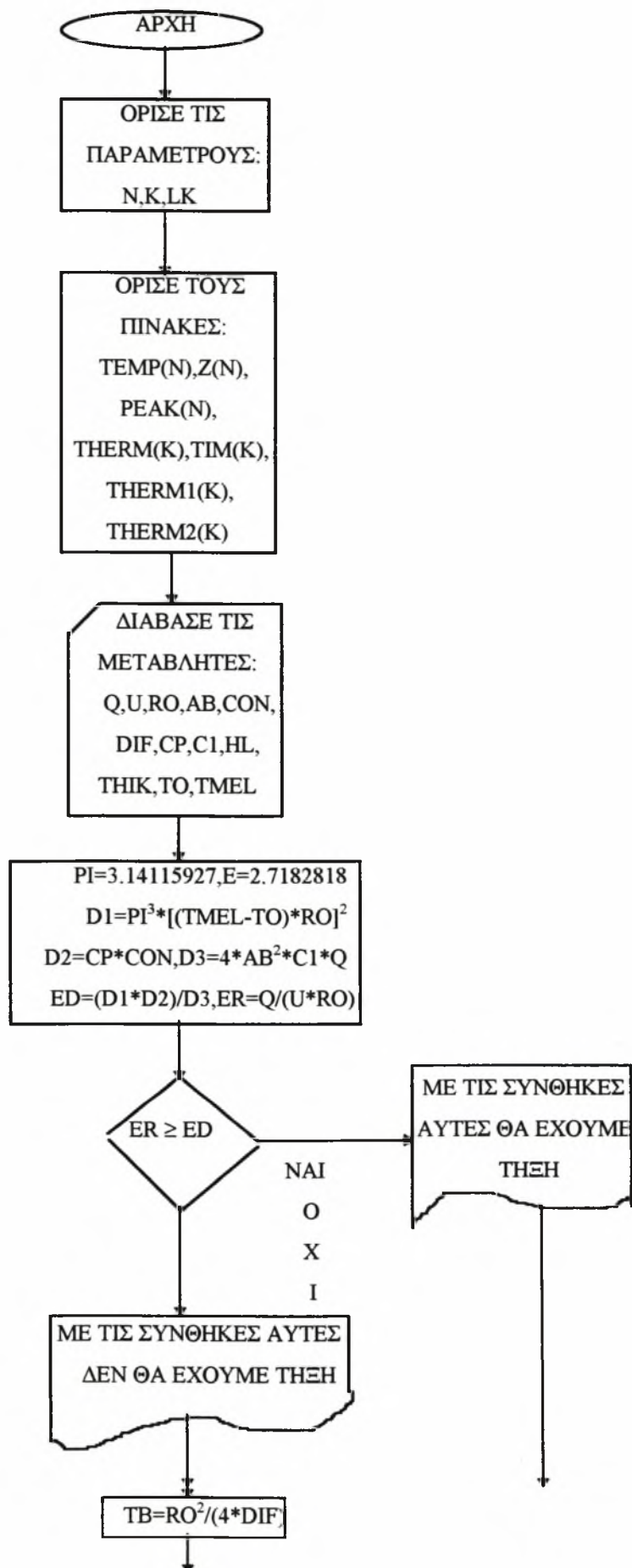
εάν θεωρήσουμε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή ($t=ct$), τότε μπορεί να υπολογισθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας για τη χρονική στιγμή αυτή σε συνάρτηση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια.

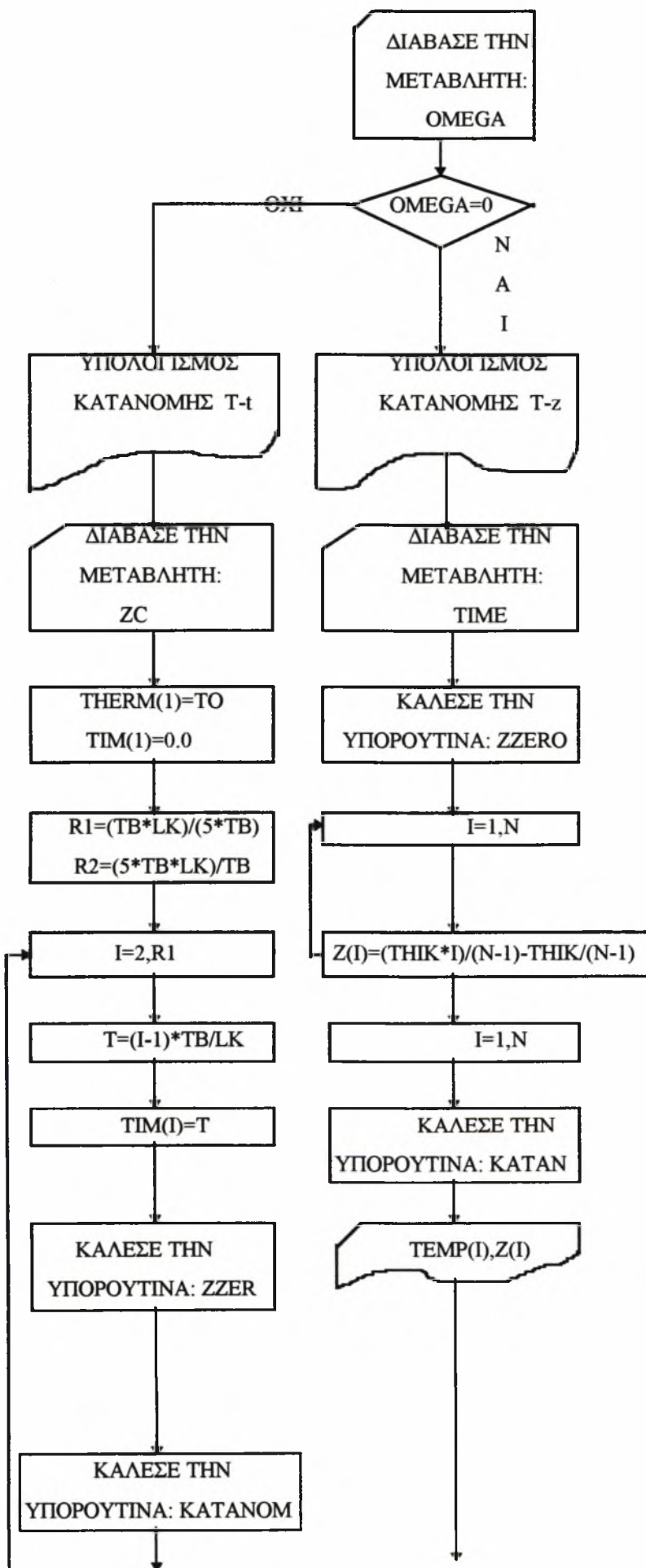
Βεβαίως στην πραγματικότητα υπάρχει μετάδοση θερμότητας και προς τις τρεις κατευθύνσεις του χώρου. Για το λόγο αυτό το μοντέλο των Ashby και Easterling είναι ένα προσεγγιστικό μοντέλο. Πιστεύουμε όμως ότι τα αποτελέσματα που δίνει βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματικότητα, γεγονός που θα προσπαθήσουμε να αποδείξουμε και με την εκτέλεση πειραμάτων. Πάντως εάν η απαιτούμενη ακρίβεια των υπολογισμών είναι μεγαλύτερη θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ή κάποιο τρισδιάστατο μοντέλο.

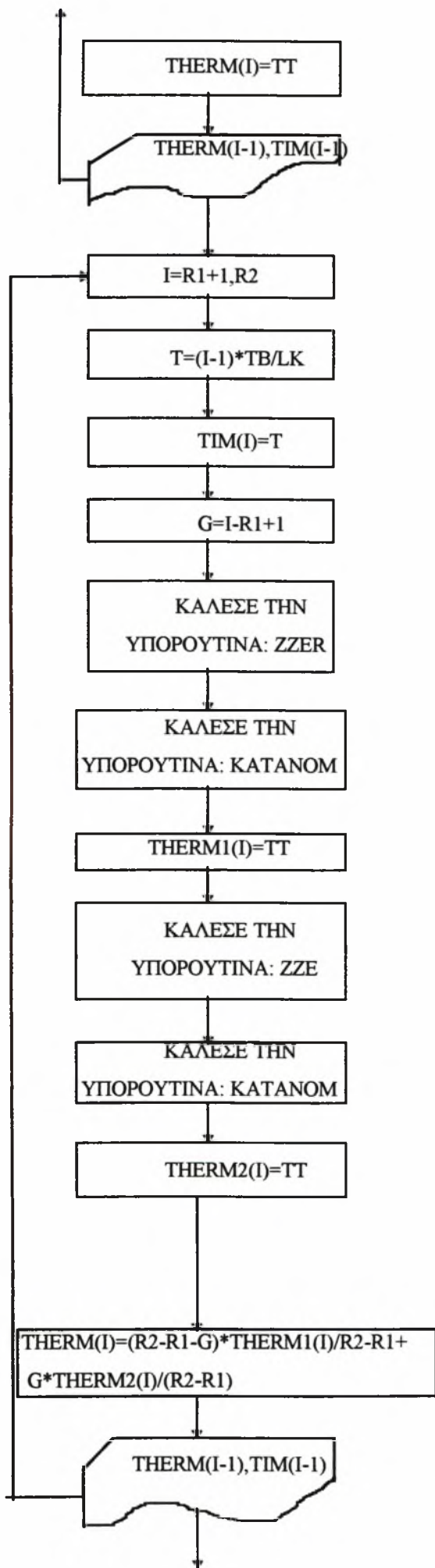
Θα πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθούν οι παραδοχές που γίνονται, για την χρησιμοποίηση του μαθηματικού μοντέλου των Ashby και Easterling:

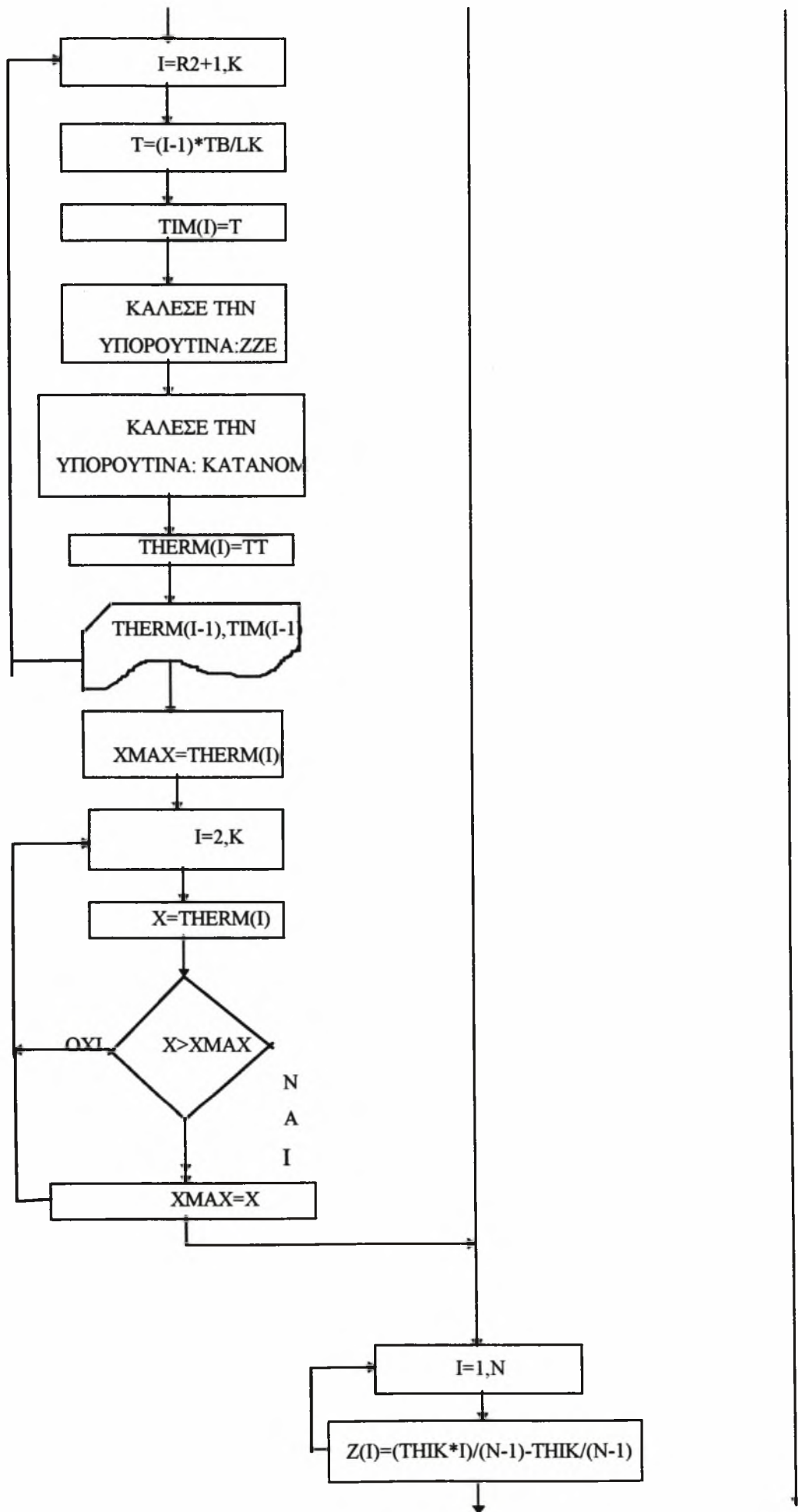
- 1) Η θερμότητα μεταδίδεται μόνο προς την κατεύθυνση του βάθους του υλικού (άξονας z).
- 2) Η κατανομή ενέργειας στην δέσμη LASER είναι Gaussian.
- 3) Οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού δεν μεταβάλλονται με την θερμοκρασία.

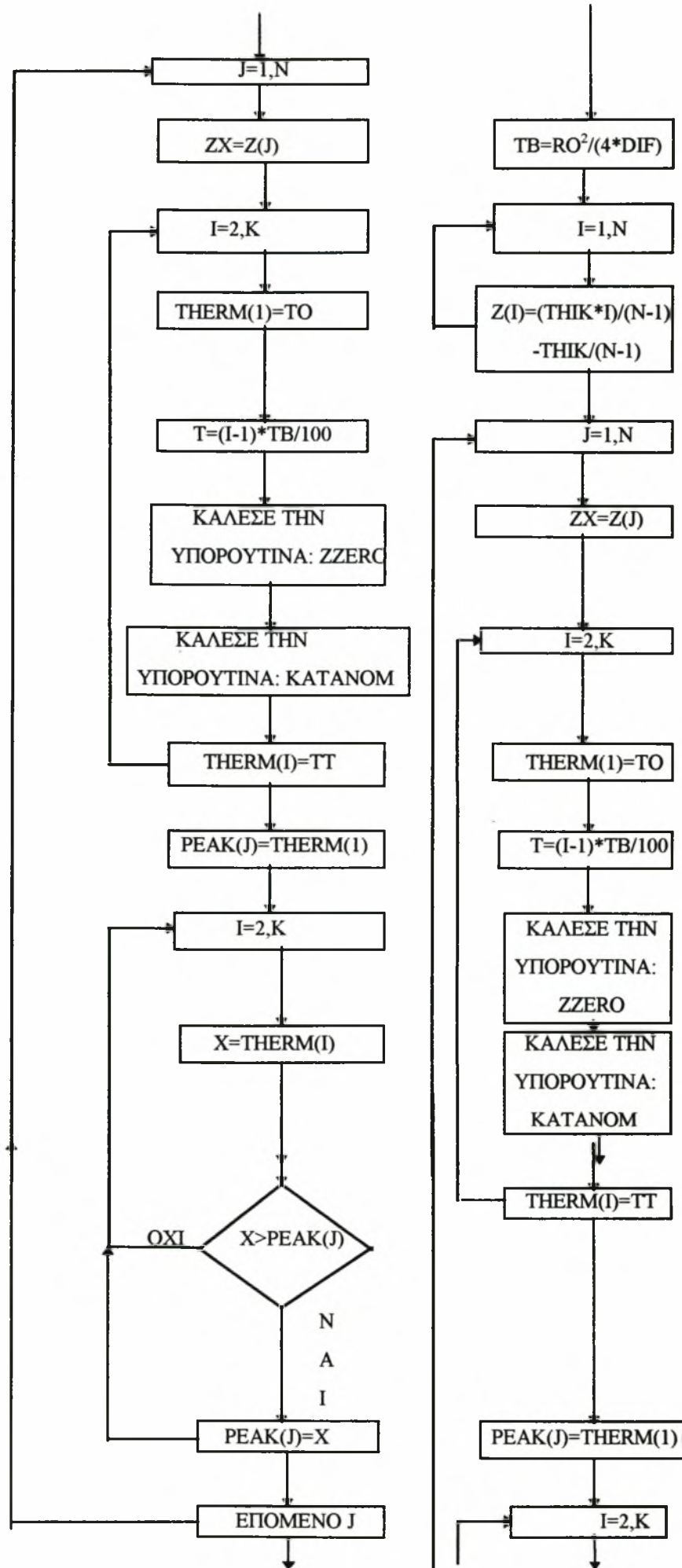
6.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

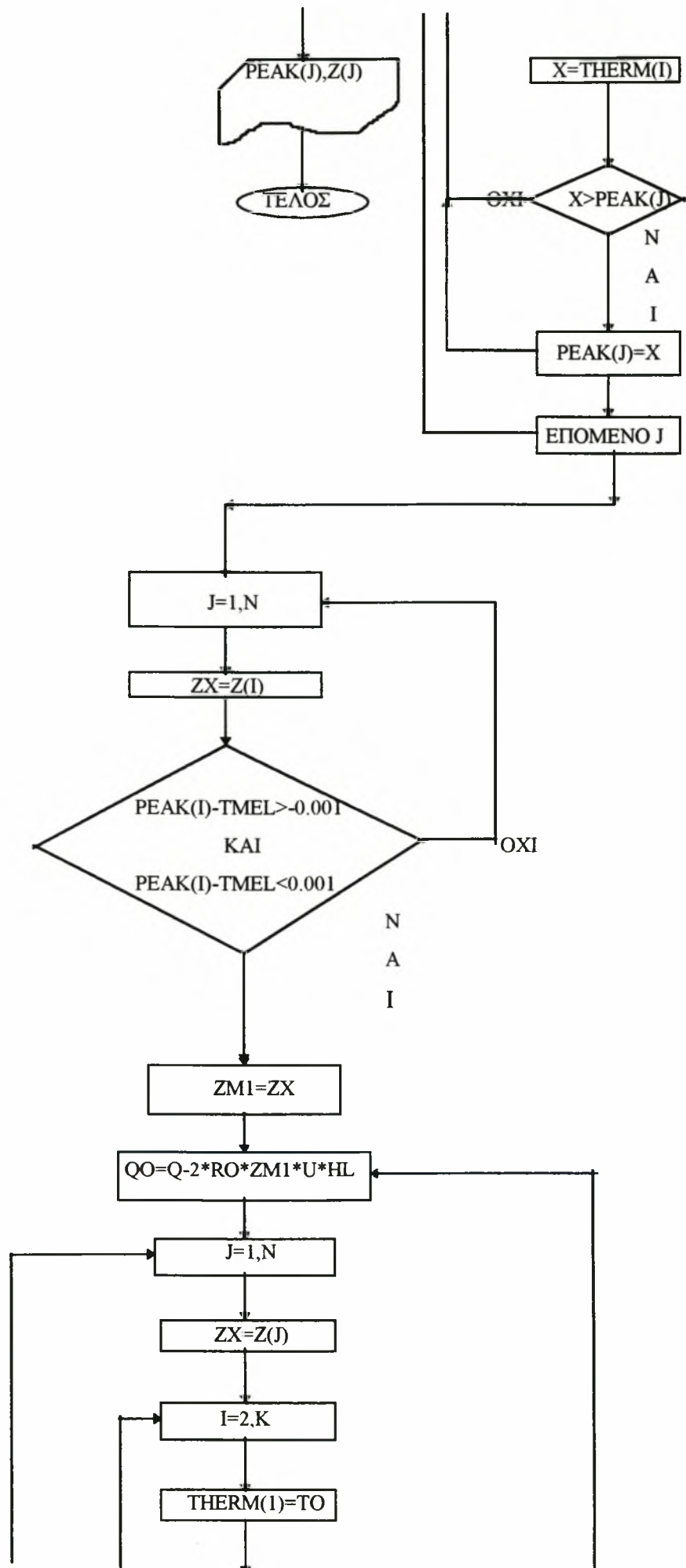


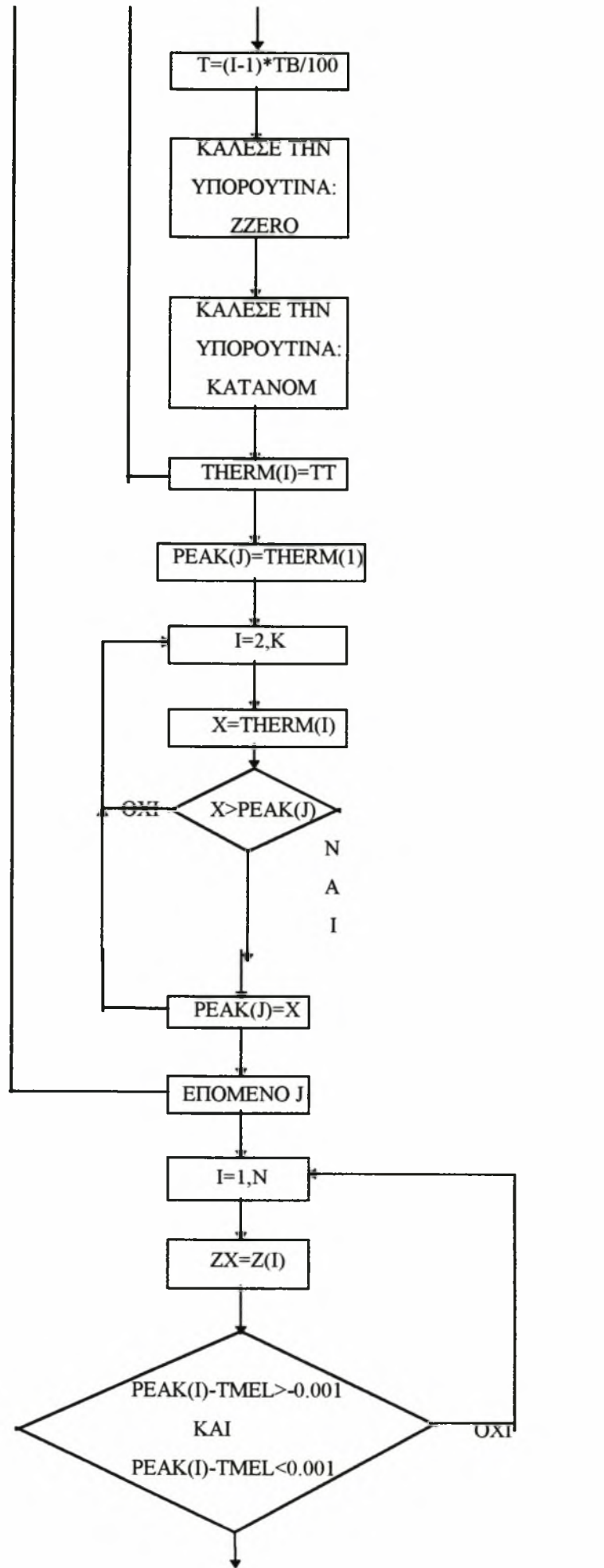


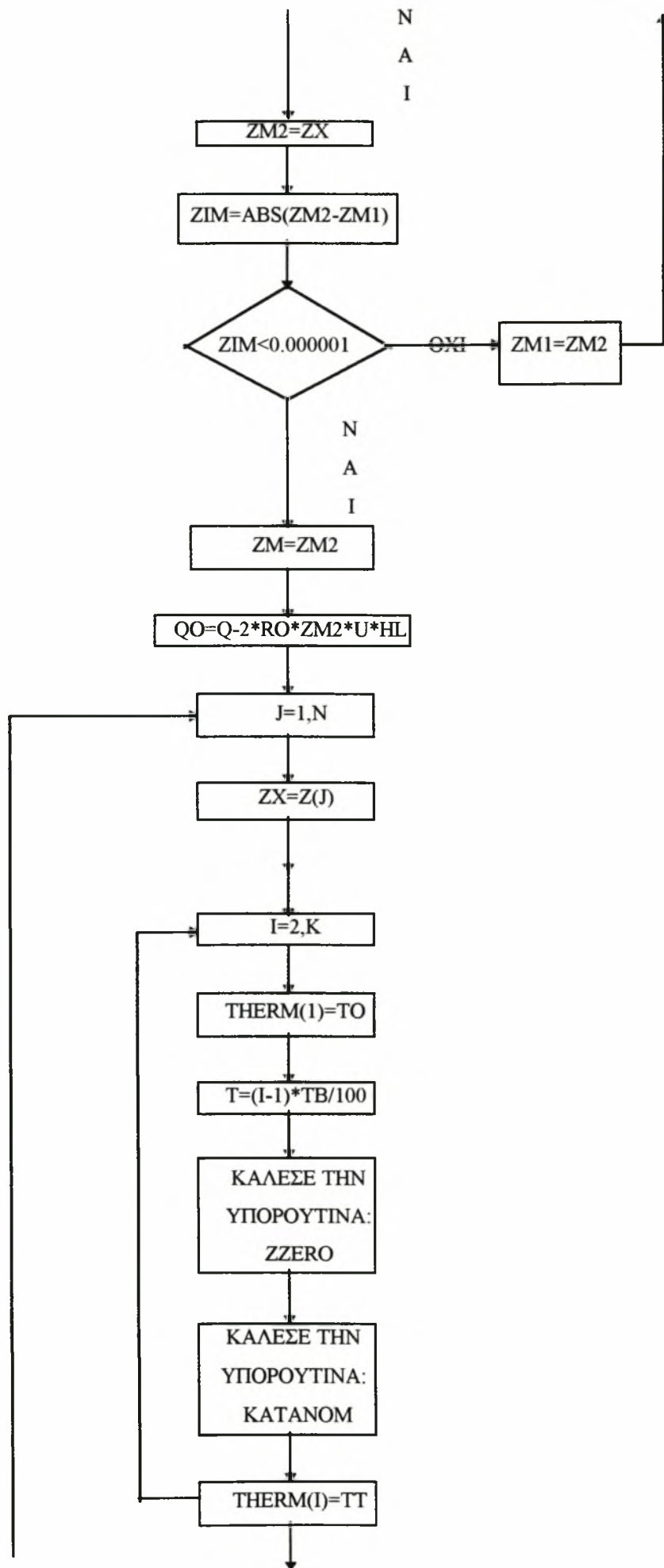


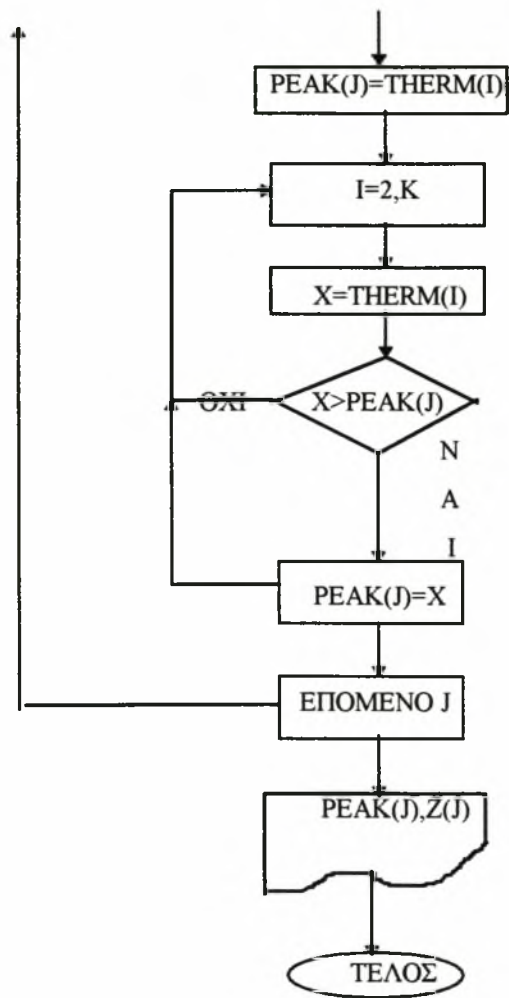












6.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ FORTRAN (DIP.FOR) ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο σημείο αυτό θα προσπαθήσουμε να δώσουμε μια αναλυτική περιγραφή του προγράμματος FORTRAN αναλύοντας κάθε βήμα ξεχωριστά. Αρχικά παρουσιάζουμε τον συμβολισμό των διάφορων παραμέτρων. Έτσι έχουμε :

Q.....Ισχύς της δέσμης
U.....ταχύτητα της δέσμης
RO.....ακτίνα της δέσμης
AB.....συντελεστής απορροφητικότητας
CON.....συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
DIF.....συντελεστής θερμοδιαχυτότητας
CP.....ειδική θερμότητα X πυκνότητα
C1.....συντελεστής
HL.....λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου
THIK.....πάχος ελάσματος
TO.....αρχική θερμοκρασία
TMEL.....θερμοκρασία τήξης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την κατάρτιση του προγράμματος.

ΒΗΜΑ 1ο : Ελέγχουμε αν έχουμε τήξη

ΒΗΜΑ 2ο : Αν δεν έχουμε τήξη επιλέγουμε την κατανομή που θέλουμε να βρούμε. Για να υπολογίσουμε την απαιτούμενη κατανομή θα πρέπει κάθε φορά να κρατάμε σταθερό τον έναν από τους δύο παράγοντες (χρόνος, βάθος).

ΒΗΜΑ 3ο : Κατανομή T-z για συγκεκριμένο χρόνο t

Καλούμε την υπορουτίνα ZZERO με την βοήθεια της οποίας βρίσκουμε το Z_0 . Αφού βρούμε το Z_0 διακριτοποιούμε το βάθος του ελάσματος στον απαιτούμενο αριθμό σημείων. Στη συνέχεια για κάθε σημείο καλούμε την υπορουτίνα KATAN ώστε να βρούμε

την συγκεκριμένη θερμοκρασία στο συγκεκριμένο σημείο. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία τόσες φορές όσες είναι ο αριθμός των σημείων διακριτοποίησης.

ΒΗΜΑ 4ο : Κατανομή T-t για συγκεκριμένο βάθος z

Και πάλι θα πρέπει να διακριτοποιήσουμε τον χρόνο σε έναν αριθμό σημείων. Καλούμε την υπορουτίνα ZZER με την βοήθεια της οποίας βρίσκουμε το z_0 . Στη συνέχεια, με την βοήθεια ενός βρόχου βρίσκουμε την υπορουτίνα KATANOM ώστε να βρούμε την θερμοκρασία στο συγκεκριμένο χρόνο και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία τόσες φορές όσες ο αριθμός των διακριτοποιήσεων. Προσοχή!! Ενώ στην κατανομή T-z η υπορουτίνα ZZERO ήταν εκτός του επαναληπτικού βρόχου, εδώ η υπορουτίνα ZZER είναι εντός. Αυτό γίνεται διότι για τον υπολογισμό του παράγοντα z_0 πρέπει να γνωρίζουμε τον χρόνο t_0 ώστε να επιλέξουμε την περιοχή στην οποία βρισκόμαστε, καθ' ότι : Για $t \gg t_0$ βρίσκουμε διαφορετική τιμή του z_0 απ' ότι για $t \ll t_0$. Επειδή από την αναλυτική λύση ήταν δύσκολο να υπολογίσουμε πόσο μεγάλα είναι τα όρια μέσα στα οποία ισχύει η μία ή η άλλη σχέση υπολογισμού του z_0 κάναμε το εξής: Χωρίσαμε την περιοχή μας σε 3 υποπεριοχές. Το μέγεθος κάθε περιοχής ορίστηκε εμπειρικά. Για κάθε περιοχή πήραμε εκείνο το z_0 που διέπει την συγκεκριμένη περιοχή. Δηλαδή για την 1η περιοχή πήραμε το z_0 που ισχύει για $t \ll t_0$. Ομοίως και για την 3η περιοχή όπου $t \gg t_0$. Για την 2η περιοχή (ενδιάμεσα) βρήκαμε, για κάθε σημείο, και τα δύο z_0 και με την βοήθεια της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής βρίσκουμε την θερμοκρασιακή κατανομή για την περιοχή αυτή.

ΒΗΜΑ 5ο : Υπολογίζουμε τις μέγιστες θερμοκρασίες σε κάθε βάθος z_0 . Είναι πάρα πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τις τιμές των μέγιστων θερμοκρασιών διότι μπορούμε να έχουμε μία πρώτη εκτίμηση για το βάθος της ζώνης τήξης.

ΒΗΜΑ 6ο : Αν έχουμε τήξη τότε ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

Βρίσκουμε το τελευταίο σημείο ZM, στο οποίο η μέγιστη θερμοκρασία έχει ξεπεράσει την θερμοκρασία τήξης. Γι' αυτό το σημείο βρίσκουμε την θερμότητα που προσδίδεται στο έλασμα, αφαιρώντας την λανθάνουσα θερμότητα τήξης ανά μονάδα όγκου ($Q_0 = Q - 2 \cdot R_0 \cdot Z \cdot U \cdot H_L$ όπου $Z = ZM1$). Με βάση την προσδιδόμενη θερμότητα Q_0 βρίσκουμε τις μέγιστες θερμοκρασίες για κάθε βάθος Z. Ελέγχουμε ποιες από αυτές είναι μεγαλύτερες από την θερμοκρασία τήξης. Για το τελευταίο ZM2 που ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη ελέγχουμε αν διαφέρει πολύ από το σημείο ZM1 (που υπολογίσαμε μη

λαμβάνοντας υπόψη τη τήξη). Αν η διαφορά είναι μικρή τότε υπολογίζουμε την θερμοκρασιακή κατανομή κατά τα γνωστά. Αν όχι τότε ξαναυπολογίζουμε την κατανομή των μέγιστων θερμοκρασιών σε σχέση με το βάθος, με βάση το Q_0 , όπου $Z=ZM2$ και η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ικανοποιηθεί η απαιτούμενη ακρίβεια.

6.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε κατά την μελέτη του τρισδιάστατου μοντέλου ισχύει και στη περίπτωση του μονοδιάστατου. Η ροή θερμότητας γίνεται προς την κατεύθυνση του πάχους του ελάσματος. Έτσι όταν η διείσδυση, δηλαδή η τήξη, είναι ίση με το πάχος του ελάσματος, θεωρητικά συμβαίνει διακοπή της ροής θερμότητας. Ωστόσο τα αποτελέσματα που πάρθηκαν είναι ενθαρρυντικά διότι πλησιάζουν σε μεγάλο βαθμό τα πειραματικά. Στα σχήματα 6.10 έως 6.17 απεικονίζονται διάφορες θερμοκρασιακές κατανομές για τα δοκίμια που επιλέχθηκαν. Πρώτα απ' όλα θα συγκρίνουμε το βάθος της ζώνης τήξης που προκύπτει από τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα και στη συνέχεια θα βρούμε τον ρυθμό ψύξης. Ουσιαστικά υπολογίζεται ο χρόνος μετάβασης της θερμοκρασίας από τους 1000°C στους 500°C για ένα συγκεκριμένο βάθος. Οι διάφορες συγκρίσεις φαίνονται στους πίνακες 6.8 και 6.9. Παρατηρήθηκε μια αρκετά καλή σύμπτωση αποτελεσμάτων για τα δοκίμια με σημείο εστίασης +1mm πάνω από την επιφάνεια, ενώ στα δοκίμια A4 και A9 υπήρξε ακριβής προσέγγιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Φαίνεται λοιπόν ότι για τα δοκίμια με σημείο εστίασης 1mm πάνω από την επιφάνεια το μονοδιάστατο μοντέλο δίνει ακριβή αποτελέσματα. Για κάποιο λόγο τα αποτελέσματα του μοντέλου αποκλίνουν από την πραγματικότητα όσο η εστίαση της δέσμης προχωρά μέσα στο υλικό. Φυσικά δεν είναι το μοντέλο που ευθύνεται για την απόκλιση αυτή αλλά τα διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν όταν το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό. Παρατηρώντας τα σχήματα 6.10 και 6.17 διαπιστώνουμε ότι όταν ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας είναι ο ίδιος, μέσω του μοντέλου θα παρθεί μια θερμοκρασιακή κατανομή ανεξάρτητη από το σημείο εστίασης. Στη πράξη όμως η διείσδυση που θα επιτευχθεί θα είναι διαφορετική (στα ίδια συμπεράσματα καταλήξαμε στην ενότητα 5).

Για να βρεθεί το βάθος της ζώνης τήξης με βάση το μονοδιάστατο μοντέλο δεν χρειάστηκε καμία επιπλέον διαδικασία. Το πρόγραμμα είναι έτσι δομημένο ώστε να δίδεται η

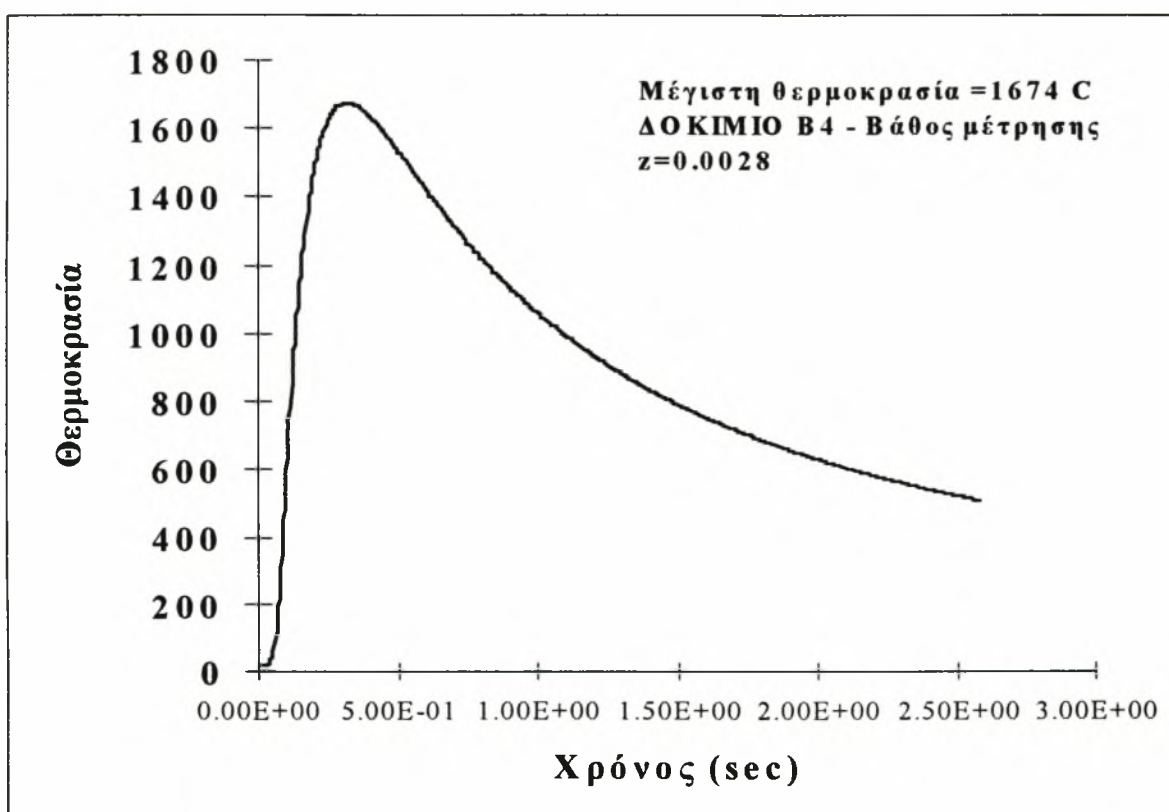
μέγιστη θερμοκρασία για κάθε βάθος z σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Οι πίνακες 6.8 - 6.9 δημιουργήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα που πάρθηκαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου ενώ στο πίνακα 6.9 μπορούμε να εξάγουμε τα ίδια αποτελέσματα αν χρησιμοποιήσουμε τα διαγράμματα των σχημάτων 6.10 έως 6.17. Διαπιστώθηκε ακριβώς αυτό που περιμέναμε, δηλαδή με αύξηση του λόγου Q/u έχουμε μείωση του ρυθμού ψύξης. Τέλος για την εξέταση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μόνο εκείνα τα δοκίμια που είχαν συγκεκριμένο λόγο $Q/60u$, αφού οι συνθήκες επαναλαμβάνονται με διαφορετικό σημείο εστίασης.

Πίνακας 6.8 : Σύγκριση του μονοδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για διάφορα δοκίμια (συγκεκριμένος λόγος $Q/60u$)

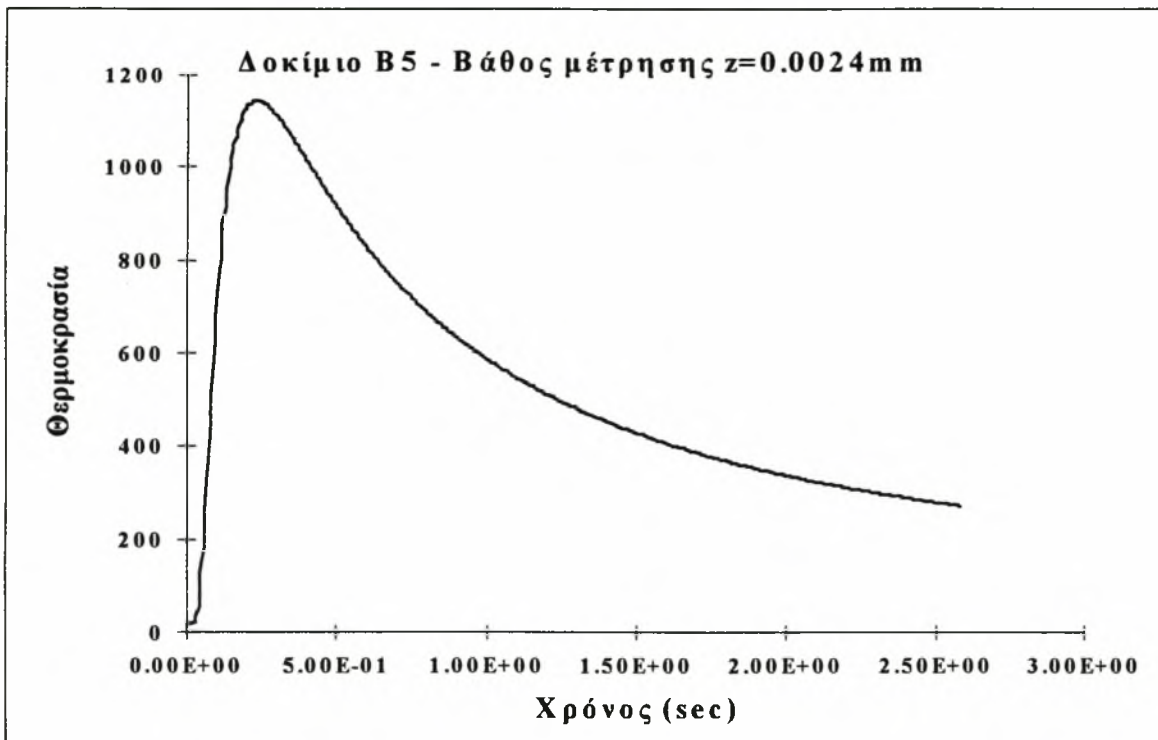
Αρ.Δοκιμίου	Θεωρητικά αποτελέσματα διείσδυσης (mm)	Πειραματικά αποτελέσματα (mm)	$Q/60u$
A1	0.9	1.35	1.425
A2	1.5	2.14	2.85
A4	>4	>4	14.25
A5	1.2	1.8	1.875
A6	1.4	2	2.5
A7	1.95	2.8	3.75
A9	3.05	3.05	7.5
B1	2.45	2.9	5.7
B2	1.5	2.8	2.85
B3	1.3	2.2	1.9
B4	3.05	4	7.5
B5	1.95	4	3.75
B6	1.4	3.6	2.5
B7	3.32	DROP-OUT	8.4
B8	2.2	4	4.2
B9	1.7	3.8	2.8

Πίνακας 6.9 : Ρυθμοί ψύξης για διάφορα δοκίμια σε συνάρτηση με τον ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας

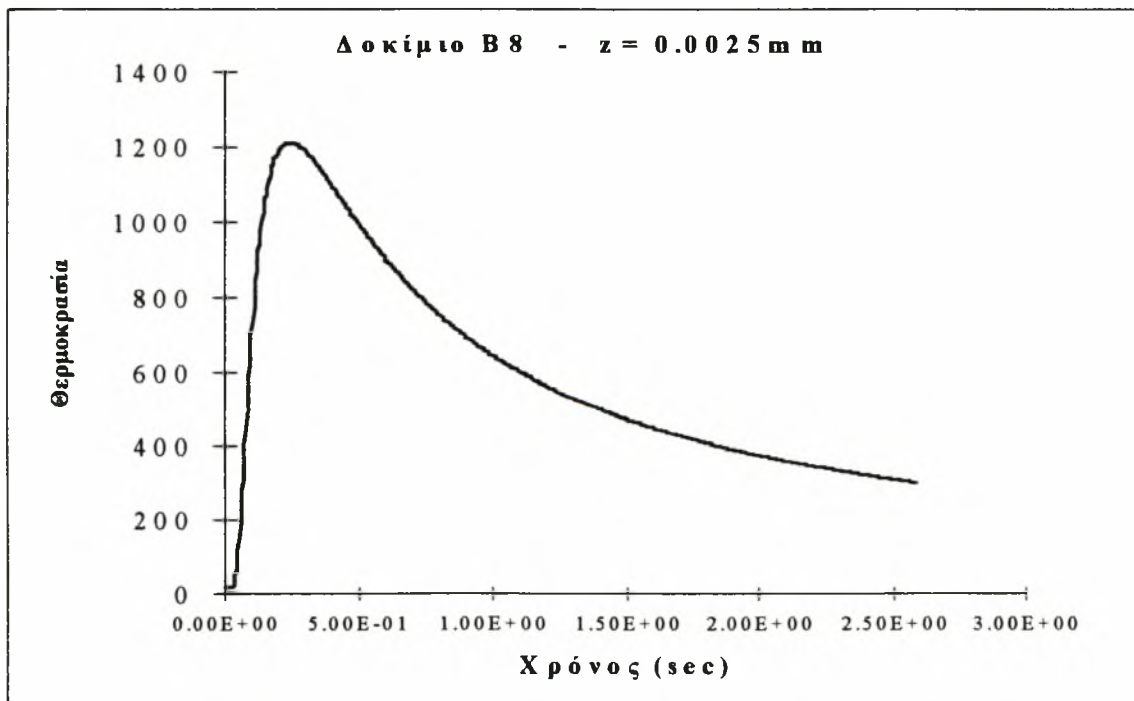
Αρ.Δοκιμίου	Δt (1000°C-500°C)	Q/60u
B4	1.5	7.5
B5	0.8	3.75
B8	0.88	4.2
B9	0.6	2.8
B17	>3	8.4
A1	0.42	1.425
A4	>5	14.25



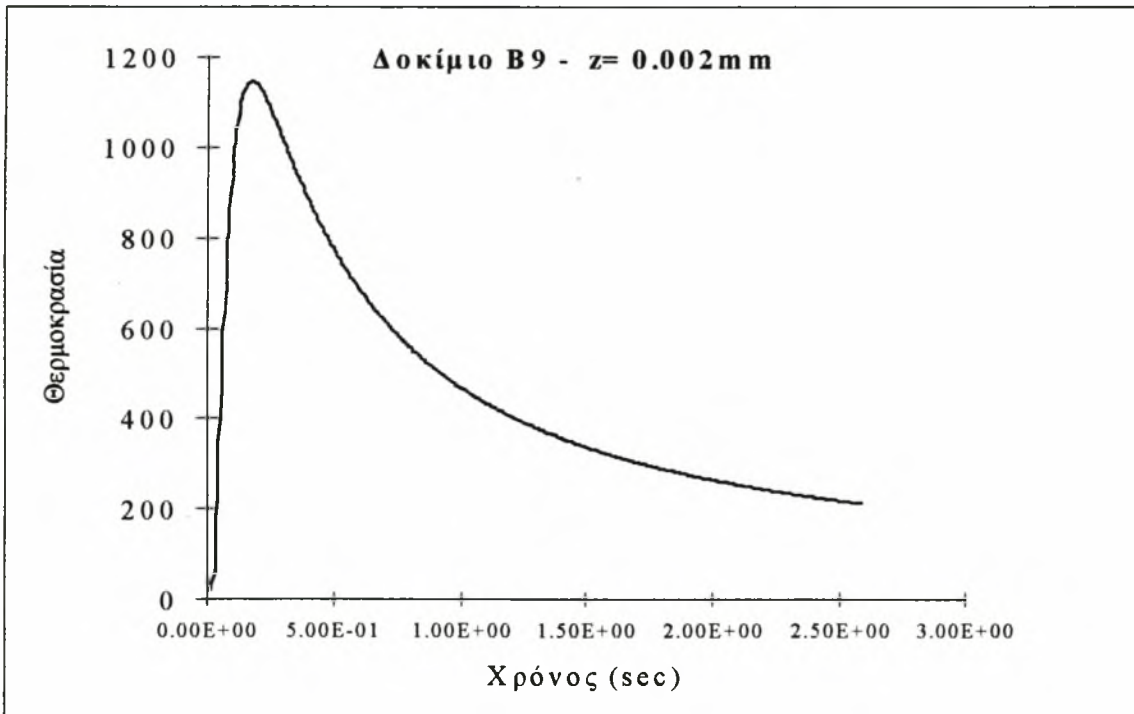
Σχήμα 6.10 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B4 - Q/60u = 7,5



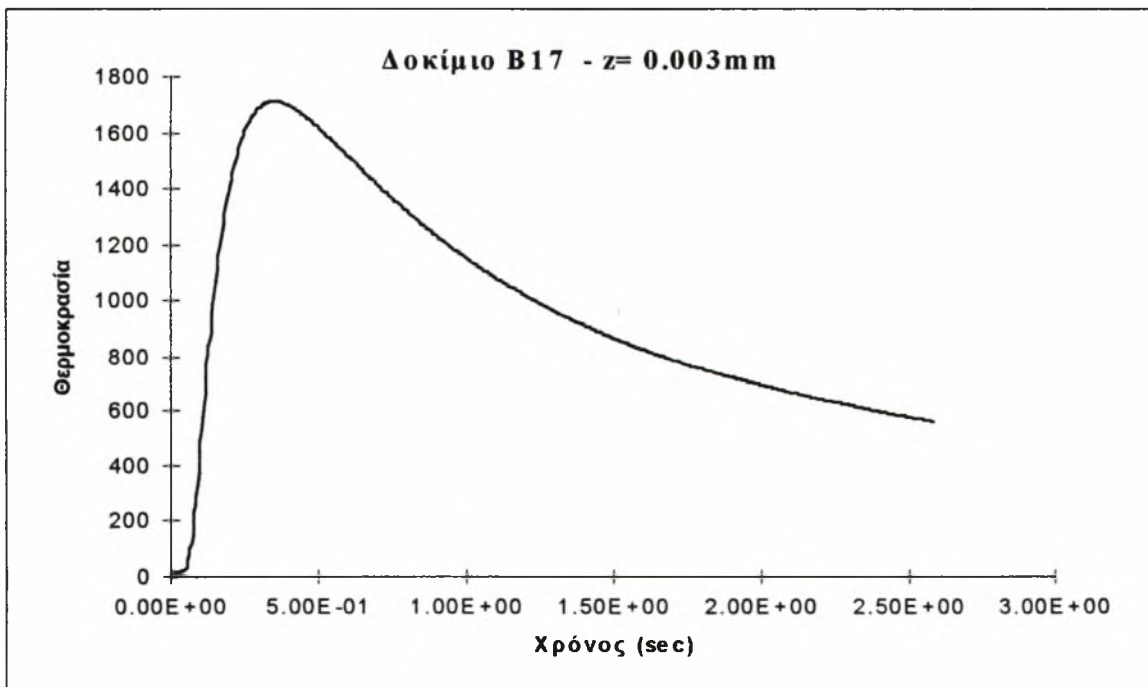
Σχήμα 6.11 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B5 - $Q/60u = 3,75$



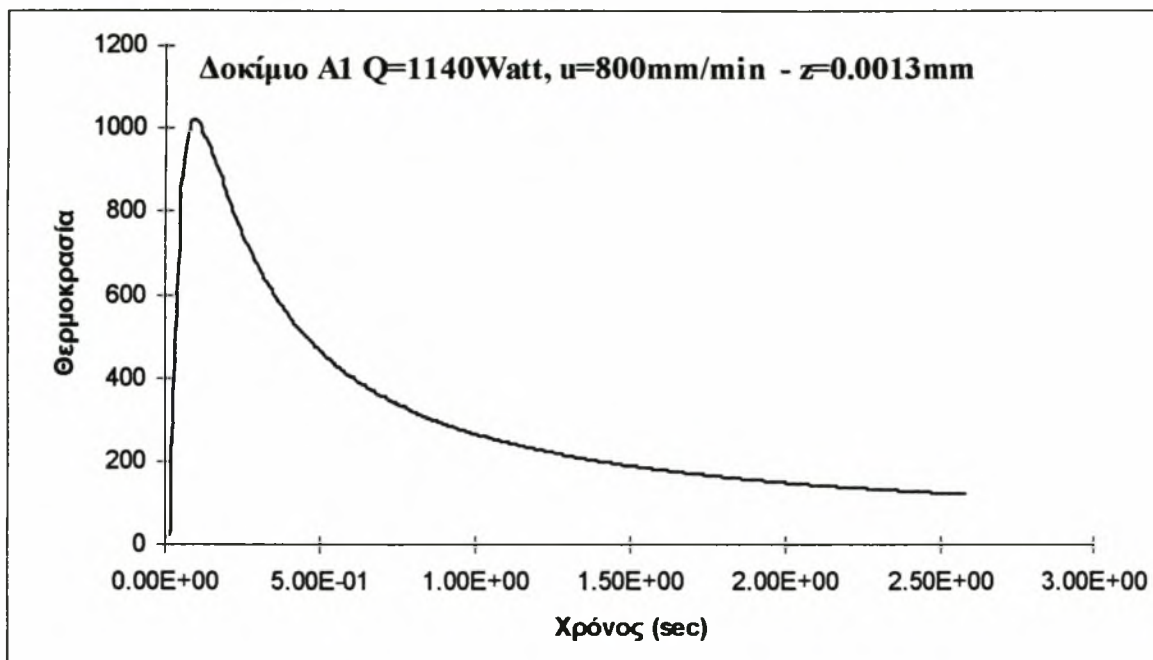
Σχήμα 6.12 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B8 - $Q/60u = 4,2$



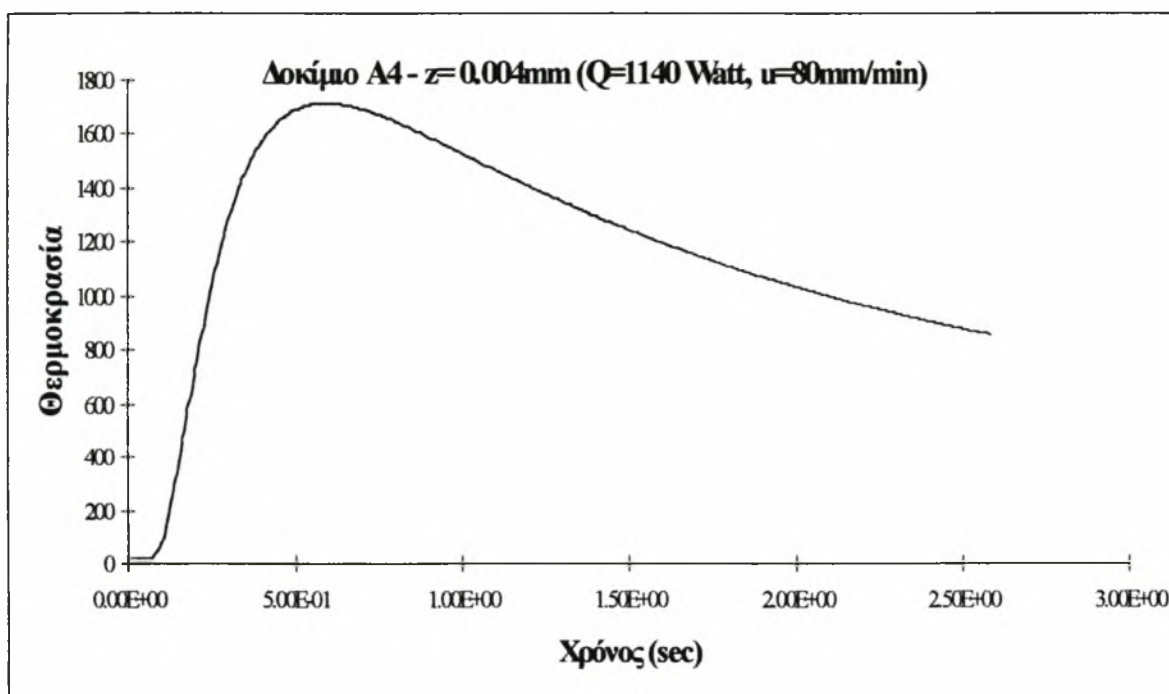
Σχήμα 6.13 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B9 - $Q/60u = 2,8$



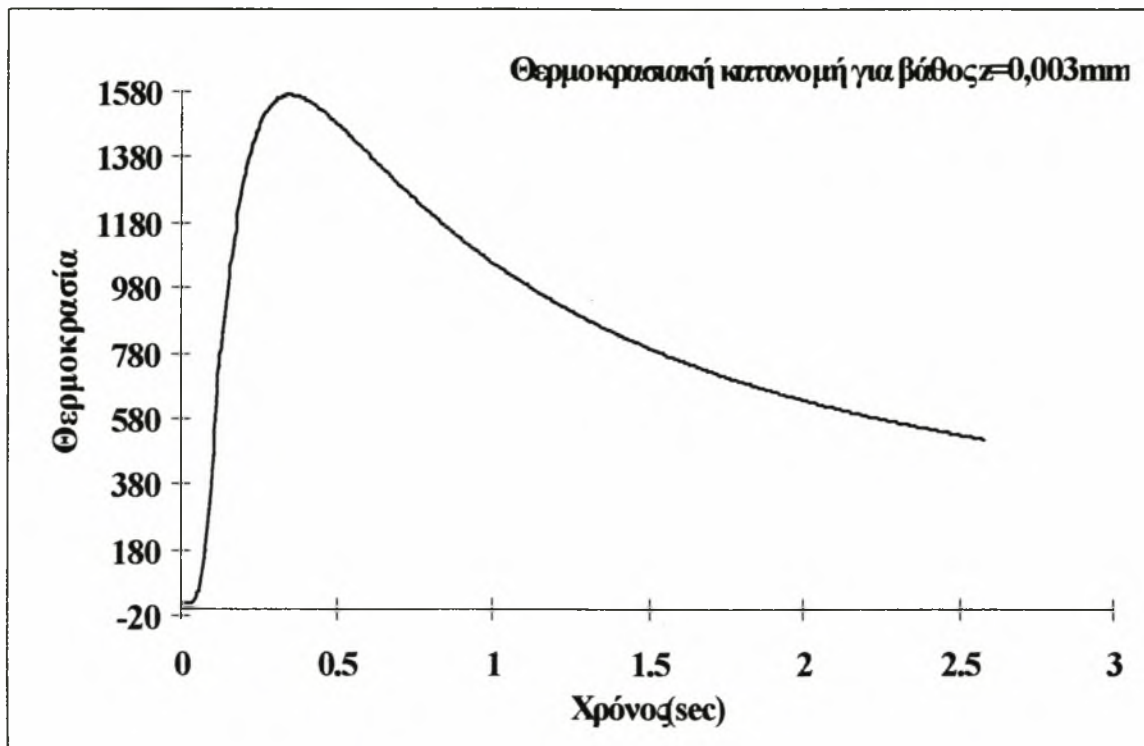
Σχήμα 6.14 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο B17 - $Q/60u = 8,4$



Σχήμα 6.15 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο A1 - $Q/60u = 1,425$



Σχήμα 6.16 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο A4 - $Q/60u = 14,25$



Σχήμα 6.17 : Θερμοκρασιακή κατανομή στο δοκίμιο A9 - $Q/60u = 7.5$

6.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

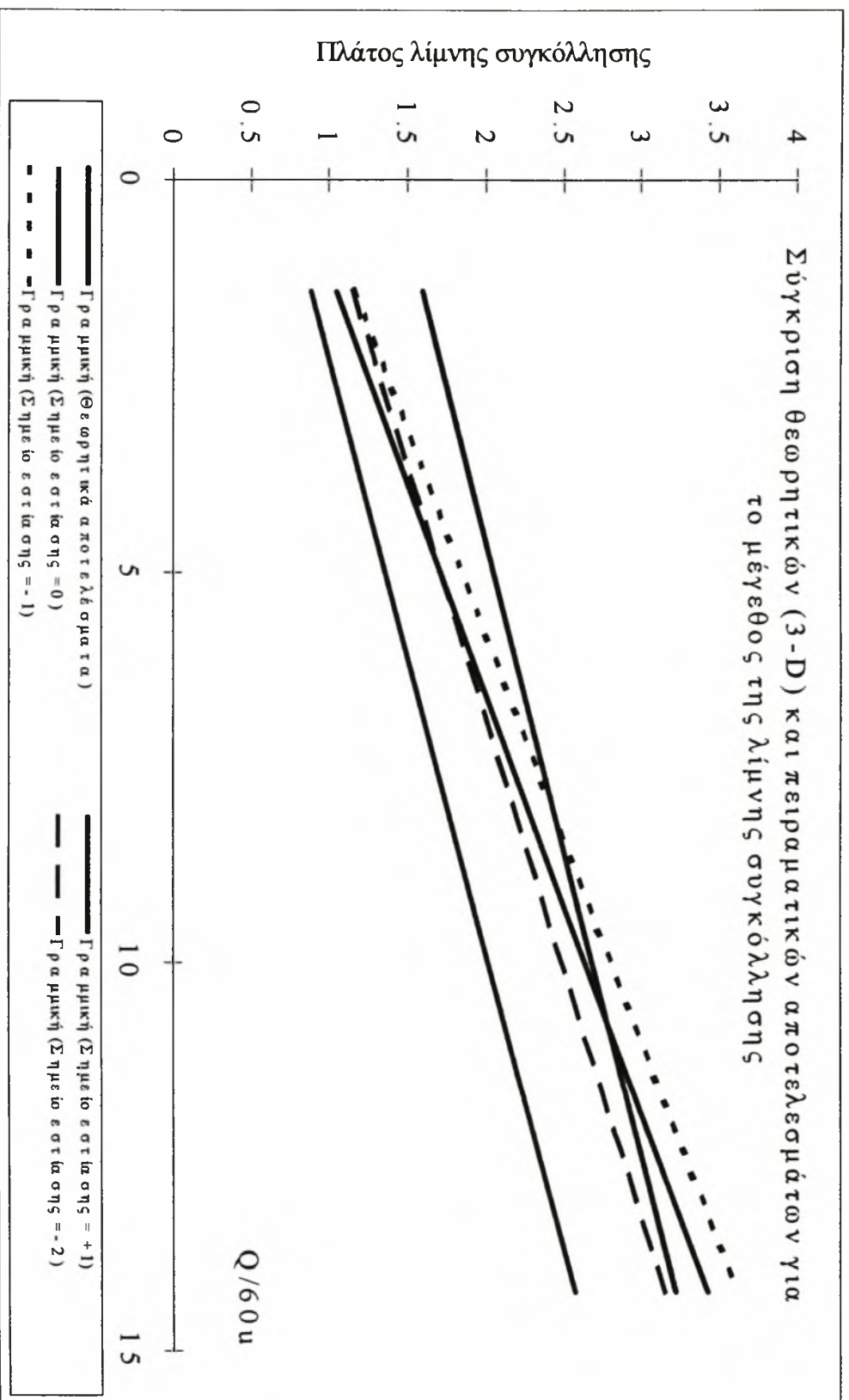
Από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης των μοντέλων για μια αρχική προσέγγιση του θερμοκρασιακού πεδίου και κατ' επέκταση για το προσδιορισμό του μεγέθους της λίμνης συγκόλλησης. Ωστόσο και τα δύο μοντέλα αποκλίνουν από την πραγματικότητα αλλά υπό ορισμένες προϋποθέσεις είναι δυνατόν να δίδουν αποτελέσματα πολύ κοντά στη πραγματικότητα. Το τρισδιάστατο μοντέλο πρέπει να εφαρμόζεται όσο το δυνατόν πιο μακριά από την ακτίνα της δέσμης και τα αποτελέσματα που παίρνονται για το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης είναι σχετικά κοντά με την πραγματικότητα. Όμως το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση

της διείσδυσης ειδικά όταν το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό και όταν υπάρχει πλήρη διείσδυση (μετάβαση από τρισδιάστατη ροή θερμότητας σε δισδιάστατη).

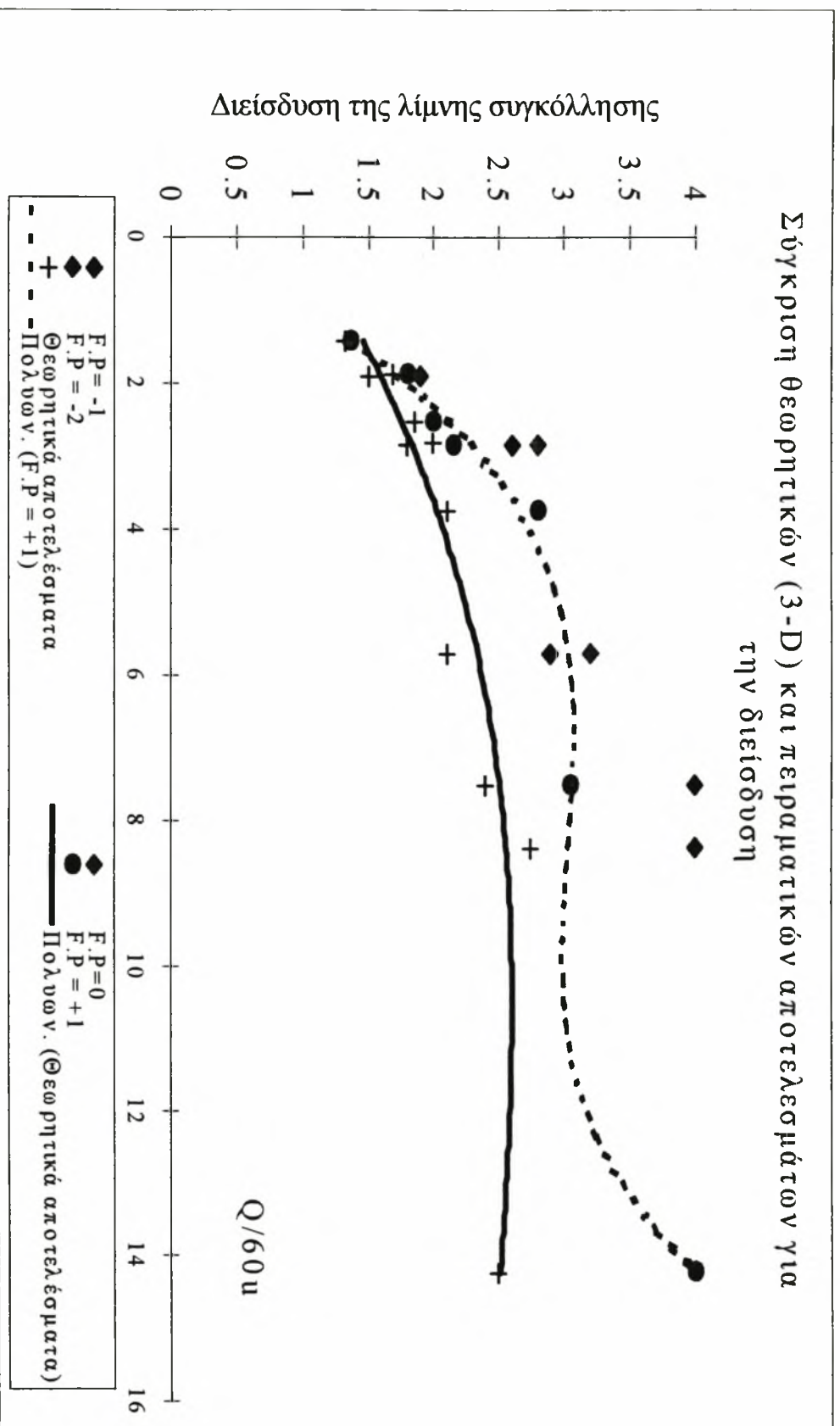
Το μονοδιάστατο μοντέλο δίδει πιο ακριβή αποτελέσματα όταν βρισκόμαστε σε σημείο εστίασης πάνω από την επιφάνεια, αλλά και πάλι σε περίπτωση που το σημείο εστίασης είναι μέσα στο υλικό τα αποτελέσματα αρχίζουν να αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από την πραγματικότητα. Ωστόσο το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη την ακτίνα της δέσμης και το φαινόμενο της τήξης, γι' αυτό και τα αποτελέσματα με σημείο εστίασης +1mm προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Όλα τα παραπάνω συμπεράσματα παρουσιάζονται γραφικά στα σχήματα 6.18-6.19 και 6.20 (προέρχονται από τους πίνακες 6.5-6.6-6.7-6.8).

Στο σχήμα 6.18 φαίνεται η καλή προσέγγιση του τρισδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε ότι με αύξηση του λόγου $Q/60u$ και κατ' επέκταση με αύξηση του πλάτους της λίμνης συγκόλλησης, υπάρχει καλύτερη σύμπτωση αποτελεσμάτων και η απόκλιση των πειραματικών με τα θεωρητικά αποτελέσματα μειώνεται. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απομάκρυνση από την ακτίνα της δέσμης, αφού το μοντέλο εφαρμόζεται σε σημεία όπου η συντεταγμένη y γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Φαίνεται επίσης ότι η μεγαλύτερη απόκλιση συμβαίνει στα δοκίμια με σημείο εστίασης +1mm. Στο σχήμα 6.19 απεικονίζεται η σύγκριση για το μέγεθος της διείσδυσης της λίμνης συγκόλλησης. Εδώ τα συμπεράσματα είναι ακριβώς αντίθετα σε σχέση με αυτά του σχήματος 6.18. Όταν το σημείο εστίασης είναι εκτός υλικού τότε η προσέγγιση είναι καλύτερη. Μάλιστα όταν η εστίαση βρίσκεται εντός του υλικού το τρισδιάστατο μοντέλο δεν είναι σε θέση να εκτιμήσει το μέγεθος της διείσδυσης.

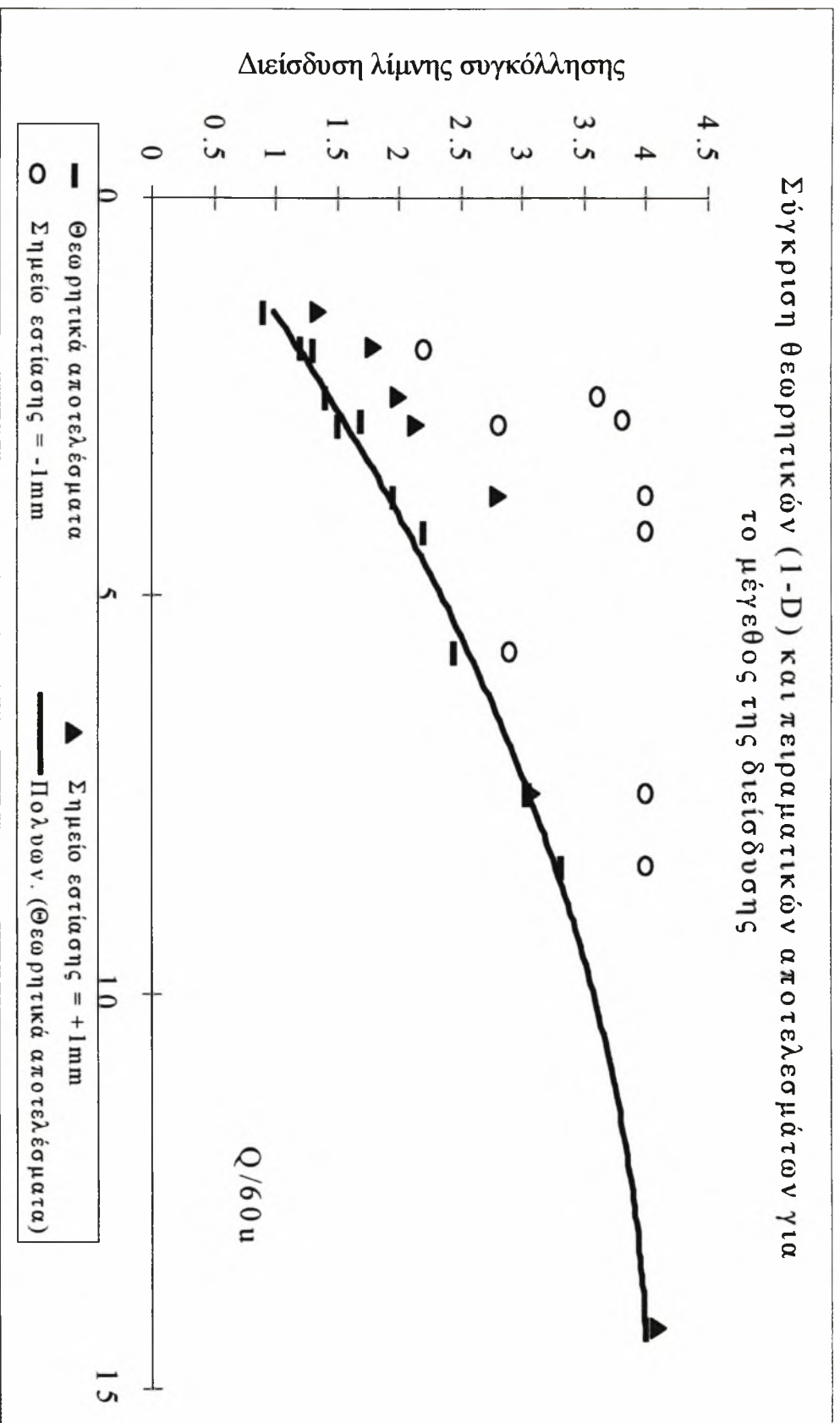
Χρησιμοποιώντας το μονοδιάστατο μοντέλο (φυσικά για την εκτίμηση της διείσδυσης) παρατηρούμε καλύτερη σύγκλιση αποτελεσμάτων -σε σχέση με το 3-D-. Μάλιστα τα θεωρητικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τα πειραματικά, σε μερικές περιπτώσεις, όπου το σημείο εστίασης είναι 1mm πάνω από την επιφάνεια (σχήμα 6.20).



Σχήμα 6.18 : Σύγκριση του τρισδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για το πλάτος της λίμνης συγκόλλησης στο σημείο $z = 0$



Σχήμα 6.19: Σύγκριση του τρισδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για την διείδυση της λίμνης συγκόλλησης στο



Σχήμα 6.20: Σύγκριση του μονοδιάστατου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για την διεύθυνση της λίμνης συγκόλλησης

ΕΝΟΤΗΤΑ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την μελέτη που προηγήθηκε υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των δύο μεθόδων αλλά και η αναφορά των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Βέβαια εάν πραγματοποιούνταν και η συγκόλληση των δύο ελασμάτων τότε θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η σύγκριση με την μέτρηση των παραμένουσων τάσεων και παραμορφώσεων.

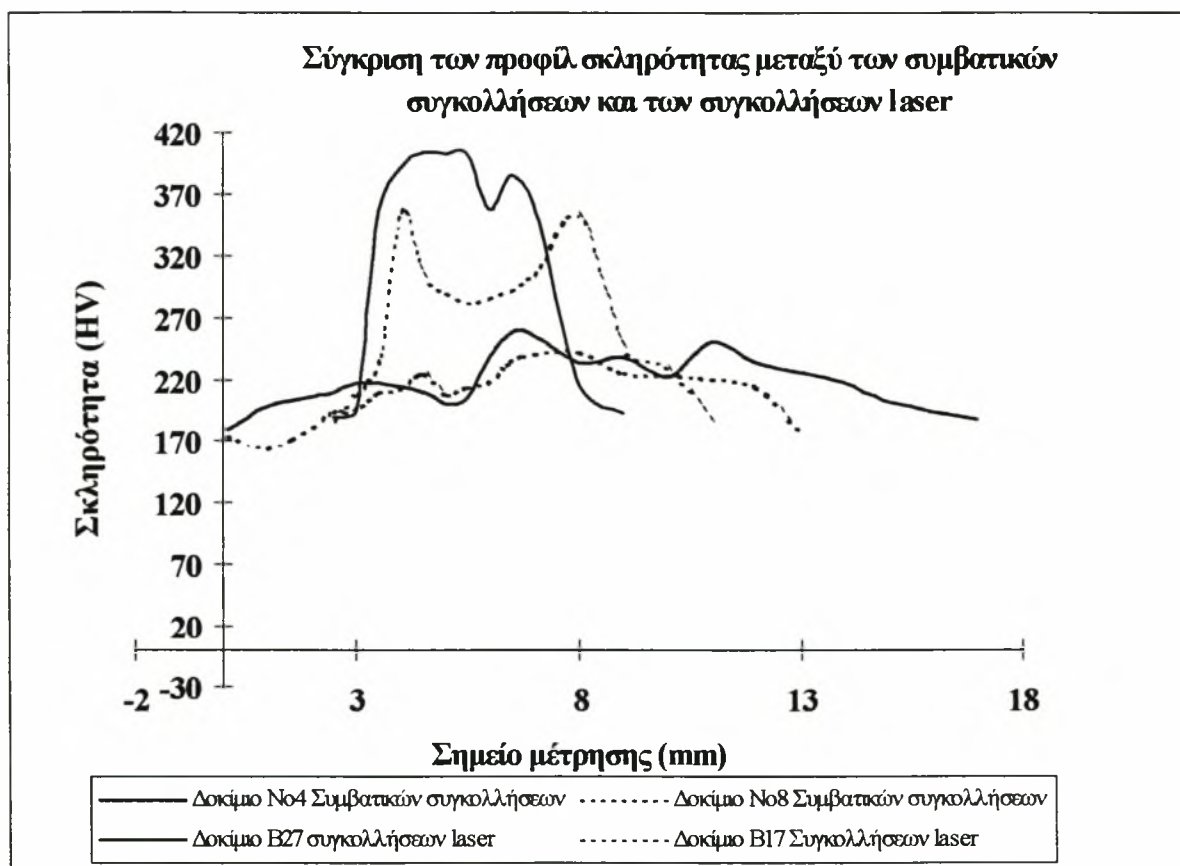
Η σκληρότητα της λίμνης συγκόλλησης στις συμβατικές μεθόδους είναι μικρότερη σε σχέση με την συγκόλληση laser. Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζονται τα προφίλ σκληρότητας για τις δύο μεθόδους. Η δημιουργούμενη διαφορά στη σκληρότητα οφείλεται σε πολλούς παράγοντες. Καταρχήν η ακτίνα της δέσμης είναι πολύ μικρή (1mm) και η δημιουργούμενη λίμνη συγκόλλησης έχει πολύ μικρό όγκο. Έτσι ο ρυθμός ψύξης αυξάνεται και η δημιουργία ψαθυρών φάσεων είναι ανέφικτη. Στις συμβατικές συγκολλήσεις έχουμε υψηλό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας και συνεπώς χαμηλό ρυθμό ψύξης. Συν των άλλων τα πάσα είναι δύο και η αναθέρμανση του υλικού, ειδικά στη μέθοδο skip-back-step, βοηθά στη μείωση της σκληρότητας.

Τα μεγέθη της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, της ζώνης τήξης και της λίμνης συγκόλλησης στις συγκολλήσεις laser είναι πολύ μικρά. Ο πίνακας 7.1 δίδει της διαφορές μεταξύ των επιλεγμένων συγκολλήσεων και των συμβατικών συγκολλήσεων. Τα αίτια βρίσκονται στον υψηλό ρυθμό πρόσδοσης θερμότητας των συμβατικών συγκολλήσεων και στον χαμηλό ρυθμό πρόσδοσης για τις συγκολλήσεις laser. Εξάλλου η διαμόρφωση των ελασμάτων (φραϊζα) απαιτεί την πρόσθεση υλικού με άμεση συνέπεια την αύξηση της λίμνης συγκόλλησης. Μεγάλη λίμνη συγκόλλησης συνεπάγεται μεγάλες παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου που τήκεται και ο οποίος κατά την στερεοποίηση παραμορφώνει το υλικό.

Μελετώντας τις δύο μεθόδους συγκόλλησης μακροσκοπικά διαπιστώνουμε ότι στις συγκολλήσεις laser δεν δημιουργούνται πόροι και η επιρροή του ανθρώπινου λάθους είναι αμελητέα. Από την στιγμή που προσδιοριστούν όλοι οι παράγοντες της συγκόλλησης (σημείο εστίασης, ταχύτητα της δέσμης, ισχύς και ακτίνα της δέσμης) τότε ο άνθρωπος παράγοντας εγκαταλείπεται. Στις συμβατικές μεθόδους φάνηκε ότι κατά την συγκόλληση υπήρξαν σφάλματα που οφείλονται αποκλειστικά στον ανθρώπινο παράγοντα. Τέτοια ήταν η δημιουργία του σφάλματος που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 3.6 αλλά και η μη συνένωση των δύο περασμάτων (του άνω και του κάτω).

Πίνακας 7.1 : Σύγκριση των μεγεθών της Θ.Ε.Ζ και της λίμνης συγκόλλησης για τις δύο μεθόδους συγκόλλησης

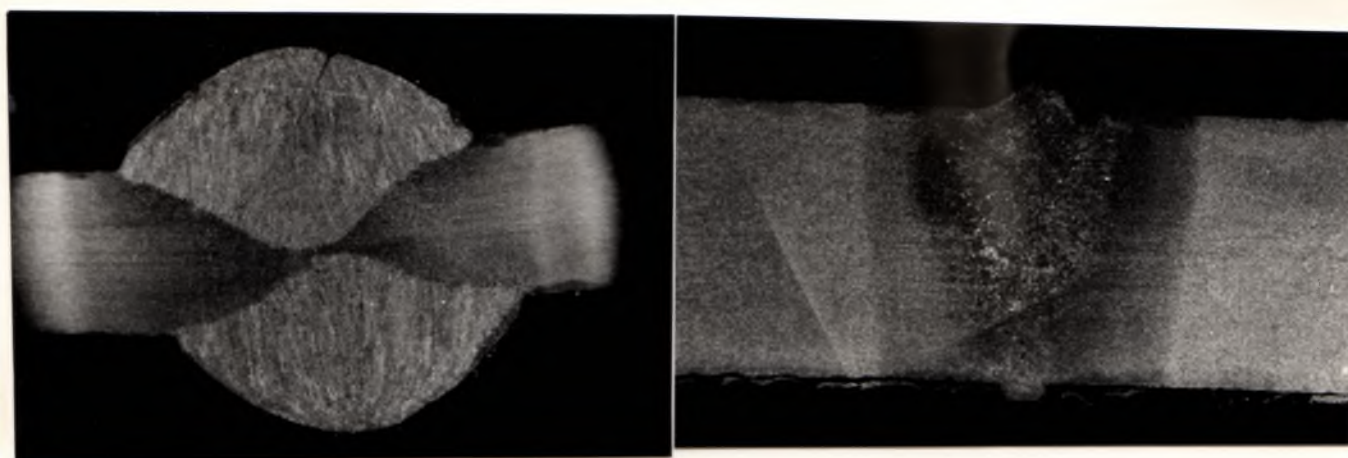
	ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER				ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	
	B8	B9	B24	B27	No8	No4
Αριθμός δοκιμίου						
Μέγιστο πλάτος λίμνης συγκόλλησης (mm)	3,6	2,7	3,4	3,4	8,4	9
Πλάτος Θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (mm)	1,5	1	1	0,9	2,2	3,4



Σχήμα 7.1 : Σύγκριση των προφίλ σκληρότητας μεταξύ των συμβατικών συγκολλήσεων και των συγκολλήσεων laser

Στο σχήμα 7.2 φαίνονται δύο μακροφωτογραφίες για την κατανοητή σύγκριση των δύο μεθόδων συγκόλλησης. Στις συγκολλήσεις laser το προστατευτικό αέριο και η κατάλληλη ρύθμιση της παροχής του και της πίεσής του δημιουργούν την καθαρότητα της λίμνης συγκόλλησης. Επίσης η συγκόλληση laser είναι συνεχής και δεν χρειάζεται διακοπή της συγκόλλησης πριν το πέρας της διαδικασίας. Αντίθετα στις συμβατικές συγκολλήσεις είτε λόγω χρησιμοποίησης ηλεκτροδίου είτε λόγω κούρασης του τεχνίτη πρέπει η συγκόλληση να διακοπεί με συνέπεια την δημιουργία πόρων, μεγαλύτερων παραμορφώσεων, κ.τ.λ.

Στη συγκόλληση laser υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της δημιουργούμενης μικροδομής αφού ρυθμίζοντας την ακτίνα της δέσμης αλλά και τις συνθήκες συγκόλλησης προσδιορίζεται ο ρυθμός ψύξης και το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης. Από αυτούς τους παράγοντες εξαρτάται το ποσοστό δημιουργίας της κάθε φάσης. Αξίζει να αναφέρουμε ότι στη συγκόλληση laser δεν υπάρχει πρόσθεση υλικού και έτσι αποφεύγεται η δημιουργία νέων φάσεων, διαφοροποιούνται οι ρυθμοί ψύξης, κ.τ.λ.



Σχήμα 7.2 : Μακροσκοπική σύγκριση των δύο μεθόδων συγκόλλησης

Ίσως η πρόσθεση υλικού να είναι το κυρίαρχο μειονέκτημα για τις συμβατικές μεθόδους, ωστόσο η κάλυψη των κενών δεν μπορεί να γίνει με το υπάρχον υλικό, διότι θα παραμορφωθεί σε μεγάλο βαθμό το τελικό κομμάτι. Επίσης μετά το πέρας

της διαδικασίας η επιφάνεια συγκόλλησης με την τεχνική laser είναι επίπεδη, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους όπου η τοπική αύξηση του πάχους του ελάσματος ξεπερνά τα 4mm. Βέβαια το μειονέκτημα αυτό είναι περισσότερο σημαντικό σε κατασκευές ακριβείας και όχι σε ναυπηγικές κατασκευές.

Τέλος η πραγματοποίηση των συγκολλήσεων laser έχει κάποιες δυσκολίες εξαιτίας της διαφυγής της ενέργειας από το κενό που δημιουργείται μεταξύ των δύο ελασμάτων. Για να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα θα πρέπει να βρεθεί μια διάταξη πρόσδεσης των δύο ελασμάτων ώστε να πιέζει τις επιφάνειες και να μειώνει το δημιουργούμενο κενό. Μάλιστα θα πρέπει οι επιφάνειες να είναι πολύ καλά λειασμένες ώστε η δύναμη που θα εφαρμοστεί να ενώσει τα δύο ελάσματα. Βέβαια κάτι τέτοιο αποτελεί μειονέκτημα διότι αυτό που επιδιώκουμε με τη συγκόλληση laser είναι ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου κατεργασίας. Συνοπτικά θα λέγαμε ότι η συγκόλληση με την τεχνική laser αποκτά ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι των συμβατικών μεθόδων εξαιτίας της εύκολης πρόσβασης στην διαδικασία. Όπως φάνηκε η πρόσβαση αυτή μπορεί να αφορά την μικροδομή, το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης, την διεύθυνση και πολλούς άλλους παράγοντες. Ακόμα η συγκόλληση με την τεχνική laser βρίσκεται σε πρωταρχικό στάδιο και χρειάζεται πολύ μελέτη για την εισαγωγή της στον βιομηχανικό κλάδο.

ΕΝΟΤΗΤΑ 8 : ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ

ΕΡΕΥΝΑ

Μελλοντική έρευνα στις συμβατικές συγκολλήσεις δεν μπορεί να προταθεί διότι υπάρχει κορεσμός και έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες μελέτες και έτσι μια επιπλέον έρευνα θα ήταν περιττή. Στις συγκολλήσεις laser υπάρχει ένα μεγάλο πεδίο όπου πρέπει να επεκταθεί η έρευνα. Ξεκινώντας θα πρέπει να μελετηθεί η επίδραση του πάχους στο ίδιο υλικό ώστε να ολοκληρωθεί η παραμετρική ανάλυση για τον χάλυβα D36. Στη συνέχεια καλό θα ήταν να αναπτυχθεί και να κωδικοποιηθεί κάποιο θερμοκρασιακό μοντέλο, περισσότερο ακριβές, ώστε να έχουμε την δυνατότητα για μια καλή και σίγουρη πρώτη εκτίμηση.

Κατόπιν η έρευνα θα πρέπει να εστιαστεί στην συγκόλληση λεπτών ελασμάτων (κάτω των 2mm) με μεγαλύτερη ακτίνα δέσμης και όχι μόλις 1mm, καθώς το μέγεθος της λίμνης συγκόλλησης -με την υπάρχουσα ακτίνα- είναι πολύ μικρό και επιτρέπει την αύξησή της. Οι δυνατότητες της μονάδος laser στην EBETAM επιτρέπουν την προαναφερθείσα έρευνα. Στην παρούσα μελέτη έγινε μια προσπάθεια μέτρησης της ζώνης τήξης αλλά η πίεση του χρόνου δεν έδωσε το δικαίωμα για περαιτέρω έρευνα. Έτσι καλό θα ήταν να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην οριοθέτηση της ζώνης τήξης και στην μελέτη της δημιουργούμενης μικροδομής μέσα σ' αυτήν. Ο λόγος για την παραπάνω έρευνα είναι ότι όλα τα προβλήματα ξεκινούν από την ζώνη τήξης όπου οι δημιουργούμενες φάσεις είναι ψαθυρές (μαρτενσίτης) και η σκληρότητα έχει την μέγιστη τιμή της.

Εν συνεχεία θα ήταν ενδιαφέρον να βρεθεί η επιρροή και άλλων κατανομών της δέσμης laser και να μην περιοριστούμε μόνο στην 'Gaussian'. Η ομοιόμορφη κατανομή ίσως αποδειχθεί πιο χρήσιμη και πιθανώς να μπορεί να λύσει και το πρόβλημα της διαφυγής της προσπίπτουσας ενέργειας εξαιτίας του κενού που δημιουργείται μεταξύ των δύο ελασμάτων. Το πρόβλημα της σωστής επαφής των δύο ελασμάτων κατά την συγκόλληση laser ίσως να είναι ο τομέας όπου πρέπει να δοθεί η μεγαλύτερη προσοχή. Καλό θα ήταν να βρεθούν ιδιοσκευές ή οποιαδήποτε άλλη μέθοδος για να αποφευχθεί η διαφυγή της ενέργειας. Σίγουρα θα υπάρχουν και άλλοι τομείς με μεγάλα περιθώρια βελτίωσης, οι οποίοι θα βρεθούν με την συνεχή έρευνα και με την προσπάθεια επίλυσης των υπαρχόντων προβλημάτων.

ΕΝΟΤΗΤΑ 9 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Steen W.M, 'Laser Material Processing'
- [2] Industrial Laser Handbook, 'High Power Laser Welding', Dr Conrad Banas
- [3] Lancaster J.F, 'Metallurgy of Welding', 5th Edition , 1984
- [4] Masubuchi K. 'Analysis of Welded Structures', Trans. SNAME Vol. 33, 1980
- [5] Dabby F.W , Paek W.C , 'High Intensity Laser Induced Vaporization And Explosion of Solid Material', IEEE J. Quantum Electronics QE-8, 1972
- [6] Rosental D. 'The Theory of Moving Sources of Heat and its Applications to Metal Treatment' , Trans. ASME, Nov 1946

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

-Προδιαγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στο τεστ εφελκυσμού των δοκιμίων Νο 4 και Νο 8 των συμβατικών συγκολλήσεων καθώς και των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο Laser. Ονομαστικά διαγράμματα εφελκυσμού των δοκιμίων Νο4 - Νο8

-Πίνακες που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή των σκληροτήτων στις διάφορες κλίμακες

- Προδιαγραφές των χημικών και των χρόνων προσβολής για διάφορα υλικά

Härte- Vergleich

Zugfestigkeit, Brinell-, Vickers- und Rockwellhärte

Hardness Comparison

Tensile Strength, Brinell-, Vickers-, Rockwell Hardness



Zugfestigkeit Tensile Strength	N/mm ²	R _m
Brinellhärte ¹⁾ Brinell Hardness ¹⁾ (0,102 F/D ² = 30); D = 10 mm	Durchmesser des Kugeldruckes in mm Dia. of ball impression in mm	d
	Härtezahl Hardness number $= \frac{0,102 \cdot 2 F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	HB
Vickershärte Vickers Hardness	Diamantpyramide Prüfkraft \approx 50 N Diamond pyramid Test load \approx 10 lbf	HV
Rockwellhärte Rockwell Hardness	Kugel 1,588 mm (1/16") Prüfgesamtkraft = 98 N Ball 1/16 in (0.125") Total test load = 22 lbf	HRB
	Diamantkegel Prüfgesamtkraft = 1471 N Diamond cone Total test load = 330 lbf	HRC

Korrekturfaktoren für HRC-Messung auf der Mantelfläche von zylindrischen Proben.
Correction values for the HRC-measurement on the outer (convex) surface
of cylindrical specimens.

HRC	Durchmesser mm dia. mm					
	6	8	10	15	20	30
	Zuschlag zur Härte HRC Addition to measured hardness HRC					
20	6	5	4	3	2	1
30	5	4	3	2	1	1
40	4	3	2	1	1	1
50	3	2	2	1	1	0
60	2	1	1	1	0	0



THYSSEN EDELSTAHLWERKE AG

Postfach 730 D-4150 Krefeld 1 Telefon (021 51) 83-1

Postfach 1369 D-5810 Witten 1 Telefon (023 02) 583-1

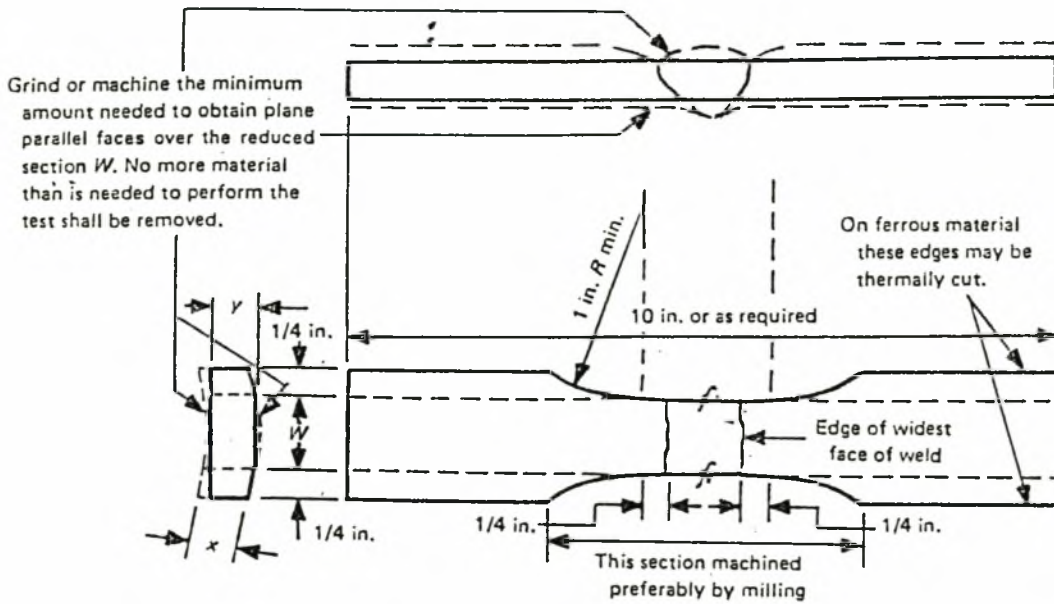
Vertreten durch:
Represented by:

N/mm ²	Brinellhärte Brinell Hardness		Vickershärte Vickers Hardness	Rockwellhärte Rockwell Hardness	
	Kugeldruck mm Ball Impression mm	HB	HV	HRB	HRC
265	6.63	78.0	80	—	—
270	6.45	80.7	85	41.0	—
285	6.30	85.5	90	48.0	—
305	6.16	90.2	95	52.0	—
320	6.07	95.0	100	56.2	—
335	5.90	98.8	105	—	—
350	5.75	105	110	62.3	—
370	5.65	109	115	—	—
385	5.54	114	120	66.7	—
400	5.43	119	125	—	—
415	5.33	124	130	71.2	—
430	5.26	128	135	—	—
450	5.16	133	140	75.0	—
465	5.08	138	145	—	—
480	4.99	143	150	78.7	—
495	4.93	147	155	—	—
510	4.85	152	160	81.7	—
530	4.79	158	165	—	—
545	4.71	162	170	85.0	—
560	4.64	168	175	—	—
575	4.58	171	180	87.1	—
595	4.53	176	185	—	—
610	4.47	181	190	89.5	—
625	4.43	185	195	—	—
640	4.37	190	200	91.5	—
660	4.32	195	205	92.5	—
675	4.27	199	210	93.5	—
690	4.22	204	215	94.0	—
705	4.18	209	220	95.0	—
720	4.13	214	225	96.0	—
740	4.08	219	230	96.7	—
755	4.05	223	235	—	—
770	4.01	228	240	98.1	20.3
785	3.97	233	245	—	21.3
800	3.92	238	250	99.5	—
820	3.89	242	255	—	23.1
835	3.86	247	260	(101)	24.0
850	3.82	252	265	—	24.8
865	3.78	257	270	(102)	25.6
880	3.75	261	275	—	26.4
900	3.72	266	280	(104)	27.1
915	3.69	271	285	—	27.8
930	3.66	276	290	(105)	28.5
950	3.63	280	295	—	29.2
965	3.60	285	300	—	29.8
995	3.54	295	310	—	31.0
1030	3.49	304	320	—	32.2
1060	3.43	314	330	—	33.3
1095	3.39	323	340	—	34.4
1125	3.34	333	350	—	35.6
1155	3.29	342	360	—	36.6
1190	3.25	352	370	—	37.7
1220	3.21	361	380	—	38.8
1255	3.17	371	390	—	39.8
1290	3.13	380	400	—	40.8
1320	3.09	390	410	—	41.8
1350	3.06	399	420	—	42.7
1385	3.02	409	430	—	43.6
1420	2.99	418	440	—	44.5
1455	2.95	428	450	—	45.3
1485	2.92	437	460	—	46.1
1520	2.89	447	470	—	46.9
1555	2.86	(456)	480	—	47.7
1595	2.83	(466)	490	—	48.4
1630	2.81	(475)	500	—	49.1
1665	2.78	(485)	510	—	49.8
1700	2.75	(494)	520	—	50.5
1740	2.73	(504)	530	—	51.1
1775	2.70	(513)	540	—	51.7
1810	2.68	(523)	550	—	52.3
1845	2.66	(532)	560	—	53.0
1880	2.63	(542)	570	—	53.6
1920	2.60	(551)	580	—	54.1
1955	2.59	(561)	590	—	54.7
1995	2.57	(570)	600	—	55.2
2030	2.54	(580)	610	—	55.7
2070	2.52	(589)	620	—	56.3
2105	2.51	(599)	630	—	56.8
2145	2.49	(608)	640	—	57.3
2180	2.47	(618)	650	—	57.8
—	—	—	660	—	58.3
—	—	—	670	—	58.8
—	—	—	680	—	59.2
—	—	—	690	—	59.7
—	—	—	700	—	60.1
—	—	—	720	—	61.0
—	—	—	740	—	61.8
—	—	—	760	—	62.5
—	—	—	780	—	63.3
—	—	—	800	—	64.0
—	—	—	820	—	64.7
—	—	—	840	—	65.3
—	—	—	860	—	65.9
—	—	—	880	—	66.4
—	—	—	900	—	67.0
—	—	—	920	—	67.5
—	—	—	940	—	68.0

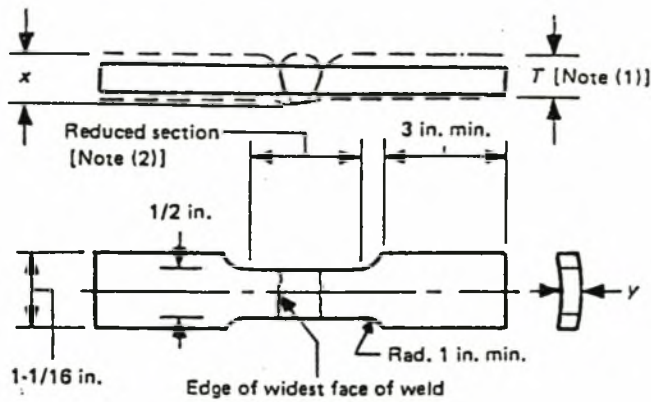
Umrechnungen von Härtewerten nach dieser Umrechnungstabelle sind nur annähernd richtig.
Siehe DIN 50180, Dezember 1976.

Conversions of hardness values acc. to this chart are only approximately correct.
See DIN 50180, December 1976.

QW-462 Test Specimens (Cont'd)



QW-462.1(b) TENSION — REDUCED SECTION — PIPE

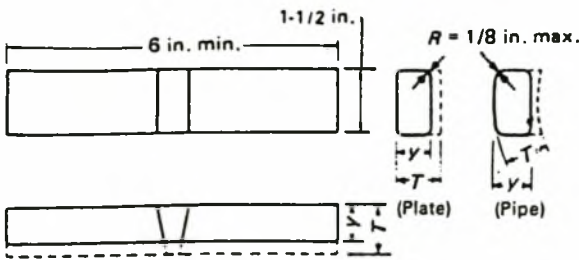


NOTES:

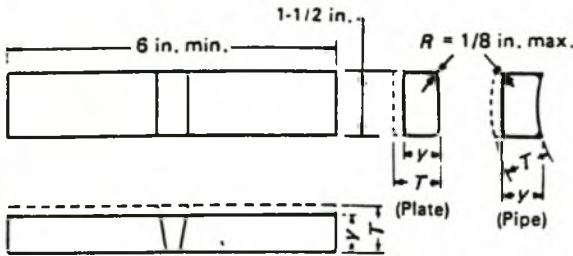
- (1) The weld reinforcement shall be ground or machined so that the weld thickness does not exceed the base metal thickness T . Machine minimum amount to obtain approximately parallel surfaces.
- (2) The reduced section shall not be less than the width of the weld plus $2y$.

QW-462.1(c) TENSION — REDUCED SECTION
ALTERNATE FOR PIPE

QW-462 Test Specimens (Cont'd)



Face-Bend Specimen — Plate and Pipe



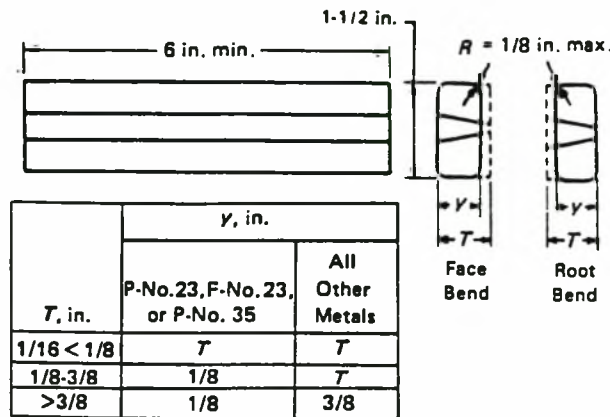
Root-Bend Specimens — Plate and Pipe

T, in.	y, in.	
	P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All Other Metals
1/16 < 1/8	T	T
1/8-3/8	1/8	T
>3/8	1/8	3/8

NOTES:

- (1) Weld reinforcement and backing strip or backing ring, if any, shall be removed flush with the surface of the specimen. If a recessed ring is used, this surface of the specimen may be machined to a depth not exceeding the depth of the recess to remove the ring, except that in such cases the thickness of the finished specimen shall be that specified above. Do not flame-cut nonferrous material.
- (2) If the pipe being tested is 4 in. nominal diameter or less, the width of the bend specimen may be 3/4 in. for pipe diameters 2 in. to and including 4 in. The bend specimen width may be 3/8 in. for pipe diameters less than 2 in. down to and including 3/8 in. and as an alternative, if the pipe being tested is equal to or less than 1 in. nominal pipe size (1.1315 in. O.D.), the width of the bend specimens may be that obtained by cutting the pipe into quarter sections, less an allowance for saw cuts or machine cutting. These specimens cut into quarter sections are not required to have one surface machined flat as shown in QW-462.3(a). Bend specimens taken from tubing of comparable sizes may be handled in a similar manner.

QW-462.3(a) FACE AND ROOT BENDS — TRANSVERSE^{1,2}



T, in.	y, in.	
	P-No. 23, F-No. 23, or P-No. 35	All Other Metals
1/16 < 1/8	T	T
1/8-3/8	1/8	T
>3/8	1/8	3/8

NOTE:

- (1) Weld reinforcements and backing strip or backing ring, if any, shall be removed essentially flush with the undisturbed surface of the base material. If a recessed strip is used, this surface of the specimen may be machined to a depth not exceeding the depth of the recess to remove the strip, except that in such cases the thickness of the finished specimen shall be that specified above.

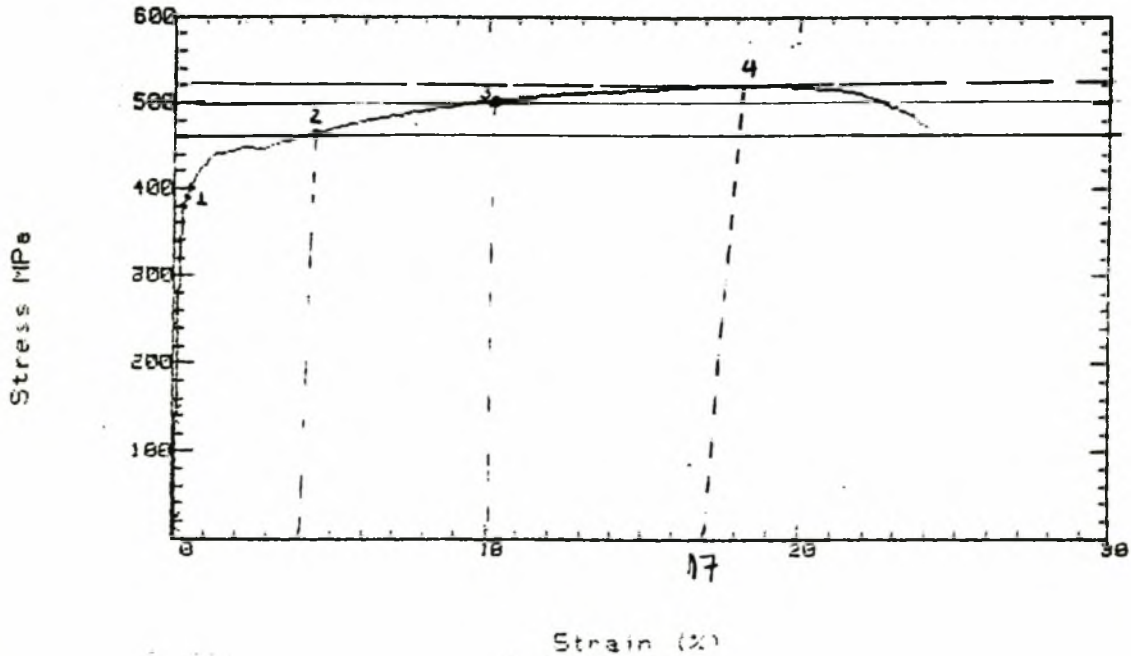
QW-462.3(b) FACE AND ROOT BENDS — LONGITUDINAL¹

Id. code	DIPL.M.B	Ultimate Tensile Strength	5.20E+02	MPa
Batch number	D36	Plastic Strain	2.38E+01	%
* Test number	1	Upper Yield Stress	NOT FOUND	
Specimen area	5.12E+01 mm ²	Lower Yield Stress	NOT FOUND	
Test Date	15 Nov 1995	1st Proof Stress Point	3.80E+02	MPa
Test Mode	Tensile	2nd Proof Stress Point	3.95E+02	MPa
		3rd Proof Stress Point	4.03E+02	MPa

PROOF STRESS TEST

Identifier DIPL.M.B
 Batch number D36
 Test number 1

RE-CALC RUN 5



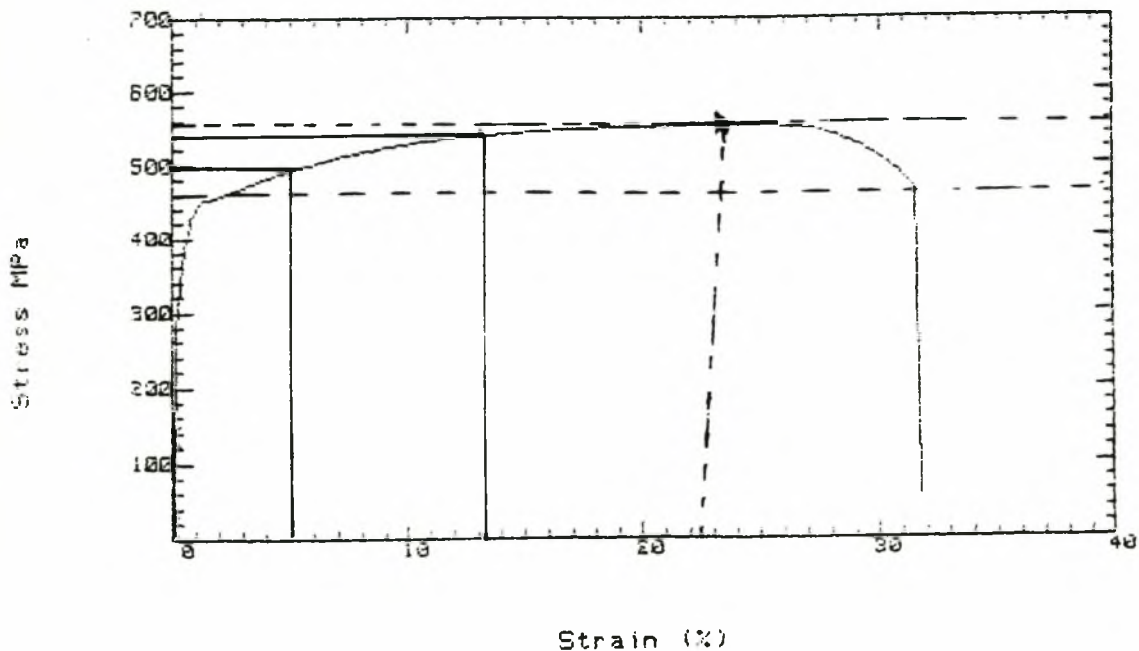
PROOF STRESS RESULTS - RUN NUMBER 6

Id. code	DIPL.M.B	Ultimate Tensile Strength	5.53E+02	MPa
Batch number	D36	Plastic Strain	3.17E+01	%
* Test number	2	Upper Yield Stress	NOT FOUND	
Specimen area	5.04E+01 mm ²	Lower Yield Stress	NOT FOUND	
Test Date	15 Nov 1995	1st Proof Stress Point	3.27E+02	MPa
Test Mode	Tensile	2nd Proof Stress Point	3.61E+02	MPa
		3rd Proof Stress Point	3.92E+02	MPa

PROOF STRESS TEST

Identifier DIPL.M.B
 Batch number D36
 Test number 2

RE-CALC RUN 6



PROOF STRESS RESULTS - RUN NUMBER 7

Id. code	DIPL.M.B	Ultimate Tensile Strength	5.50E+02	MPa
Batch number	D36	Plastic Strain	3.35E+01	%
* Test number	3	Upper Yield Stress	4.69E+02	MPa
Specimen area	5.17E+01 mm ²	Lower Yield Stress	4.63E+02	MPa
Test Date	15 Nov 1995	1st Proof Stress Point	4.35E+02	MPa
Test Mode	Tensile	2nd Proof Stress Point	4.42E+02	MPa
		3rd Proof Stress Point	4.48E+02	MPa

PROOF STRESS TEST

Identifier DIPL.M.B

RE-CALC-RUN 7

Batch number D36

Test number 3

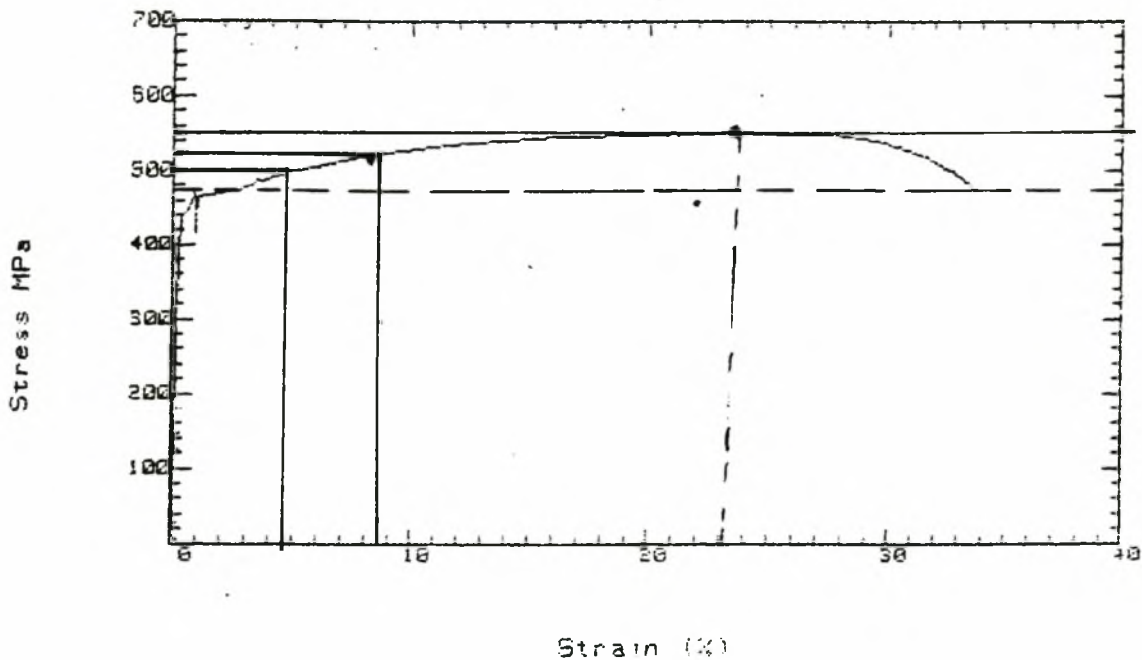


TABLE 2. ETCHING REAGENTS FOR MICROSCOPIC EXAMINATION OF STEELS AND IRONS.*—(Continued)

Etching reagent	Composition†	Remarks	Uses
II. General reagents for alloy steels (stainless and high-speed steels)			
No. 7. Ferric chloride and hydrochloric acid	FeCl ₃ 5 g		Structure of austenitic nickel and stainless steels
	HCl..... 50 ml		
	H ₂ O..... 100 ml		
No. 5. Nitric acid (nital)	HNO ₃ (colorless)..... 5-10 ml		General structure of high-speed tool steel
	Ethyl or methyl alcohol (95% or better)..... 95-99 ml		
No. 9. Chrome regia.....	HCl..... 25 ml	Activity is controlled by amount of chromic acid	Heat-treated 18% chromium, 8% nickel stainless steels. Useful electrolytically, if diluted with 2 parts alcohol and 2 parts glycerine and applied for 20-60 sec with 6 volts
	CrO ₃ solution (10%) in		
	H ₂ O..... 5-50 ml		
No. 10. Ferric chloride and nitric acid	Saturated solution of FeCl ₃ in HCl, to which a little HNO ₃ is added	Use full strength	Structure of stainless steel
	A. HNO ₃ 10 ml HCl..... 20-30 ml Glycerol..... 30-20 ml	Warm specimen in water before etching. For best results use method of alternate polishing and etching. If given sufficient time, will etch totally austenitic alloys, but better results are obtained by using reagent No. 11-C	Structure of iron-chromium-base alloys, high-speed steels, and austenitic manganese steel. Etches nickel-chromium alloys satisfactorily
No. 11. Mixed acids in glycerol.....	B. HNO ₃ 10 ml HF..... 20 ml Glycerol..... 20-40 ml		
	C. HNO ₃ 10 ml HCl..... 20 ml Glycerol..... 20 ml H ₂ O..... 10 ml	Amount of HCl may be varied if reagent acts too rapidly or slowly. For best results employ method of alternate polishing and etching	To etch iron-chromium-nickel, iron-chromium-manganese, and all other austenitic iron-chromium-base alloys
	No. 12. Oxalic acid.....	Oxalic acid..... 10 g H ₂ O..... 100 ml	Used electrolytically, the specimen as anode, stainless steel or platinum as cathode, about 1 in. apart; 6 volts usually used. Precipitated carbides in stainless steels may be revealed in 10 to 15 sec, the general structure in about 1 min. For study of carbides, 1.5-3 volts may be used, thus increasing the etching time and improving control of etch

* ASTM Standards, Part I-B, 1946.

† The use of concentrated reagents is intended, unless otherwise specified. Only reagents of higher analytical purity should be used.

TABLE 2. ETCHING REAGENTS FOR MICROSCOPIC EXAMINATION OF STEELS AND IRONS.*—(Continued)

Etching reagent	Composition†	Remarks	Uses
II. General reagents for alloy steels (stainless and high-speed steels)			
No. 7. Ferric chloride and hydrochloric acid	FeCl ₃ 5 g HCl..... 50 ml H ₂ O..... 100 ml		Structure of austenitic nickel and stainless steels
No. 8. Nitric acid (nital)	HNO ₃ (colorless)..... 5-10 ml Ethyl or methyl alcohol (95% or better)..... 95-99 ml		General structure of high-speed tool steel
No. 9. Chrome regia....	HCl..... 25 ml CrO ₃ solution (10%) in H ₂ O..... 5-50 ml	Activity is controlled by amount of chromic acid	Heat-treated 18% chromium, 8% nickel stainless steels. Useful electrolytically, if diluted with 2 parts alcohol and 2 parts glycerine and applied for 20-60 sec with 6 volts
No. 10. Ferric chloride and nitric acid	Saturated solution of FeCl ₃ in HCl, to which a little HNO ₃ is added	Use full strength	Structure of stainless steel
No. 11. Mixed acids in glycerol.....	A. HNO ₃ 10 ml HCl..... 20-30 ml Glycerol..... 30-20 ml	Warm specimen in water before etching. For best results use method of alternate polishing and etching. If given sufficient time, will etch totally austenitic alloys, but better results are obtained by using reagent No. 11-C	Structure of iron-chromium-base alloys, high-speed steels, and austenitic manganese steel. Etches nickel-chromium alloys satisfactorily
	B. HNO ₃ 10 ml HF..... 20 ml Glycerol..... 20-40 ml	Amount of glycerol may be varied to suit metal	Structure of high silicon alloys of the Duriron type
	C. HNO ₃ 10 ml HCl..... 20 ml Glycerol..... 20 ml H ₂ O..... 10 ml	Amount of HCl may be varied if reagents acts too rapidly or slowly. For best results employ method of alternate polishing and etching	To etch iron-chromium-nickel, iron-chromium-manganese, and all other austenitic iron-chromium-base alloys
No. 12. Oxalic acid.....	Oxalic acid..... 10 g H ₂ O..... 100 ml	Used electrolytically, the specimen as anode, stainless steel or platinum as cathode, about 1 in. apart; 6 volts usually used. Precipitated carbides in stainless steels may be revealed in 10 to 15 sec, the general structure in about 1 min. For study of carbides, 1.5-3 volts may be used, thus increasing the etching time and improving control of etch	For austenitic stainless steels and high-nickel alloys. Carbides and general structure revealed depending on etching time

* ASTM Standards, Part I-B, 1946.

† The use of concentrated reagents is intended, unless otherwise specified. Only reagents of higher analytical purity should be used.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πειραματικές μετρήσεις πάνω στα δοκίμια των συμβατικών μεθόδων που έγιναν στα εργαστήρια της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας συμπεριλαμβανομένου:

Τεστ Εφέλκυσμού

Σκληρομετρήσεις

Δοκιμή κρούσης

HELLENIC



SHIPYARDS Co.

WELDING PROCEDURE No. FRG/11/20 (N°1)
WELDING METHOD: FOR NAVAL SHIPBUILDING
(MEUD 20011N)

WELDING DEPARTMENT (NSW1)

DATE: 18-5-92



H.S.Y.



HELLENIC SHIPYARD
SKARAMANGA

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION

W.P.S. No. FRC/11/20

WELDING DEPARTMENT

PAGE...1 OF...2...

MAG/M (AUTOMATIC)

Welding Process : GMAW

Type(s):

Joint design: According DRW

backing (Yes. No.): NO

backing material: ---

Group No. to Group No.
D 36 - D 36

Spec. Type and Grade to Spec. Type and Grade:
D36 Acc. G.L

Thickness Range:
2.5 mm to 5,5 mm

Spec. No.: SOLID WIRE
3YHS G.L

AWS No. (class):
A5.18 ER 70S-6

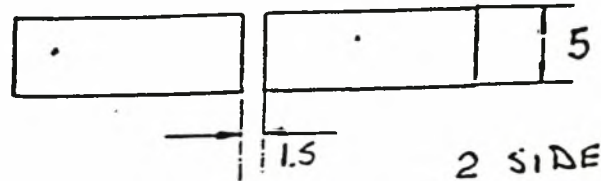
TRADE NAME:

Electrode-WIG or FLUX WIRE Combination:
NO

Wire or FLUX Trade name:

Size of filler Metals:
0,8 mm

Grain Size:



1G

1 SIDE

2 SIDE

POSITION

Position of Groove:

1G

Welding Progression: (Up, Down):
FLAT

Position(s) of fillet:

Other :

TECHNIQUE

STRING or WEAVE BEAD:
STRING

INITIAL AND INTERPASS CLEANING:

GAS CUP SIZE :

METHOD OF BACK GOUGING:
CARBON ARC

GAS : SHIELDING GAS(ES):

PERCENT COMPOSITION (MIXTURES):

80% Arg + 20% Co2

GEORGIOS PAPARIDES
NAVAL ARCHITECT
HEAD OF WELDING DEPARTMENT

DATE:

10-1-91

TENSILE TESTS

ΝΣ/ΔΝΧ

Τμήμα Εργαστηρίων/ΕΛΥ

Ημερομηνία : 22.04.1992

Ώρα 11:09:01

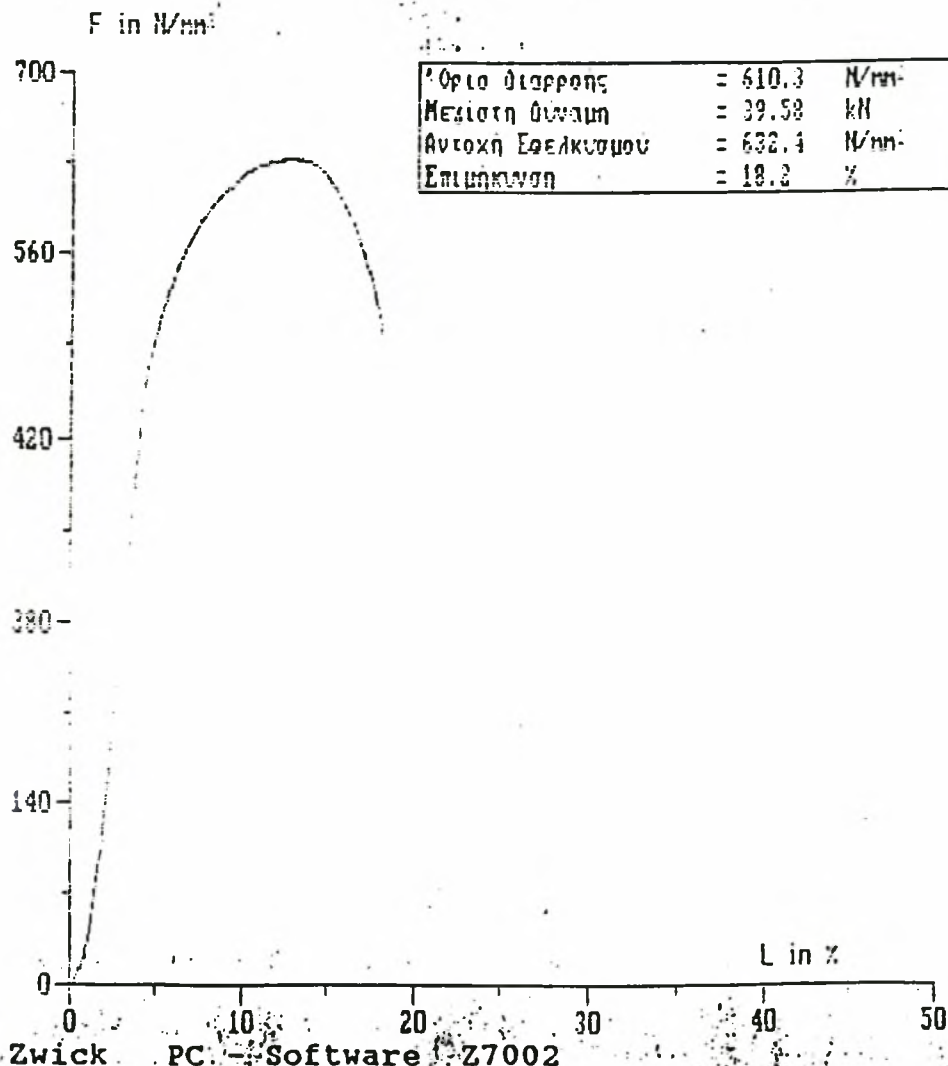
Όνομασία υλικού : ΕΛΑΣΜΑΤΑ **ED.136**

Προδιαγραφή :

Όνομα προμηθευτή :

Αριθμός ταξινόμησης: ~~307017~~

n	Πάχος X Πλάτος mm	Μήκος (L ₀) mm	Μεγιστη Δύναμη kN	Αντοχή Ξελευσμού N/mm ²	Όριο Διαρροής N/mm ²	Επιμήκυνση %	Παρατηρήσεις
1	4.20 14.90	50.0	39.58	632.4	610.3	18.2 ✓	OK



ΝΣ/ΔΝΧ

Τμήμα Εργαστηρίων/ΕΛΥ

ΕΣ1
ΕΣ1
ΕΣ1
ΕΣ1

Ημερομηνία : 22.06.1992

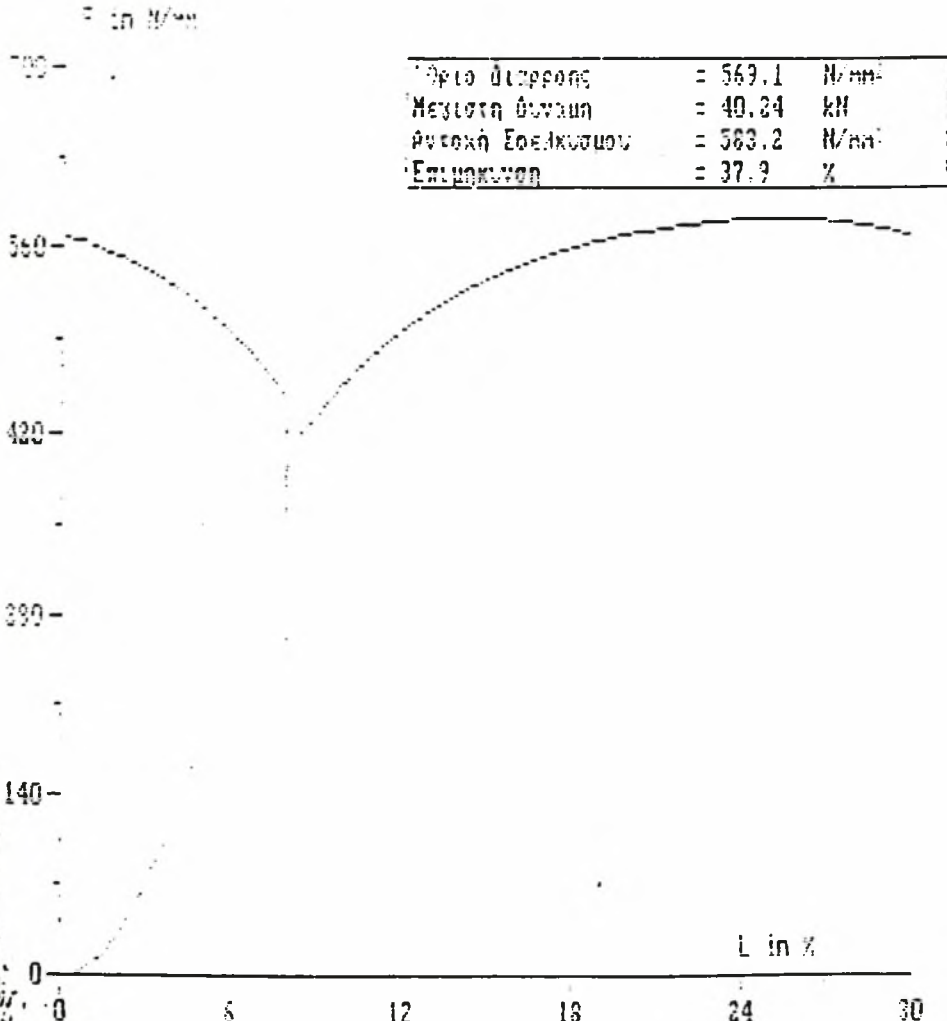
Ώρα 09:22:03

Όνομασία υλικού : ΕΛΑΣΜΑΤΑ D36
Προδιαγραφή :
Όνομα προμηθευτή :
Αριθμός ταξινόμησης: 1Z1 Repeated

2

0.4

η	Μήκος 3 Πλάτες	Μήκος (L ₀)	Μεγίστη Δύναμη	Αντοχή Εφελκυσμού	Όσοι Διαρροής	Επιμήκυνση	Παρατηρήσεις
	mm	mm	kN	N/mm ²	N/mm ²	%	
1	45.7	15.10	40.24	583.2	569.1	37.9	



Zwick PC - Software Z7002

A. ΚΥΠΡΙΑΝΗΣ



HELLENIC



SHIPYARDS Co.

POSTAL ADDRESS P O BOX 3480
102 33 ATHENS

HEAD OFFICE 5, KOUKARI STR
102 33 ATHENS

CABLES SHIPYARD ATHENS

REG No 41/01.0.06.442

TELE ATHENS OFFICE 215123
SKARAMANGA YARD 215793, 215395
215567, 215372

PHONES { ATHENS OFFICE { 3611 141 (3 LINES)
5573 350 (18 LINES)
SKARAMANGA YARD { 5572 610 (10 LINES)
5572 710 (18 LINES)

YOUR REF

OUR REF

ATHENS 23-4 1992

WPS N° FRG/II/20

MICROGRAPHIC INSPECTION

N° 1





Test-Record

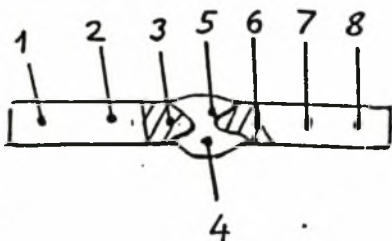
No.:
Sheet: 1/2
Date:

Order No.: FRIGATE MERO 200 HN

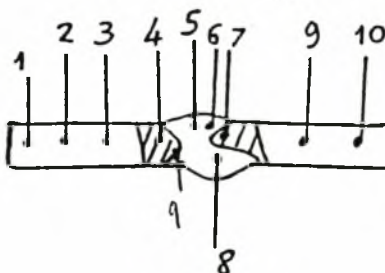
On Order of:

Identification: WPS 1

Macrosection and Hardness test



Sp. 1.1.



Sp. 1.2.

Judgement:

Specimen 1.1.	N° of Indentation	Hardness HV 10	Specimen 1.2.	N° of Indentation	Hardness HV 10
	1	168		1	167
	2	167		2	170
	3	203		3	170
	4	246		4	223
	5	243		5	184
	6	220		6	210
	7	179		7	217

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

- **Λίστα του προγράμματος Fortran για τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού πεδίου. Μονοδιάστατο μοντέλο (1-D)**
- **Λίστες των προγραμμάτων Fortran που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατανομής θερμότητας με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο (3-D)**
- **Αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων όπως αυτά δόθηκαν με βάση τα προγράμματα (κάποια αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των διαγραμμάτων που χρησιμοποιούνται στο 6^ο κεφάλαιο).**

```

program diplo
PARAMETER (n=11,K=500,LK=5)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION TEMP(n),Z(n),THERM(K),PEAK(N),TIM(K),THERM1(K)
DIMENSION THERM2(K)

```

C
C
C

```

*** ΔΩΣΕ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ***

```

```

open (8,file='ex5.txt')
PRINT *, 'ΔΩΣΕ : ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ (WATTS) , ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ (M/SEC)
3, AKTINA ΔΕΣΜΗΣ (M) , ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ'
READ (*,495) Q,U,RO,AB
PRINT *, 'ΔΩΣΕ:ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ(W/mC),ΘΕΡΜΟΔΙΑΧΥΤΟΤΗΤΑ (M.M/SEC)
3,ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ χ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (J/m.m.m.C) , ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ C1, ΛΑΝΘΑ
3ΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ(J/m.m.m)'
READ (*,500) CON,DIF,CP,C1,HL
PRINT *, 'ΔΩΣΕ:ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ(m),ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(C),ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
3 ΤΗΣΗΣ (C)'
READ (*,510) THIK,TO,TMEL
495 FORMAT (4F14.7)
500 FORMAT (5F18.7)
510 FORMAT (3F14.7,4I3)
WRITE (*,1050)
WRITE (*,1100) Q,U,RO,AB
WRITE (*,1150) CON,DIF,CP,C1,HL
WRITE (*,1200) THIK,TO,TMEL
1000 FORMAT ('1',21('****')/1H,'* ',80X,' *'/
11H ,'* ',20A4,' *'/1H ,'* ',80X,' *'/
21H ,21('****'))
1050 FORMAT('0','*****ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ,ΣΕ ΣΥΝΑ
1ΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ(t) Η ΜΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ(Z) *****'////)
1100 FORMAT ('0',' ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ'/
1/6X,'ΙΣΧΥΣ ΔΕΣΜΗΣ (WATTS) -----',F14.7/
2/6X,'ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΕΣΜΗΣ (M/SEC)-----',F14.7/
3/6X,'ΑΚΤΙΝΑ ΔΕΣΜΗΣ (M) -----',F14.7/
4/6X,'ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ -----',F14.7////)
1150 FORMAT ('0','ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ'/
1/6X,'ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ(Watt/mC)-----'F18.7/
2/6X,'ΘΕΡΜΟΔΙΑΧΥΤΟΤΗΤΑ (M.M/SEC)-----'F18.7/
3/6X,'ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ χ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (J/m.m.m.C)-----'F18.7/
4/6X,'ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ C1-----'F18.7/
5/6X,'ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΟΓΚΟΥ (J/m.m.m) ---'F18.7////)
1200 FORMAT ('0','ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ (m)-----',F14.7////
12X,'ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (C) -----',F14.7////
22X,'ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΗΣΗΣ (C) -----',F14.7////)

```

C

```

-----
q=1140.
u=0.6/60.
ro=0.0012
ab=1.
con=50.
dif=.00001389
CP=4264960.0
c1=1.
thik=.004
to=20.
tmel=1500
HL=402010000.

```

```

PI=3.1415927
E=2.7182818

```

C

```

-----
D1=(PI**3)*((TMEL-TO)*RO)**2
D2=CP*CON
D3=4.*(AB**2)*C1*Q

```



```

ED=(D1*D2)/D3
ER=Q/(U*RO)
IF (ER.GE.ED) THEN
WRITE(8,*) 'ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΥΤΕΣ ΘΑ ΕΧΟΥΜΕ ΤΗΗ!'
GOTO 333
ELSE
WRITE(8,*) 'ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΥΤΕΣ ΔΕΝ ΘΑ ΕΧΟΥΜΕ ΤΗΗ!'
ENDIF
333 TB=RO**2/(4.*DIF)
PRINT *, 'ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΙΝΕΙ ΤΗΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚ
3ΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ, ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ(z), ΚΡΑΤΩΝΤΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟ ΤΟ ΧΡΟ
3ΝΟ, ή ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ(t) ΚΡΑΤΩΝΤΑΣ ΣΤΑΘΕΡΟ ΤΟ ΒΑΘΟΣ.'
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ, ΒΑΘΟΣ(z) ή ΧΡΟΝ
3ΟΣ(t)'
PRINT *, 'ΩΣΤΕ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙ Η ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ'
PRINT *, 'ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΒΑΘΟΥΣ(T-z) ή ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΧΡΟΝΟΥ(T-t).'
PRINT *, 'ΠΙΕΣΕ ΤΟ 0 ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ (T-z) ή ΟΠΟΙΟΔΗΠΟΤΕ ΑΛΛΟ ΝΟΥΜΕΡΟ
&ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ (T-t):'
READ *, OMEGA
IF (OMEGA.EQ.0.0) THEN
PRINT *, 'ΕΠΙΛΕΞΑΤΕ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (T-z).'
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ t ΠΟΥ ΘΕΛΕΙΣ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΕΙΣ ΤΗΝ
&ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ(σε sec):'
READ *, TIME
CALL ZZERO(DIF, C1, RO, U, TIME, TB, ZO)
WRITE (8,*) 'ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ t=', TIME
WRITE (8,*)
WRITE (8,*) 'ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ' 'ΒΑΘΟΣ'
WRITE (8,*) '-----'
DO 20 I=1, n
20 Z(I)=(THIK/(N-1))*I-THIK/(N-1)
DO 24 I=1, n
CALL KATAN(TEMP, Z, TO, AB, Q, U, CON, TIME, TB, ZO, DIF, n)
24 WRITE (8,*) TEMP(I), Z(I)
-----
C
ELSE
C
-----
PRINT *, 'ΕΠΙΛΕΞΑΤΕ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ (T-t).'
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΟ ΒΑΘΟΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ z ΓΙΑ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΘΕΛΕΙΣ ΝΑ ΥΠΟ
&ΛΟΓΙΣΕΙΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (σε m):'
READ *, ZC
WRITE (8,*) 'ΓΙΑ ΤΟ ΒΑΘΟΣ Z=', ZC
WRITE (8,*)
WRITE (8,*) 'ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ' 'ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ'
WRITE (8,*) '-----'
THERM(1)=TO
TIM(1)=0.0
R1=(TB/5.)/(TB/LK)
R2=(5.*TB)/(TB/LK)
DO 111 I=2, R1
T=(I-1)*TB/LK
TIM(I)=T
CALL ZZER(DIF, C1, RO, U, ZO)
CALL KATANOM(TT, ZC, T, TO, AB, Q, U, CON, TB, ZO, DIF)
THERM(I)=TT
WRITE (8,*) THERM(I-1), TIM(I-1)
111 CONTINUE
DO 112 I=R1+1, R2
T=(I-1)*TB/LK
TIM(I)=T
G=I-R1+1
CALL ZZER(DIF, C1, RO, U, ZO)
CALL KATANOM(TT, ZC, T, TO, AB, Q, U, CON, TB, ZO, DIF)
THERM1(I)=TT
CALL ZZE(DIF, C1, RO, U, ZO)

```

```

CALL KATANOM(TT,ZC,T,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM2(I)=TT
THERM(I)=(((R2-R1)-G)/(R2-R1))*THERM1(I)+G/(R2-R1)*THERM2(I)
WRITE (8,*) THERM(I-1),TIM(I-1)
112 CONTINUE
DO 113 I=R2+1,K
T=(I-1)*TB/LK
TIM(I)=T
CALL ZZE(DIF,C1,RO,U,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZC,T,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
WRITE (8,*) THERM(I-1),TIM(I-1)
113 CONTINUE

```

```

XMAX=THERM(1)
DO 13 I=2,K
X=THERM(I)
IF (X.GT.XMAX) THEN
XMAX=X
ENDIF

```

```
13 CONTINUE
```

C

```
-----
ENDIF
```

C

```

DO 22 I=1,n
22 Z(I)=(THIK/(N-1))*I-THIK/(N-1)
DO 60 J=1,N
ZX=Z(J)
DO 50 I=2,K
THERM(1)=TO
T=(I-1)*TB/100.
CALL ZZERO(DIF,C1,RO,U,T,TB,ZO)
CALL KATANOM(TT,ZX,T,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
THERM(I)=TT
50 CONTINUE
PEAK(J)=THERM(1)
DO 15 I=2,K
X=THERM(I)
IF (X.GT.PEAK(J)) THEN
PEAK(J)=X
ENDIF

```

```
15 CONTINUE
```

```
60 CONTINUE
```

```

WRITE (8,*) '*****'
WRITE (8,*) '          ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ          ΒΑΘΟΣ'
WRITE (8,*) '-----'
DO 45 J=1,N

```

```
45 WRITE (8,*) PEAK(J),Z(J)
```

```
GOTO 1111
```

```
1111 end
```

C

```

-----
SUBROUTINE KATANOM(TT,Z1,TIME,TO,AB,Q,U,CON,TB,ZO,DIF)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
A1=((Z1+ZO)**2)/(4.*(DIF)*(TIME))
A2=SQRT(TIME*(TIME+TB))
A3=(AB*Q)/(U*2.*PI*CON)
TT=TO+(A3/A2)*EXP(-A1)
RETURN
END

```



```

SUBROUTINE ZZERO(DIF,C1,RO,U,TIME,TB,ZO)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
A1=SQRT(PI)/E
A2=SQRT((DIF*RO)/(C1*U))
TB1=1.0000000000000001*TB
TB2=0.9999999999999999*TB
IF (TIME.GT.TB1) THEN
ZO=SQRT(A1*A2*RO)
ENDIF
IF (TIME.LT.TB2) THEN
ZO=SQRT((PI*DIF*RO)/(2.*E*C1*U))
ENDIF
IF (TIME.EQ.TB) THEN
ZO=(SQRT(A1*A2*RO)+SQRT((PI*DIF*RO)/(2.*E*C1*U)))/2.
ENDIF
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE KATAN(TT,Z1,TO,AB,Q,U,CON,TIME,TB,ZO,DIF,n)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Z1(n),TT(n)
PI=3.1415927
E=2.7182818
DO 23 I=1,n
A1=((Z1(I)+ZO)**2)/(4.*(DIF)*(TIME))
A2=SQRT(TIME*(TIME+TB))
A3=(AB*Q)/(U*2.*PI*CON)
TT(I)=TO+(A3/A2)*EXP(-A1)
23 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ZZER(DIF,C1,RO,U,ZO)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
ZO=SQRT((PI*DIF*RO)/(2.*E*C1*U))
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ZZE(DIF,C1,RO,U,ZO)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
PI=3.1415927
E=2.7182818
A1=SQRT(PI)/E
A2=SQRT((DIF*RO)/(C1*U))
ZO=SQRT(A1*A2*RO)
RETURN
END

```

```

program DFR
parameter (N=100)
REAL TEMP(N)
OPEN (4,file='LASE9.TXT')
Q=1500.
U=0.0066
READ *,T,Y,Z
PI=3.1415927
con=50.
dif=0.00001389
dlength=0.15
w=0.15
thick=0.004
tempo=15.
DO 1000 I=1,N+1
X=DLENGTH*(FLOAT(I-1)/FLOAT(N))
P=(0.5*U/DIF)*SQRT((X-U*T)**2+Y**2+Z**2)
V=(0.5*U/DIF)*(X-U*T)
MI=(Q*U)/(4*PI*CON*DIF)
F=(1/P)*EXP(-(P+V))
TEMP(I)=TempO+MI*F
1000 CONTINUE
print *,f
DO 1001 I=1,N
X=DLENGTH*(FLOAT(I-1)/FLOAT(N))
WRITE (4,*) TEMP(I),X
1001 CONTINUE

END

```

```

program DFR
parameter (N=100)
REAL TEMP(N)
OPEN (4,file='LASE18.TXT')
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΙΣΧΥ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΣΕ Watt'
READ *,Q
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ Watt/mK'
READ *,CON
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΔΙΑΧΥΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (λ/Cρ) ΣΕ m**2/sec'
READ *,DIF
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΣΕ m/sec'
READ *,U
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ (ΜΗΚΟΣ-ΠΛΑΤΟΣ-ΠΑΧΟΣ) ΣΕ
@ m'
READ *,DLENGTH,W,THICK
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΗΝ ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ Θo'
READ *,TEMPO
PRINT *, 'ΔΩΣΕ ΤΙΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΠΟΥ ΘΕΛΕΙΣ ΝΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣ
#ΕΙΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ (X,Y,Z)=
READ *,X,Y,Z
PI=3.1415927
con=50.
dif=0.00001389
dlength=0.15
w=0.15
thick=0.004
tempo=15.
DO 1000 I=1,N
T=DLENGTH/U*(FLOAT(I-1)/FLOAT(N))+0.0001
P=(0.5*U/DIF)*SQRT((X-U*T)**2+Y**2+Z**2)
V=(0.5*U/DIF)*(X-U*T)
MI=(Q*U)/(4*PI*CON*DIF)
F=(1/P)*EXP(-(P+V))
TEMP(I)=TempO+MI*F
1000 CONTINUE
print *,f
DO 1001 I=1,N
T=(DLENGTH/U)*FLOAT(I-1)/FLOAT(N)+0.0001
WRITE (4,*) TEMP(I),T
1001 CONTINUE

END

```

```
PROGRAM POO
Q=980.
U=0.0033333
dif=0.000013
con=43.2
X=-1.
Y=0.0
Z=0.0
T=2.143081
TEMPO=15.
PI=3.1415927
P=(0.5*U/dif)*SQRT((X-U*T)**2+Y**2+Z**2)
V=(0.5*U/dif)*(X-U*T)
MI=(Q*U)/(4*PI*CON*DIF)
F=(1/P)*EXP(-(P+V))
TEMP=TempO+MI*F
PRINT *,TEMP
PRINT *,MI
PRINT *,F
END
```