



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

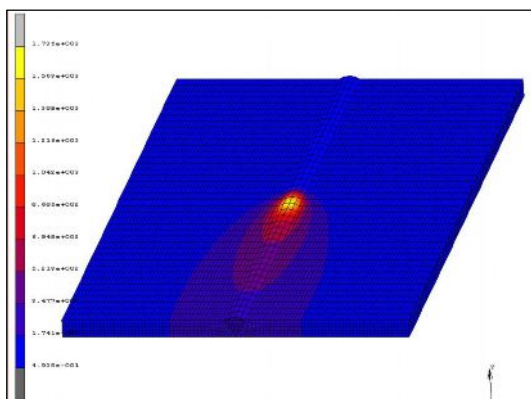
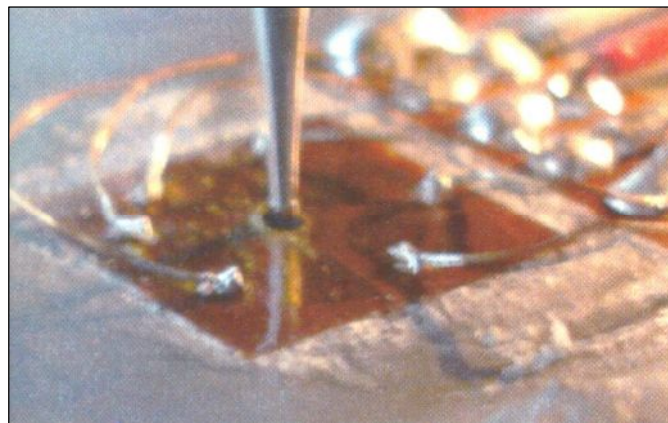
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Θέμα:

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙ-
ΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ
ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕ-
ΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛ-
ΛΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ**

ΚΑΤΣΑΩΡΑΣ Ν. ΙΩΑΝΝΗΣ



επιβλέπων:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
καθηγητής

υποστήριξη:

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ
δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός

ΑΘΗΝΑ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ.....	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Γενικός χαρακτηρισμός – τοπολογία μίας συγκολλητής σύνδεσης.....	5
1.3 Χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο.....	6
1.4 Φύση – Ιδιότητες – Σχηματισμός του ηλεκτρικού τόξου.....	7
1.5 Ρεύμα συγκόλλησης.....	7
1.6 Επένδυση του ηλεκτροδίου.....	8
1.7 Παράμετροι συγκόλλησης.....	9
1.8 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ.....	18
2.1 Γενικά.....	18
2.2 Κατάταξη των παραμενουσών τάσεων.....	19
2.3 Επιδράσεις – αποτελέσματα των παραμενουσών τάσεων.....	20
2.4 Οι παραμενουσες τάσεις στις συγκολλήσεις.....	20
2.4.1 Σύμβαση τάσεων στην συγκόλληση.....	21
2.4.2 Θεωρητική κατανομή των τάσεων.....	22
2.4.3 Βασικοί παράγοντες που σχετίζονται με την ύπαρξη των παραμενουσών τάσεων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ.....	28
3.1 Γενικά.....	28
3.2 Μηχανικές μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων.....	28
3.2.1 Μέτρηση μέσω καμπυλότητας (curvature).....	28
3.2.2 Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπής (hole drilling).....	29
3.2.3 Μέτρηση μέσω «ενδοτικότητας» (compliance method).....	29
3.3 Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων με διάθλαση.....	29
3.3.1 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam diffraction).....	29
3.3.2 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ακτίνων X (laboratory X – ray diffraction).....	29
3.3.3 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης νετρονίων (neutron beam diffraction).....	30
3.3.4 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης «σκληρών» ακτίνων X (hard X – ray diffraction).....	30
3.4 Άλλες μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων.....	31
3.4.1 Μαγνητικές & ηλεκτρικές τεχνικές.....	31
3.4.2 Υπερηχητικές τεχνικές.....	32
3.4.3 Θερμοελαστικές μέθοδοι.....	32
3.4.4 Φωτοελαστικές μέθοδοι.....	32
3.4.5 Μέθοδοι μέτρησης παραμορφώσεων λόγω μετασχηματισμού.....	32
3.5 Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπών (hole drilling method).....	35

3.5.1	Αρχή της μεθόδου.....	36
3.5.2	Βασικά στάδια της μεθόδου.....	36
3.5.3	Ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης διαμπερούς οπής (through hole analysis).....	37
3.5.4	Ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης τυφλής οπής (blind hole analysis).....	42
3.5.5	Προσδιορισμός των απαραίτητων συντελεστών.....	44
3.5.6	Συντελεστές για τις ροζέτες της εταιρίας «Micro – Measurements».....	45
3.5.7	Αναγωγή των δεδομένων – διάνοιξη τυφλής οπής.....	49
3.5.8	Υπολογισμός των ισοδύναμων ομοιόμορφων παραμενουσών τάσεων.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....		54
4.1	Κοπή και μορφοποίηση των ελασμάτων – αναγνώριση του υλικού.....	54
4.2	Συγκόλληση των ελασμάτων.....	58
4.3	Μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο διάνοιξης οπής (hole drilling).....	63
4.3.1	Προετοιμασία τα επιφάνειας.....	63
4.3.2	Κόλληση της ροζέτας.....	68
4.3.3	Σύνδεση της ροζέτας με τα όργανα παραμορφώσεων.....	71
4.3.4	Τοποθέτηση της διάταξης διάτρησης.....	77
4.4	Επεξεργασία των μετρήσεων & συμπεράσματα.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ MARC.....		103
5.1	Γενικά.....	103
5.2	Τα πεπερασμένα στοιχεία στις συγκολλήσεις.....	103
5.3	Θεωρητικό υπόβαθρο της τρισδιάστατης θερμο – μηχανικής (ελαστοπλαστικής) ανάλυσης.....	105
5.4	Βασικές θεωρήσεις – παραδοχές.....	109
5.5	Το Marc Mentat.....	110
5.5.1	Κατασκευή γεωμετρίας & πλεγματοποίηση.....	111
5.5.2	Καταχώρηση γεωμετρικών ιδιοτήτων για τα solid στοιχεία.....	120
5.5.3	Καταχώρηση υλικού στο μοντέλο.....	120
5.5.4	Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών.....	121
5.5.5	Εισαγωγή των φορτίσεων.....	123
5.5.6	Καταχώρηση loadcases & jobs.....	126
5.5.7	Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	127
5.5.7.1	Το θερμικό πρόβλημα.....	128
5.5.7.2	Το μηχανικό πρόβλημα.....	134
5.5.7.3	Εκ νέου επίλυση του μοντέλου με νέες οριακές συνθήκες συγκράτησης.....	142
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΣΥΝΟΨΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		150
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		154

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Μανωλάκου Δ. στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, έχει σαν στόχο την μελέτη των παραμενουσών τάσεων που γεννώνται σε συγκολλήσεις χαλύβων. Πιο συγκεκριμένα, έγινε τόσο πειραματικός όσο και αναλυτικός υπολογισμός των παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση χάλυβα και κατόπιν αυτών κατεβλήθη προσπάθεια ανάλυσης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να συγκεραστούν τα αποτελέσματα πειράματος και προσομοίωσης και παράλληλα να συγκριθούν με τα θεωρητικώς αναμενόμενα. Παράπλευρος στόχος της εργασίας υπήρξε επίσης η αξιοποίηση του εξοπλισμού του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών και η επακόλουθη απόκτηση της τεχνογνωσίας της λειτουργίας του η οποία επήλθε τόσο λόγω του πειράματος και της μοντελοποίησης όσο και των προβλημάτων που εμφανίστηκαν κατά τα δύο αυτά στάδια της εργασίας. Τελικά πιστεύω πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν αξιοσημείωτο ενδιαφέρον ιδιαίτερα για όσος θελήσουν είτε να ασχοληθούν με το θέμα που πραγματεύεται η εργασία είτε να χρησιμοποιήσουν τον υλικοτεχνικό εξοπλισμό και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνησή της.

Προτού ξεκινήσω να παρουσιάζω το αποτέλεσμα της ενασχόλησής μου με το θέμα της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μανωλάκο Δ. που μου έδωσε την δυνατότητα, στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας, να έρθω σε επαφή με ένα θέμα το οποίο συνδυάζει την, απαραίτητη παντού, θεωρητική ενασχόληση με την διεξαγωγή πειράματος και μοντελοποίησης, τα οποία όλα μαζί, μετά την εμπειρία που απέκτησα, θεωρώ πως καθιστούν πλήρη και ολοκληρωτική την ενασχόληση με οποιοδήποτε θέμα σε οποιοδήποτε επιστημονικό πεδίο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαρκόπουλο Άγγελο διδάκτορα μηχανολόγο μηχανικό για την πολύτιμη υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, καθώς επίσης και το προσωπικό του εργαστηρίου και ιδιαίτερα τους κ. Σπηλιώπουλο Δ., Κερασιώτη Κ., Μελισσά Ν. και Κωστάζο Π. χωρίς την βοήθεια των οποίων η πραγματοποίηση του πειράματος θα ήταν αδύνατη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους Μπαδογιάννη Ε. και Ξάνθη Χ., προσωπικό του εργαστηρίου της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών οι οποίοι έχουν ασχοληθεί με το θέμα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία και η βοήθειά τους και οι υποδείξεις τους υπήρξαν κάτι παραπάνω από πολύτιμες.

Αθήνα, 17 – 07 – 2009
Κατσαώρας Ιωάννης

Κεφάλαιο 1^ο: **ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ**

1.1 Γενικά

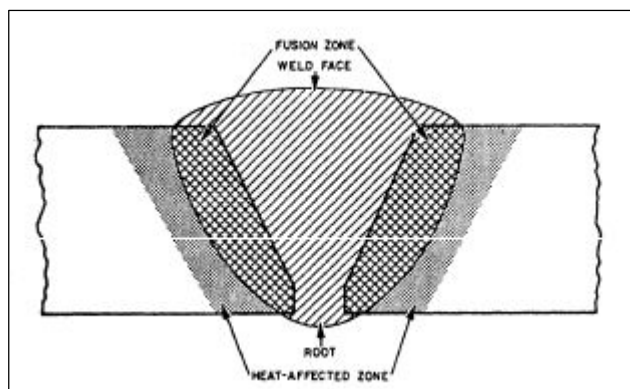
Οι συγκολλήσεις είναι μία από τις βασικές μεθόδους - τεχνικές υλοποίησης και επισκευής μεγάλου πλήθους και διαφόρων ειδών κατασκευών που βρίσκουν εφαρμογή στο σύνολο σχεδόν των κλάδων της μηχανολογίας. Η διάδοσή τους οφείλεται στην δυνατότητα δημιουργίας κατασκευών και προϊόντων που χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα τόσο τεχνικά όσο και εκμεταλλεύσιμα. Ορισμένα από αυτά είναι η δυνατότητα χρήσης ποικιλίας υλικών εντός της ίδιας κατασκευής, η αύξηση της αξίας χρήσης των προϊόντων, η βελτίωση της ποιότητάς τους καθώς και η αύξηση της απόδοσης της παραγωγής.

Η ανάπτυξη και εξέλιξη των συγκολλήσεων με την πάροδο των χρόνων έδωσε νέες προοπτικές στον τομέα της σύνδεσης των υλικών, αντικαθιστώντας σε πολλές περιπτώσεις άλλες μεθόδους που εξυπηρετούσαν τους ίδιους σκοπούς όπως η ήλωση. Παράλληλα ανοίχθηκαν νέοι ορίζοντες στους υπάρχοντες τομείς της μηχανολογίας ενώ έγινε εφικτή και η ανάπτυξη νέων τομέων, εκτός των άλλων και χάρη στην χρησιμοποίηση εξελιγμένων τεχνολογιών συγκόλλησης. Σήμερα πια, οι συγκολλήσεις εντοπίζονται σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών που εκτείνεται από την ναυπηγική, την κατασκευή γεφυρών, μεταλλικών κτιρίων και δοχείων πίεσης έως τη διαστημική και την πυρηνική τεχνολογία.

Όπως γίνεται φανερό και από τα όσα προαναφέρθηκαν στην εισαγωγή, η αναλυτική παρουσίαση του συνόλου των μεθόδων συγκόλλησης καθώς και όλων των θεμάτων που σχετίζονται με τις συγκολλήσεις ξεφεύγει από του στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στην συνέχεια θα περιοριστούμε στην παρουσίαση των μεθόδων που θα ακολουθήσουμε στην προκειμένη περίπτωση (*Χειρωνακτική Συγκόλληση Τόξου με Επενδεδυμένο Ηλεκτρόδιο – Manual Metal Arc, MMA & Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων – Metal Inert Gas, MIG*) καθώς και άλλων παραμέτρων των συγκολλήσεων που θα μας απασχολήσουν (ειδικότερα σε επόμενο κεφάλαιο κατά την παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας).

1.2 Γενικός χαρακτηρισμός - τοπολογία μίας συγκολλητής σύνδεσης

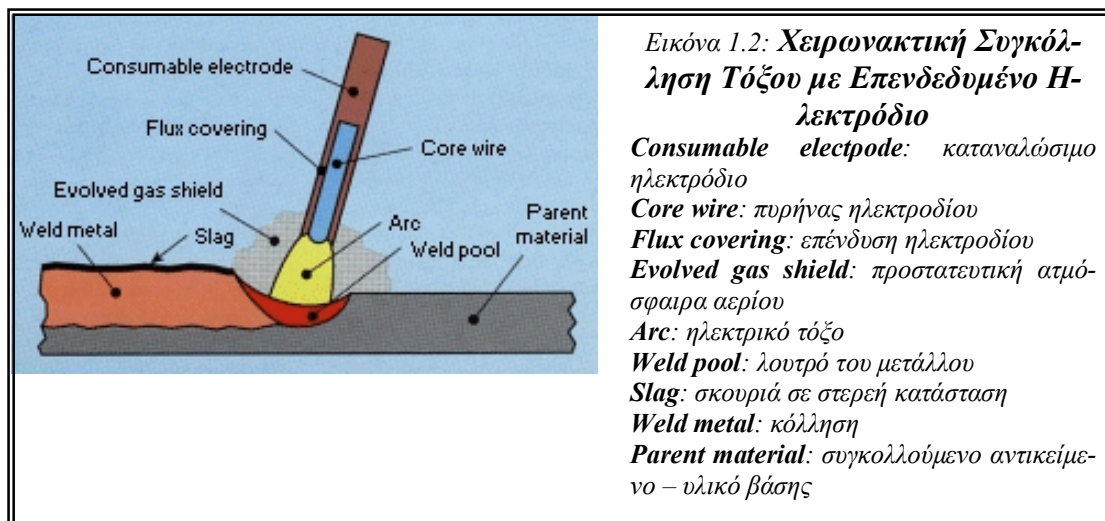
Στην γενική περίπτωση, η περιοχή της συγκολλητής σύνδεσης αποτελείται από το μητρικό υλικό (υλικό βάσης) των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν, και από το υλικό της κόλλησης το οποίο αποτελεί μίγμα του υλικού που υλοποιεί την σύνδεση με το μέταλλο βάσης. Όμως, λόγω της αλληλεπίδρασης της θερμικής πηγής με το μέταλλο βάσης εμφανίζεται και μία Τρίτη ζώνη πολύ σημαντική, η θερμικά επηρεαζόμενη, δηλαδή στρώμα μητρικού μετάλλου που εφάπτεται με την κόλληση, στο οποίο από το αποτέλεσμα της θερμότητας συγκόλλησης εμφανίζονται συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα. Το πλάτος της ζώνης αυτής εξαρτάται από την προσαγόμενη θερμική ενέργεια καθώς και από τον βαθμό συγκέντρωσης της θερμικής πηγής. Εντός της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης εντοπίζονται υποπεριοχές οι οποίες είναι η ζώνη υπερθέρμανσης, η ζώνη εξομάλυνσης και η ζώνη μη πλήρους εξομάλυνσης.



Εικόνα 1.1: Εγκάρσια τομή συγκόλλησης επιπέδου ελάσματος. Διακρίνονται οι τρεις χαρακτηριστικές περιοχές. (Α) Ζώνη τήξης (*fusion zone*) η οποία περιλαμβάνει τόσο ένα μέρος του μετάλλου βάσης το οποίο τήκεται πλήρως όσο και το μέταλλο κόλλησης, (Β) Ζώνη θερμικά επηρεαζόμενη (*heat affected zone*) και (Γ) Ζώνη μετάλλου βάσης η οποία περιλαμβάνει το ανεπηρέαστο μέταλλο στην περιοχή μακριά από την ραφή (στο σχήμα απεικονίζεται με λευκό χρώμα)

1.3 Χειρωνακτική Συγκόλληση Τόξου με Επενδεδυμένο Ηλεκτρόδιο (*Manual Metal Arc – MMA*)

Η συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο είναι τεχνολογική διαδικασία με τη οποία επιτυγχάνεται η σύνδεση μετάλλων με τήξη, στην οποία η απαραίτητη πηγή ενέργειας για τη εκτέλεση της κόλλησης είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν πάμπολλες μέθοδοι συγκόλλησης με ηλεκτρικό τόξο. Η χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο είναι η πιο συνηθισμένη από αυτές. Ορισμένοι λόγοι που οδήγησα στη ευρεία χρήση της σε πληθώρα εφαρμογών είναι πως ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι σχετικά απλός και φθηνός, ο χειριστής (ηλεκτροσυγκολλητής) έχει σημαντική ευχέρεια ελεύθερων κινήσεων καθώς μπορεί να συγκολλά σε θέση απομακρυσμένη έως και 20m από τη πηγή ενέργειας και πως με μία απλή αλλαγή της κατηγορίας του ηλεκτροδίου έχουμε την δυνατότητα να συγκολλήσουμε ποικιλία μετάλλων χρησιμοποιώντας τις ίδιες μηχανές συγκόλλησης. Η συγκόλληση *MMA* εντάσσεται στην κατηγορία των *αυτογενών συγκολλήσεων*. Πρόκειται για τις συγκολλήσεις που επιτυγχάνονται με την θέρμανση των προς συγκόλληση μετάλλων μέχρι την τήξη τους και με την προσθήκη επιπρόσθετου αυτογενούς μετάλλου. Έτσι έχουμε σύντηξη του βασικού μετάλλου με το εναποτιθέμενο υλικό το οποίο προέρχεται από το ηλεκτρόδιο και συνεισφέρει στο σχηματισμό της κόλλησης.



Εικόνα 1.2: Χειρωνακτική Συγκόλληση Τόξου με Επενδεδυμένο Ηλεκτρόδιο

Consumable electrode: καταναλώσιμο ηλεκτρόδιο

Core wire: πυρήνας ηλεκτροδίου

Flux covering: επένδυση ηλεκτροδίου

Evolved gas shield: προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου

Arc: ηλεκτρικό τόξο

Weld pool: λουτρό του μετάλλου

Slag: σκουριά σε στερεή κατάσταση

Weld metal: κόλληση

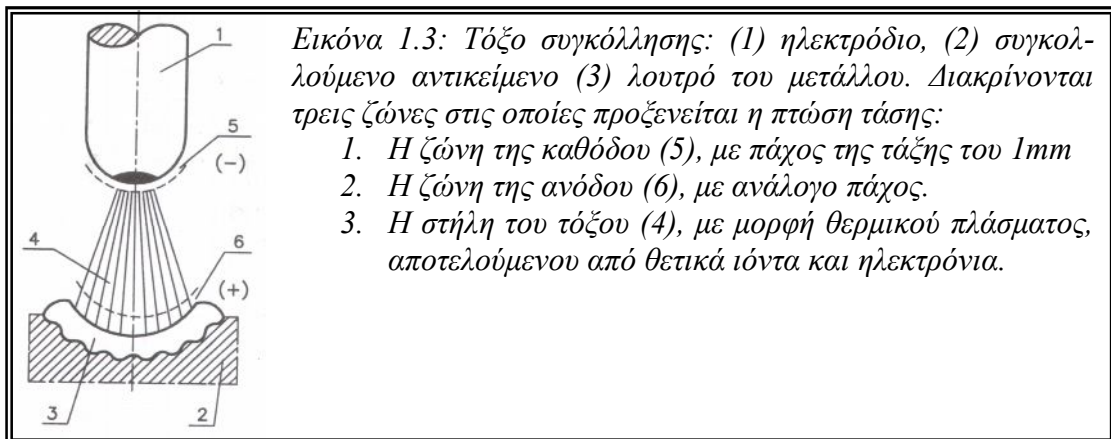
Parent material: συγκολλούμενο αντικείμενο – υλικό βάσης

1.4 Φύση – Ιδιότητες – Σχηματισμός του Ηλεκτρικού Τόξου

Για το «άναμμα» του ηλεκτρικού τόξου, το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή (τρίβεται) με το συγκολλούμενο αντικείμενο και τότε κλείνει το κύκλωμα του ρεύματος, ενώ η ηλεκτρική αντίσταση η οποία μεγιστοποιείται κατά την επαφή, οδηγεί στην υπερθέρμανση του άκρου του ηλεκτροδίου και στην συνέχεια, με ελαφρά ανύψωση του, σχηματίζεται το τόξο. Το μήκος του τόξου είναι κατά προσέγγιση ίσο με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου.

Για να μπορεί να δημιουργηθεί το τόξο, το στρώμα του ατμοσφαιρικού αέρα κατά την διέλευση του ρεύματος πρέπει να υποστεί ιονισμό, δηλαδή πρέπει να γίνει καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Η πηγή του ιονισμού αυτού είναι η κάθοδος, η οποία σε υψηλές θερμοκρασίες και με κατάλληλη υψηλή ηλεκτρική τάση εκπέμπει προς τη άνοδο ηλεκτρόνια με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια αυτά, κατά την διαδρομή τους, συγκρούονται με μόρια των αερίων και των ατμών αφαιρώντας από αυτά ηλεκτρόνια. Έτσι τα μόρια αυτά μετατρέπονται σε ιόντα με θετικό ηλεκτρικό φορτίο.

Τα ηλεκτρόνια έλκονται από την άνοδο, ενώ τα ιόντα από την κάθοδο. Η απαραίτητη ηλεκτρική τάση, η οποία κυμαίνεται από 20 έως 35 V, για την διατήρηση του τόξου εξαρτάται από το μήκος του τόξου, τη ένταση του ρεύματος και από άλλες συνθήκες.



Για το «άναμμα» του τόξου απαιτείται υψηλότερη τάση απ' ό τι κατά την διάρκεια της συγκόλλησης και όσο αυξάνεται ο ιονισμός στην περιοχή του τόξου τόσο η τάση πέφτει. Η αρχική αυτή τάση, αναγκαία για το άναμμα του τόξου (πρακτικά αυξημένη με τη πτώση τάσης λόγω των ηλεκτραγωγών), είναι η ελάχιστη τιμή τάσης που πρέπει να έχει η πηγή ενέργειας (μηχανή συγκόλλησης) στην «εν κενώ» λειτουργία. Μετά το «άναμμα» του τόξου η τάση στους ακροδέκτες πέφτει στη τιμή που προαναφέραμε (20 έως 35 V) και παραμένει σταθερή διατηρώντας το τόξο αναμμένο.

1.5 Ρεύμα Συγκόλλησης

Η συγκόλληση μπορεί να εκτελεστεί είτε με συνεχές είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα. Η επιλογή μας ανάλογα με την περίπτωση σχετίζεται με τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τύπος ηλεκτροδίου. Κατά κανόνα, όλοι οι τύποι ηλεκτροδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συγκόλληση με συνεχές ρεύμα. Αντίθετα ορισμένοι

μόνο τύποι ηλεκτροδίων μπορούν να εκτελέσουν συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα.

- Τύπος πηγής ενέργειας. Οι μετασχηματιστές είναι ευκολότεροι στη εκμετάλλευση σε σχέση με τις περιστρεφόμενες γεννήτριες ή τους ανορθωτές.
- Φαινόμενο μαγνητικού φύσηματος. Με το συνεχές ρεύμα το τόξο μπορεί να αποκλίνει από το άξονα του ηλεκτροδίου στα πλάγια προς την ίδια ή την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με αυτή της συγκόλλησης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητικό φύσημα του τόξου, προξενείται από τη παρουσία μαγνητικών πεδίων στον χώρο της συγκόλλησης και μπορεί να διαταράξει σημαντικά την όλη διαδικασία. Τα μαγνητικά αυτά πεδία μπορεί να εμφανιστούν είτε λόγω μαγνήτισης του συγκολλούμενου αντικειμένου κατά την παρασκευή του είτε (συνηθέστερα) με την διέλευση του ρεύματος συγκόλλησης από το μητρικό υλικό.

Συνήθως με τη χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος το μαγνητικό φύσημα σπανίως συμβαίνει καθώς το αντικείμενο εκτίθεται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Επίσης με κατάλληλη ρύθμιση της θέσης σύνδεσης του αγωγού επιστροφής το φαινόμενο αυτό μπορεί να διορθωθεί.

- Κατά την χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος απαιτείται η χρησιμοποίηση υψηλότερων τιμών της τάσης «εν κενώ» λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει διότι το τόξο σβήνει, με κάθε πέρασμα του ρεύματος από το μηδέν, κατά την αλλαγή της πολικότητας. Έτσι, για την διατήρηση του λουτρού συγκόλλησης σε ρευστή κατάσταση, το τόξο πρέπει να ξανανάψει αμέσως πράγμα που σημαίνει πως η τάση στο τόξο πρέπει να υπερβαίνει τα 80V, τιμή αρκετά επικίνδυνη για τον χειριστή. Για τον λόγο αυτό είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί συνεχές ρεύμα μικρότερης τιμής.

1.6 Επένδυση του Ηλεκτροδίου

Η επένδυση του ηλεκτροδίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιτυχημένη ολοκλήρωση μίας συγκόλλησης. Η επένδυση αυτή, που αλλιώς ονομάζεται συλλίπασμα, χρησιμοποιείται για διάφορους λόγους, οι σημαντικότεροι εκ τω οποίων είναι οι ακόλουθοι:

- *Προστασία του λουτρού συγκόλλησης:* Η επένδυση λιώνει και αυτή στην περιοχή του τόξου όπως και ο πυρήνας του ηλεκτροδίου. Έτσι το συλλίπασμα καλύπτει τη επιφάνεια του ρευστού μετάλλου διαχωρίζοντάς το και παράλληλα προστατεύοντας το από το οξυγόνο και το άζωτο που εμπεριέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Μετά την στερεοποίηση το συλλίπασμα σχηματίζει σκουριά (κρούστα) πάνω από τη κόλληση η οποία πρέπει να αφαιρείται επιμελώς πριν από την εναπόθεση του επόμενου στρώματος κόλλησης (κορδονιού). Η ανάγκη για εύκολη αφαίρεση της σκουριάς αυτής καθιστά πολύ σημαντική την κατάλληλη επιλογή του τύπου του ηλεκτροδίου.
- *Σταθερότητα του τόξου:* Για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερων συνθηκών στην περιοχή του τόξου επιβάλλεται ο ταχύς ιονισμός της περιοχής του τόξου με όσο το δυνατόν χαμηλότερη τάση. Η επίτευξη του στόχου αυτού διευκολύνεται από την παρουσία ορισμένων στοιχείων στην περιοχή (διοξειδίο του τιτανίου, πυριτικού καλίου και ανθρακικού ασβεστίου) τα οποία προστίθενται στο συλλίπασμα.
- *Επιλογή της χημικής σύστασης του μετάλλου κόλλησης – Προσθήκη κραματικών στοιχείων:* Μέσω της επένδυσης του ηλεκτροδίου έχουμε την δυνατότητα να «μεταφέρουμε» στη τελική σύσταση της κόλλησης κάποια (κραματικά)

στοιχεία που επιθυμούμε. Το γεγονός αυτό αποτελεί μεγάλη διευκόλυνση στον σχεδιασμό της συγκόλλησης με τη χειρωνακτική μέθοδο καθώς μας δίνει ελευθερία κινήσεων στην επιλογή τόσο του μετάλλου βάσης όσο και του ηλεκτροδίου. Γενικά οι επιθυμητές κραματικές προσθήκες διανέμονται λιγότερο ή περισσότερο σε σταθερές αναλογίες ανάμεσα στο συλλίπασμα και το εναποτιθέμενο υλικό. Τελικά φροντίζουμε με κατάλληλους και «βολικούς» συνδυασμούς να επιτυγχάνουμε πάντα τις απαιτούμενες ιδιότητες της κόλλησης.

- *Αποξείδωση*: Ένα άλλο πλεονέκτημα που μας δίνει το συλλίπασμα είναι η ενσωμάτωση σε αυτό των οξειδίων (είτε του άνθρακα είτε των αποξειδωτικών μετάλλων) που σχηματίζονται κατά την συγκόλληση (όταν το λουτρό περιέχει μεγάλες ποσότητες οξυγόνου) και επιπλέον στην επιφάνεια του λουτρού. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς αποφεύγεται η συγκέντρωση των (δυσδιάλυτων) αυτών οξειδίων στο μέταλλο υπό μορφή πορώδους το οποίο είναι ιδιαίτερα επιβλαβές για την αντοχή της κόλλησης.

Τελειώνοντας την αναφορά μας στο ρόλο που διαδραματίζει η επένδυση του ηλεκτροδίου στη διαδικασία της συγκόλλησης, αξίζει να παραθέσουμε ένα συγκεντρωτικό πίνακα τω συστατικών που περιέχονται στα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια και του ρόλου που αυτά διαδραματίζουν.

<i>Συστατικό</i>	<i>Κύριοι λόγοι</i>	<i>Πρόσθετοι λόγοι</i>
<i>Οξείδιο του σιδήρου</i>	<i>Σχηματισμός σκουριάς</i>	<i>Σταθεροποιητής τόξου</i>
<i>Οξείδιο του τιτανίου</i>	<i>Σχηματισμός σκουριάς</i>	<i>Σταθεροποιητής τόξου</i>
<i>Οξείδιο του μαγγανίου</i>	<i>Συλλίπασμα</i>	-
<i>Φθορίτης του ασβεστίου</i>	<i>Σχηματισμός σκουριάς</i>	<i>Συλλίπασμα</i>
<i>Πυριτικό κάλιο</i>	<i>Σταθεροποιητής τόξου</i>	<i>συνθετικό</i>
<i>Άλλα πυριτικά</i>	<i>Σχηματισμός σκουριάς και σύνθεση</i>	<i>συλλιπάσματα</i>
<i>Ανθρακικό ασβέστιο</i>	<i>Δημιουργία αερίων</i>	<i>Σταθεροποιητής τόξου</i>
<i>Άλλα ανθρακικά</i>	<i>Δημιουργία αερίων</i>	-
<i>Κυτταρίνη</i>	<i>Δημιουργία αερίων</i>	-
<i>Σιδηρομαγγάνιο</i>	<i>Κραματικό συστατικό</i>	<i>Αποξειδωτικό</i>
<i>Σιδηροχρώμιο</i>	<i>Κραματικό συστατικό</i>	-
<i>Σιδηροπυρίτιο</i>	<i>Αποξειδωτικό</i>	-

1.7 Παράμετροι Συγκόλλησης

Το αποτέλεσμα της συγκόλλησης με την περιγραφόμενη μέθοδο εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη εμπειρία και τις ικανότητες του χειριστή. Για καθορισμένες τεχνολογικές συνθήκες συγκόλλησης συγκεκριμένης κατασκευής, οι παράμετροι συγκόλλησης αποτελούν για τον χειριστή αρχικά δεδομένα στα οποία προσαρμόζει τις δικές του εμπειρίες και ικανότητες. Ως βασικές παράμετροι συγκόλλησης λογίζονται οι ακόλουθες:

Ένταση ρεύματος συγκόλλησης

Η παράμετρος αυτή είναι η πλέον καθοριστική για το μέγεθος της θερμικής ενέργειας που θα μεταφέρει το τόξο και κατά συνέπεια για τη διεισδυτικότητα και τη ταχύτητα της τήξης. Η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως το είδος συγκολλούμενου υλικού και ηλεκτροδίου, το είδος του ρεύματος, την τεχνική συγκόλλησης και την θέση συγκόλλησης ενώ επιλέγεται συνήθως βάσει των δεδομένων που παρέχονται από καταλόγους των παραγωγών ηλεκτροδίων ή από εμπειρικούς τύπους.

Τάση του τόξου συγκόλλησης

Η τάση του τόξου είναι ανάλογη του μήκους του και επιδρά στο χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, στη ταχύτητα συγκόλλησης και την αποδοτικότητα της εναπόθεσης του συγκολλητικού υλικού. Αυξάνοντας τη τάση του τόξου (και κατ' επέκταση τη ενέργεια που μεταφέρει) αυξάνεται ο όγκος του λουτρού της κόλλησης τόσο κατά το πλάτος όσο και κατά το μήκος. Αυξάνοντας το μήκος του τόξου (και άρα και τη τάση του μέσω της αναλογικής τους σχέσης) έχουμε σημαντικές απώλειες θερμότητας στην ατμόσφαιρα καθώς και διασπορά της διαρροής του μετάλλου κατά τη μεταφορά του στο λουτρό της κόλλησης. Λόγω της διασποράς αυτής η εναπόθεση του μετάλλου κόλλησης γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς ελαττώνοντας τελικά την ταχύτητα συγκόλλησης. Γενικά η επιλογή του μήκους του τόξου ρυθμίζεται και εξαρτάται από τις ικανότητες του χειριστή, ενώ η επιλογή της τάσης εξαρτάται με τη σειρά της από το είδος του ηλεκτροδίου, την τεχνική συγκόλλησης, τη θέση της συγκόλλησης καθώς και από το είδος του ρεύματος.

Ταχύτητα συγκόλλησης

Ως ταχύτητα συγκόλλησης θεωρούμε την ταχύτητα μετατόπισης του ηλεκτροδίου αλλά και τη ταχύτητα εκτέλεσης ενός μέτρου της σύνδεσης. Έχει ιδιαίτερη σημασία όταν η κίνηση του ηλεκτροδίου είναι γραμμική, δηλαδή στη εκτέλεση της συγκόλλησης στη ρίζα (τη κατώτερη περιοχή της κόλλησης όπου οι στρώσεις εκτελούνται χρονικά πρώτες) καθώς οι υπόλοιπες στρώσεις ενδέχεται να πραγματοποιούνται και με μη γραμμικές κινήσεις.

Η ταχύτητα της προώθησης του τόξου κατά μήκος της σύνδεσης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως το είδος και την ένταση του ρεύματος, τη τάση του τόξου, την θέση συγκόλλησης, το πάχος του συγκολλούμενου υλικού, την μορφή της σύνδεσης και τις απαιτούμενες κινήσεις του άκρου του ηλεκτροδίου. Η τιμή της πρέπει να επιλέγεται τέτοια ώστε το τόξο συγκόλλησης να προπορεύεται ελάχιστα του λουτρού της κόλλησης. Τυχόν υπέρβαση της ενδεδειγμένης τιμής (για την κάθε περίπτωση) μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του βάθους διείσδυσης της τήξης του μετάλλου, στένωση του λουτρού της κόλλησης και ανωμαλίες των επιφανειών του μετώπου και του πορώδους της κόλλησης. Αντίθετα, η επιλογή ανεπαρκούς τιμής ταχύτητας συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει σε ρηχή διείσδυση, διαπλάτυνση του μετώπου και κύρτωσή του.

Διάμετρος ηλεκτροδίου

Η διάμετρος του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου επηρεάζει σημαντικά την πυκνότητα του ρεύματος συγκόλλησης και άρα τη μορφή των κορδονιών και το βάθος διείσδυσης. Αύξηση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου για σταθερή ένταση ρεύματος οδηγεί σε μείωση του βάθους διείσδυσης της τήξης και την αύξηση του πλάτους της κόλλησης. Γενικά η επιλογή της διαμέτρου του ηλεκτροδίου εξαρτάται κυρίως από το πάχος των συγκολλούμενων ελασμάτων, τη θέση συγκόλλησης, τον τρόπο προετοιμασία και το είδος της σύνδεσης και γίνεται από διάφορους πίνακες που συσχετίζουν όλα αυτά τα στοιχεία με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης τιμής. Οι δύο κύριες αλληλοσυγκρουόμενες τάσεις στη επιλογή της διαμέτρου του ηλεκτροδίου είναι οι εξής: από οικονομικής άποψης, επιβάλλεται η χρησιμοποίηση μεγάλων τιμών διαμέτρων, ενώ από την άποψη της ποιότητας συγκόλλησης (με παραμέτρους όπως την συγκολλητικότητα του υλικού και τις συνθήκες συγκόλλησης) επιβάλλεται ο περιορισμός της διαμέτρου του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου.

Κλίση του ηλεκτροδίου

Η κλίση του ηλεκτροδίου ως προς το επίπεδο της σύνδεσης των ελασμάτων επιτρέπει τη διαμόρφωση της κόλλησης, του βάθους διείσδυσης, του πλάτους του μετώπου και του ύψους της ενίσχυσης. Η κλίση του ηλεκτροδίου με αντίθετη διεύθυνση προς την διεύθυνση της συγκόλλησης προκαλεί πίεση στο ρευστό μέταλλο του λουτρού προς τα εμπρός, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το βάθος διείσδυσης και αυξάνοντας το ύψος και το πλάτος του μετώπου. Η κλίση του ηλεκτροδίου προς την διεύθυνση της συγκόλλησης προκαλεί τη πίεση του λουτρού προς τα πίσω, αυξάνοντας έτσι το βάθος της διείσδυσης και μειώνοντας ελαφρά το πλάτος και το ύψος του μετώπου. Γενικά για την επιλογή της κατάλληλης κλίσης του ηλεκτροδίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πίνακες προτεινόμενων τιμών κλίσης συναρτήσει της σύνδεσης και της τεχνικής συγκόλλησης.

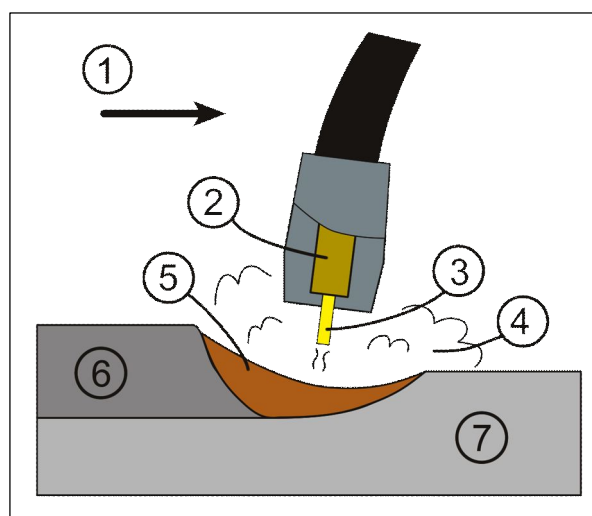
Για την επιλογή των τιμών των παραπάνω παραμέτρων κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης υπάρχει πληθώρα κανόνων, πινάκων και εμπειρικών τύπων που καθορίζουν τις τιμές των παραμέτρων συναρτήσει των συνθηκών και των στόχων της εκάστοτε συγκόλλησης. Τις οδηγίες αυτές μπορεί κανείς να αναζητήσει σε βιβλία, εγχειρίδια συγκολλήσεων και καταλόγους κατασκευαστών. Στο παρόν κεφάλαιο δεν θα γίνει καμία αναφορά στην εκλογή των παραπάνω συνθηκών. Ο τρόπος επιλογής των τιμών τους θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο του πειραματικού κομματιού της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.8 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων (Metal Inert Gas – MIG)

Η συγκόλληση τόξου στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων εμφανίστηκε για πρώτη φορά κατά το 1926 και στις μέρες μας, όπως και η προηγούμενη μέθοδος που παρουσιάστηκε, είναι από τις πιο ευρέως εφαρμοζόμενες στο πεδίο των συγκολλητών κατασκευών. Πέρα από το ακρωνύμιο *MIG* για την σύντομη αναφορά στην μέθοδο χρησιμοποιείται και το ακρωνύμιο *GMA* (*Gas Metal Arc welding*).

Η συγκόλληση *MIG* συνίσταται στην τήξη του συγκολλούμενου μετάλλου και του υλικού του τηκόμενου ηλεκτροδίου με θερμότητα που προέρχεται από το αναμμένο ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο και στο συγκολλούμενο α-

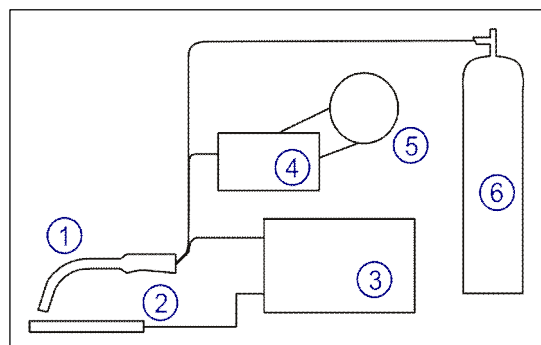
ντικείμενο, στην ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου (αδρανούς ή δραστικού). Πρόκειται λοιπόν, όπως και στην περίπτωση της χειρωνακτικής συγκόλλησης *MMA*, για μία αυτογενή συγκόλληση. Η βασική τεχνική για την συγκόλληση *MIG* είναι αρκετά απλή καθώς το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται αυτόματα μέσω του εργαλείου στην περιοχή της κόλλησης. Η μέθοδος *MIG* το μόνο που απαιτεί είναι η σωστή καθοδήγηση του εργαλείου κόλλησης με την κατάλληλη θέση και προσανατολισμό κατά μήκος της συγκολλώμενης περιοχής. Η κατάλληλη θέση σχετίζεται με την απόσταση που πρέπει να διατηρείται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο, η οποία πρέπει να είναι όχι μεγάλη τέτοια ώστε να διατηρείται το τόξο σωστά χωρίς να υπερθερμαίνεται. Ο κατάλληλος προσανατολισμός είναι επίσης σημαντικός και γενικά θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να διχοτομεί την γωνία που σχηματίζουν τα προς συγκόλληση τεμάχια. Ο προσανατολισμός σχετίζεται επίσης με την γωνία του εργαλείου ως προς την διεύθυνση κίνησής του η οποία και συστήνεται να διατηρείται περίπου στις 90 μοίρες.



Εικόνα 1.4: Η περιοχή της κόλλησης στην μέθοδο *MIG*: (1) Διεύθυνση κίνησης του εργαλείου (2) Σωλήνας επαφής - άκρο ρεύματος (3) Ηλεκτρόδιο (4) Προστατευτικό αέριο (5) Τήγμα μετάλλου κόλλησης (6) Στερεοποιημένο μέταλλο κόλλησης (7) Τεμάχιο

Εάν η τεχνική της μεθόδου εκτελεστεί σωστά, το αναμμένο τόξο, προστατευόμενο με ακρίβεια ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο (σύρμα) και στο συγκολλούμενο υλικό, εξασφαλίζει ότι η σχηματιζόμενη κόλληση γίνεται σε πολύ ωφέλιμες θερμικές και μεταλλουργικές συνθήκες. Άρα, η μέθοδος *MIG* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση υψηλής ποιότητας συνδέσεων όλων των μετάλλων που μπορούν να συνδεθούν με συγκόλληση τόξου. Σε αυτά ανήκουν οι ανθρακοχάλυβες, οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες που είναι ανθεκτικοί στην διάβρωση, οι ειδικοί χάλυβες, το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, ο χαλκός, νικέλιο και τα κράματά του, όπως επίσης το τιτάνιο και τα κράματά του.

Βασικός εξοπλισμός & παράμετροι συγκόλλησης



Εικόνα 1.5: Διάγραμμα του κυκλώματος της μεθόδου MIG (εξοπλισμός): (1)Εργαλείο συγκόλλησης - καμινέτο (2)Συγκολλούμενο τεμάχιο (3)Πηγή τροφοδοσίας (4)Μονάδα τροφοδοσίας ηλεκτροδίου (5)Καρούλι ηλεκτροδίου (6)Παροχή προστατευτικού αερίου

Για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση με μέθοδο MIG, ο βασικός απαιτούμενος εξοπλισμός αποτελείται από ένα εργαλείο συγκόλλησης (καμινέτο), μία μονάδα τροφοδοσίας, ένα ηλεκτρόδιο μαζί με την διάταξη τροφοδοσίας του και μία διάταξη παροχής του προστατευτικού αερίου.

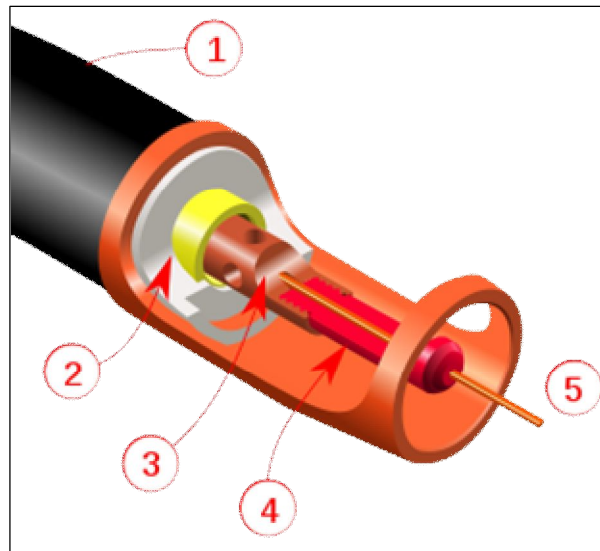
Εργαλείο συγκόλλησης (καμινέτο)

Το τυπικό εργαλείο συγκόλλησης για την μέθοδο MIG περιλαμβάνει τα εξής: έναν διακόπτη ελέγχου, ένα στοιχείο απόληξης (προστατευτικό χιτώνιο) για την επαφή ηλεκτροδίου – τεμαχίου («μύτη»), ένα καλώδιο τροφοδοσίας και ένα ακροφύσιο για την τροφοδοσία του προστατευτικού αερίου. Όταν ο χειριστής ενεργοποιεί τον διακόπτη ελέγχου ξεκινά η τροφοδοσία ρεύματος, ηλεκτροδίου και προστατευτικού αερίου και με την επαφή ηλεκτροδίου – τεμαχίου δημιουργείται το ηλεκτρικό τόξο. Το ηλεκτρόδιο είναι επενδεδυμένο με χαλκό και μέσω του καλωδίου τροφοδοσίας οδηγεί την ηλεκτρική ενέργεια μέσω του τόξου στην περιοχή της κόλλησης. Πριν φτάσει στην επαφή με το τεμάχιο το ηλεκτρόδιο προστατεύεται και οδηγείται από το προστατευτικό του χιτώνιο το οποίο συνδράμει στην αποφυγή της στρέβλωσης και στην απρόσκοπτη τροφοδοσία ηλεκτροδίου. Το ακροφύσιο χρησιμοποιείται ώστε το προστατευτικό αέριο να διοχετεύεται στην περιοχή της κόλλησης. Το αέριο οδηγείται στο ακροφύσιο μέσω ενός σωλήνα ο οποίος συνδέεται με την δεξαμενή του αερίου. Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται και σωλήνας νερού εντός του εργαλείου για την ψύξη του σε εφαρμογές πολύ υψηλών θερμοκρασιών.

Εικόνα 1.6: Εργαλείο κόλλησης μεθόδου MIG: (1) Λαβή εργαλείου (2) Διηλεκτρικό υλικό (λευκό) και περικόχλιο στερέωσης (κίτρινο) (3) Διάταξη παροχής προστατευτικού αερίου (ακροφύσια) (4) Χιτώνιο προστασίας ηλεκτροδίου (5) Άκρη επαφής

Ηλεκτρόδιο & μονάδα τροφοδοσίας ηλεκτροδίου

Η επιλογή ηλεκτροδίου βασίζεται κυρίως στην σύνθεση των μετάλλων που συγκολλώνται και δευτερευόντως στην παραλλαγή της μεθόδου κόλλησης που χρησιμοποιείται, στην σχεδίαση της σύνδεσης και στις συνθήκες της επιφάνειας των μετάλλων. Η επιλογή του ηλεκτροδίου επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της κόλλησης και είναι βασικός παράγοντας για την ποιότητα της κόλλησης. Γενικά το τελικό υλικό της κόλλησης θα πρέπει να έχει παραπλήσιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές του μετάλλου βάσης χωρίς να υπάρχουν διαφόρων ειδών ελαττώματα όπως ασυνέχειες, ακαθαρσίες ή πορώδες. Για την επίτευξη αυτών των στόχων προσφέρεται μεγάλη ποικιλία ηλεκτροδίων τα οποία περιέχουν μέταλλα όπως το πυρίτιο, το μαγγάνιο, το τι-



τάνιο και το αλουμίνιο σε μικρές ποσότητες για να εμποδίσουν την εμφάνιση πορώδους.

Αποφασιστικής σημασίας είναι και η διάμετρος του ηλεκτροδίου που θα χρησιμοποιηθεί για την πυκνότητα του ρεύματος και άρα για το βάθος διείσδυσης στο συγκολλούμενο υλικό και το χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο. Για δεδομένη τιμή έντασης, η απόδοση τήξης αυξάνεται με την μείωση της διαμέτρου του σύρματος επειδή αυξάνεται η πυκνότητα του ρέοντος ρεύματος διαμέσω του σύρματος. Συγχρόνως, με μικρή διάμετρο σύρματος, είναι μικρότερη η ένταση του κρίσιμου ρεύματος με αποτέλεσμα το λουτρό της κόλλησης να έχει μικρότερο όγκο και να στερεοποιείται γρηγορότερα. Σύρματα μικρών διαμέτρων (έως 1.2mm) προτείνονται για συγκόλληση λεπτών ελασμάτων και για συγκόλληση σε εξαναγκασμένες θέσεις. Μεγαλύτερες διαμέτρους (έως 4.0mm) χρησιμοποιούνται κατά την ημιαυτόματη και αυτόματη συγκόλληση.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με το ηλεκτρόδιο είναι το ελεύθερο μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου από το εργαλείο κόλλησης (δες εικόνα 1.6). Το μήκος αυτό επιδρά στην εντατικότητα προθέρμανσης του σύρματος με ηλεκτρική αντίσταση, στο μήκος ανάμεσα στο άκρο του ρεύματος και στο τηκόμενο άκρο του σύρματος, άρα καθοριστικό για την θερμοκρασία και την ταχύτητα τήξης. Έτσι, με την αύξηση του ελεύθερου μήκους προεξοχής, ακόμη και μέχρι 60 – 75mm,

με την ίδια ένταση ρεύματος, αυξάνεται σημαντικά η απόδοση τήξης του ηλεκτροδίου δίνοντάς μας την δυνατότητα να εναποθέτουμε ταχύτερα το υλικό στην περιοχή της κόλλησης.

Εικόνα 1.7: Μονάδα τροφοδοσίας ηλεκτροδίου για την μέθοδο MIG.

Η μονάδα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου (σύρματος) τροφοδοτεί το ηλεκτρόδιο στο εργαλείο, οδηγώντας το μέσω του προστατευτικού χιτωνίου στο ελεύθερο μήκος και την επαφή με το τεμάχιο. Τα περισσότερα μοντέλα παρέχουν το ηλεκτρόδιο με σταθερό ρυθμό τροφοδοσίας, αλλά περισσότερο εξελιγμένα μοντέλα μπορούν να δώσουν διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας ανάλογα με το μήκος του τόξου και την τάση συγκόλλησης. Μέσω της μονάδας τροφοδοσίας σύρματος ρυθμίζεται η ταχύτητα της συγκόλλησης η οποία είναι παράμετρος αποτελέσματος, για δεδομένη ένταση ρεύματος και τάση τόξου, με την διατήρηση ορθής μορφής κορδονιού της κόλλησης. Για σημαντική αλλαγή της ταχύτητας συγκόλλησης επιβάλλεται, συγχρό-



ως, και η αλλαγή της έντασης του ρεύματος και της τάσης του τόξου. Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης επιδρά στην στένωση της κόλλησης και στην μείωση του βάθους διείσδυσης, ενώ με περαιτέρω αύξηση της δημιουργούνται υποκοπές στο μέτωπο. Αντίθετα οι μικρές ταχύτητες συγκόλλησης προξενούν την αύξηση του βάθους διείσδυσης, του πλάτους του μετώπου και του ύψους της ενίσχυσης.

Προστατευτικό αέριο

Τα βασικά προστατευτικά αέρια που χρησιμοποιούνται για την συγκόλληση MIG είναι τα αδρανή αέρια αργό και ήλιο καθώς και τα δραστικά CO₂, H₂, O₂, N₂ και NO₂ χρησιμοποιούμενα ξεχωριστά ή μόνο ως προσθήκες στο αργό ή στο ήλιο. Το προστατευτικό αέριο είναι αποφασιστικό για την απόδοση της ατμόσφαιρας προστασίας του χώρου συγκόλλησης, τον τρόπο μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, την ταχύτητα συγκόλλησης και την σχηματιζόμενη μορφή της κόλλησης. Τα αδρανή αέρια αργό και ήλιο, παρά το γεγονός ότι προστατεύουν απόλυτα το ρευστό μέταλλο της κόλλησης από την εισχώρηση του ατμοσφαιρικού αέρα, δεν είναι κατάλληλα για όλες τις χρήσεις της συγκόλλησης MIG. Με την ανάμιξη τους σε κατάλληλες αναλογίες με κάποιο από τα δραστικά αέρια επιτυγχάνεται η μεταβολή του χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, διατηρείται η σταθερότητα του τόξου και προσφέρεται η δυνατότητα αλληλεπίδρασης στις μεταλλουργικές διαδικασίες, στο λουτρό συγκόλλησης. Συγχρόνως, παρέχεται η δυνατότητα μείωσης ή και ολοκληρωτικής εξάλειψης του φαινομένου του διασκορπισμού («πιτσιλίσμα»). Από τα δραστικά αέρια που προαναφέραμε μόνο το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται για την συγκόλληση χωρίς προσθήκες άλλων αερίων. Γενικά υπάρχει μεγάλη γκάμα συνδυασμών μεταξύ των

διαθέσιμων προστατευτικών αερίων (αδρανών και δραστικών) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία συγκόλληση MIG ανάλογα με τις συνθήκες που θέλουμε να επιτύχουμε. Οι συνδυασμοί αυτοί μπορούν να αναζητηθούν σε πίνακες της βιβλιογραφίας.

Μηχανή τροφοδοσίας ισχύος

Οι περισσότερες εφαρμογές της μεθόδου MIG χρησιμοποιούν πηγή τροφοδοσίας ισχύος συνεχούς τάσης (και άρα συνεχούς ρεύματος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οποιαδήποτε αλλαγή στο μήκος του τόξου (το οποίο συνδέεται απευθείας με την τάση) οδηγεί σε μεγάλη αλλαγή της παρεχόμενης θερμότητας και της έντασης του ρεύματος. Μικρότερο μήκος τόξου θα προκαλέσει την εισροή μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας και κατά συνέπεια την ταχύτερη τήξη του ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα να αποκατασταθεί το αρχικό μήκος του τόξου. Αυτό βοηθά τον χειριστή ακόμη και με χειροκίνητο χειρισμό του εργαλείου να διατηρεί περίπου σταθερό το μήκος του τόξου. Για να επιτευχθεί το αποτέλεσμα αυτό (σταθερότητα του τόξου) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μονάδα τροφοδοσίας σύρματος (ηλεκτροδίου) ρυθμιζόμενη βάσει της τάσης του τόξου. Στην περίπτωση αυτή οποιαδήποτε αλλαγή στο τόξο αντισταθμίζεται με ρύθμιση της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος. Πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος σπάνια χρησιμοποιείται για την μέθοδο MIG (ειδικά για βιομηχανικές εφαρμογές) λόγω δυσκολιών στην εξασφάλιση της σταθερότητας του τόξου και της μεταφοράς του μετάλλου χωρίς «πιτσίλισμα». Για το συνεχές ρεύμα, η θετική πολικότητα είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος χρησιμοποίησης του στην εφαρμογή της μεθόδου MIG. Η άνοδος τείνει να έχει μεγάλη συγκέντρωση θερμότητας γεγονός που καταλήγει σε ταχύτερη τήξη του ηλεκτροδίου και τελικά σε αυξημένη διείσδυση στα τεμάχια και σε αυξημένη ταχύτητα συγκόλλησης. Η αναστροφή της πολικότητας σε αρνητική διευκολύνει μόνο την συγκόλληση με χοντρές σταγόνες και την μη αξονική μεταφορά του μετάλλου στο τόξο, ανεξάρτητα από την ένταση του ρεύματος. Όμως ο διασκορπισμός του μετάλλου είναι σημαντικός, η διεισδυτικότητα σημαντικά μειωμένη και το τόξο δεν έχει σταθερό άναμμα αλλά διακοπτόμενο, με αποτέλεσμα η χρήση αρνητικής πολικότητας να χρησιμοποιείται πολύ σπάνια.

Η ένταση ρεύματος, με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους, μεταβάλλεται με την μεταβολή της ταχύτητας τροφοδοσίας του ρεύματος, η οποία πρέπει να είναι ίδια με την ταχύτητα τήξης του σύρματος. Με περαιτέρω αύξηση της έντασης του ρεύματος άνω της «κρίσιμης» (ενδεικνυόμενης) τιμής, για δεδομένη διάμετρο ηλεκτροδίου μικραίνει το μέγεθος των σταγόνων, αυξάνεται η συχνότητα διάβασής τους και διορθώνεται η σταθερότητα του τόξου. Η ημιαυτόματη συγκόλληση διενεργείται, συνήθως, με μεσαίες τιμές έντασης ρεύματος έτσι ώστε ο χειριστής να μπορεί, καταλλήλως, να μετακινεί γρήγορα τον καυστήρα (εργαλείο). Στις διαδικασίες μηχανοποίησης και αυτόματης συγκόλλησης MIG, γίνεται χρήση των μεγαλύτερων δυνατών πυκνοτήτων και εντάσεων ρεύματος.

Η τάση του τόξου εξαρτάται κυρίως από την προστατευτική ατμόσφαιρα. Η αύξηση της τάσης του τόξου επιδρά στην αύξηση του πλάτους του κορδονιού της κόλλησης και μειώνει το βάθος διείσδυσης. Η υπερβολική αύξηση της τάσης του τόξου δημιουργεί διασκορπισμό, πορώδες και υποκοπές στο μέτωπο της κόλλησης. Η αρκετά χαμηλή τάση του τόξου προξενεί το πορώδες της κόλλησης και εμφανίζει εκκροές στο μέτωπο. Η σωστή επιλογή της τάσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως του είδους και της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης, της διαμέτρου του ηλεκτροδίου, του είδους του συγκολλούμενου μετάλλου και της χημικής σύστασης του προστατευτικού αερίου. Κατά την συγκόλληση MIG σε επίπεδη θέση, χρησιμοποιεί-

ται γενικά υψηλή τάση τόξου σε σχέση με τις εξαναγκασμένες θέσεις συγκόλλησης. Οι χαμηλότερες τιμές τάσης του τόξου προτείνονται για την συγκόλληση λεπτών ελασμάτων και σε χαμηλές εντάσεις ρεύματος συγκόλλησης.

Κεφάλαιο 2^ο:

ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

2.1 Γενικά

Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως οι τάσεις που ενυπάρχουν σε ένα υλικό ή στερεό σώμα το οποίο είναι ακίνητο και βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του. Οι τάσεις αυτές ισορροπούν μεταξύ τους στο εσωτερικό κάποιας περιοχής του σώματος ή του υλικού, εμφανίζονται χωρίς εξωτερικές φορτίσεις και δεν είναι απαραίτητες για την διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ του σώματος στο εσωτερικό του οποίου εμφανίζονται και του περιβάλλοντός του. Όταν ασκηθούν δυνάμεις σε ένα υλικό, αυτό σαν αποτέλεσμα αποκτά τάσεις (stresses) και παραμορφώσεις (strains). Η τάση είναι η εσωτερική δύναμη αντίδρασης του αντικειμένου (ανά μονάδα επιφάνειας). Για μία ομοιόμορφη κατανομή εσωτερικών δυνάμεων αντίδρασης, η τάση μπορεί να υπολογιστεί ως η δύναμη (F) που ασκήθηκε στο υλικό ανά μονάδα επιφάνειας (A) που αυτή ασκήθηκε:

$$\text{τάση } \sigma(\text{stress}) = \frac{F}{A} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

Η ειδική παραμόρφωση, ερμηνεύεται σαν το μέγεθος της παραμόρφωσης ανά μονάδα μήκους του αντικειμένου όταν ασκηθεί σε αυτό κάποια φόρτιση. Η ειδική παραμόρφωση υπολογίζεται διαιρώντας τη συνολική παραμόρφωση του αρχικού μεγέθους με το αρχικό μέγεθος:

$$\text{ειδική παραμόρφωση} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\sigma}{E}$$

όπου:

ΔL : η διαμήκης παραμόρφωση του αντικειμένου,

L_0 : το αρχικό μήκος του αντικειμένου,

σ : η τάση παραμόρφωσης,

E : το μέτρο ελαστικότητας, ή μέτρο του Young, του υλικού του αντικειμένου.

Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να έχουν τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιδράσεις στο εξάρτημα – υλικό στο οποίο εμφανίζονται. Από την μία μπορούν να αποδειχθούν επιζήμιες όταν μειώνουν την αντοχή ενός υλικού σε ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο μειώνοντας την διάρκεια ζωής ενός εξαρτήματος. Από την άλλη μπορούν να αξιοποιηθούν για την σχεδίαση υλικών και εξαρτημάτων βελτιωμένων ιδιοτήτων και μεγαλύτερης αντοχής. Κατά τον σύγχρονο μηχανολογικό σχεδιασμό υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με το πώς οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει γιατί μία αστοχία, η οποία μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις είναι μη αναμενόμενη, μπορεί να προκληθεί από την συνδυασμένη δράση παραμενουσών (εσωτερικών) και εξωτερικά επιβαλλόμενων τάσεων. Στην πράξη είναι σχεδόν απίθανο οποιοδήποτε μηχανολογικό εξάρτημα να είναι πλήρως απαλλαγμένο από παραμένουσες τάσεις οι οποίες εισήχθησαν κατά την διαδικασία παραγωγής του. Μάλιστα, οι παραμένουσες τάσεις είναι πολύ πιο δύσκολο να προβλεφθούν σε σύγκριση με τις τάσεις που εισάγονται λόγω λειτουργίας, με τις οποίες όπως αναφέραμε ήδη, αλληλεπιδρούν. Είναι λοιπόν εύκολα αντιληπτή η μεγάλη σημασία των παραμενουσών τάσεων στις εφαρμογές της μηχανολογίας. Για τον λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικό να έχουμε στην διάθεσή μας αξιόπιστες μεθόδους μέτρη-

σης των παραμενουσών τάσεων και επιπλέον να μπορούμε για κάθε μέθοδο να αντιληφθούμε το επίπεδο και την ποιότητα των πληροφοριών που μας παρέχει.

2.2 Κατάταξη των παραμενουσών τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις, ανάλογα με τα κριτήρια διαχωρισμού τους ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία αφορά στην κατάταξη των παραμενουσών τάσεων ανάλογα με την αιτία που τις προκαλεί. Διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- Θερμικές (χρονικές) παραμένουσες τάσεις οι οποίες προξενούν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις.
- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις, δημιουργούμενες από το αποτέλεσμα των πλαστικών παραμορφώσεων σε σώμα που χαρακτηρίζεται ως ελαστο - πλαστικό.
- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις, οι οποίες δημιουργούνται κατά την ανομοιόμορφη θέρμανση και ψύξη του σώματος.
- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις, οι οποίες γεννώνται λόγω μετασχηματισμών φάσεων και δομικών στοιχείων

Η δεύτερη κατηγορία αφορά στην κατάταξη των παραμενουσών τάσεων ανάλογα με τις διαστάσεις του όγκου της μάζας του σώματος, στην οποία αυτές εξισορροπούνται. Για την κατάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το χαρακτηριστικό μήκος, το οποίο είναι το μήκος (θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως «κλίμακα») στο οποίο ισορροπούν οι ίδιες τάσεις. Διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- Παραμένουσες τάσεις τύπου I, οι οποίες εξισορροπούν σε μακροσκοπικές διαστάσεις (χαρακτηριστικό μήκος ίσο με την κλίμακα της κατασκευής). Οι ίδιες τάσεις της κατηγορίας αυτής μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας συνεχή μοντέλα, τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη την πολυκρυσταλλική ή πολυφασική φύση του υλικού και συνήθως από πεπερασμένα στοιχεία.
- Παραμένουσες τάσεις τύπου II, οι οποίες εξισορροπούν σε μικρο – μεγέθη (μικροσκοπικές διαστάσεις) του όγκου, δηλαδή στα όρια των γειτονικών κόκκων του υλικού (χαρακτηριστικό μήκος περίπου ίσο με τρεις έως δέκα φορές το μέγεθος ενός κόκκου). Πηγή των τάσεων αυτών είναι ο προσανατολισμός των κόκκων.
- Παραμένουσες τάσεις τύπου III, οι οποίες εξισορροπούν εντός των κρυσταλλικών πλεγμάτων (χαρακτηριστικό μήκος μικρότερο του μεγέθους του κόκκου – ατομικές διαστάσεις).

Η τρίτη κατηγορία αφορά στην κατάταξη των παραμενουσών τάσεων ανάλογα με την θέση – διάταξή τους στον χώρο. Διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες (σε αναλογία με τις υπόλοιπες τάσεις όπως αυτές κατατάσσονται σύμφωνα με το ίδιο κριτήριο στην Μηχανική):

- Μονοαξονικές παραμένουσες τάσεις, όταν αυτές αναπτύσσονται κατά μία διεύθυνση (αμελητέες στις υπόλοιπες δύο).
- Διαξονικές παραμένουσες τάσεις, όταν αυτές αναπτύσσονται σε δύο διευθύνσεις (αμελητέες κατά την τρίτη).

- Τριαξονικές παραμένουσες τάσεις, όταν αυτές αναπτύσσονται και στις τρεις διευθύνσεις.

2.3 Επιδράσεις – αποτελέσματα των παραμενουσών τάσεων

Παρόλο που δεν είναι ο στόχος μας να παραθέσουμε λεπτομερώς τα αποτελέσματα που επιφέρουν οι παραμένουσες τάσεις, είναι σημαντικό να παραθέσουμε κάποιους σημαντικούς λόγους για τους οποίους μελετούμε τις παραμένουσες τάσεις.

Η «επίδοση» των ψαθυρών υλικών σε στατική φόρτιση μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την έξυπνη χρήση των παραμενουσών τάσεων. Κοινά παραδείγματα είναι το θερμικά σκληρυνόμενο γυαλί και το προτεταμένο σκυρόδεμα. Στο γυαλί, με την ταχεία ψύξη του από μεγάλες θερμοκρασίες, γεννώνται θλιπτικές επιφανειακές τάσεις. Η επιφανειακή θλιπτική τάση σημαίνει πως εξισορροπούνται οι ήδη υπάρχουσες εφελκυστικές τάσεις του εσωτερικού και άρα να αυξάνεται η αντοχή του γυαλιού σε εφελκυστικά φορτία. Το σκυρόδεμα, το οποίο όπως και το γυαλί είναι ψαθυρό υλικό, έχει χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόβολος όταν έχει προενταθεί σε θλίψη. Στην περίπτωση αυτή σεβαστά εφελκυστικά φορτία μπορούν να γίνουν «ανεκτά» προτού η υπέρθεση των εφαρμοζόμενων και των παραμενουσών τάσεων οδηγήσουν τελικά σε αστοχία το σκυρόδεμα.

Για πλαστικώς παραμορφώσιμα υλικά, οι εφαρμοζόμενες και οι παραμένουσες τάσεις μπορούν μόνο να προστεθούν ταυτόχρονα έως ότου προσεγγιστεί το όριο διαρροής. Σε αυτή την περίπτωση, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να επιταχύνουν ή να καθυστερήσουν την εκδήλωση της πλαστικής παραμόρφωσης.

Επίσης, μία άλλη πολύ σημαντική ιδιότητα των παραμενουσών τάσεων που συχνά εκμεταλλευόμαστε είναι το γεγονός πως αλληλεπιδρούν με όλη την κατασκευή (ειδικότερα μάλιστα οι τάσεις συγκόλλησης, δεξ παρακάτω), γεγονός που δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την μη επέκταση τυχόν σχηματιζόμενων ρωγμών.

Γενικά οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την μέση τιμή της τάσης κατά έναν κύκλο φόρτισης. Επειδή ένα εφελκυστικό φορτίο αυξάνει την μέση εφαρμοζόμενη τάση είναι απαραίτητο (με κατάλληλη εφαρμογή αντίθετης παραμένουσας τάσης) να μειωθεί το εύρος της συνολικής τάσης έτσι ώστε να μείνει ανεπηρέαστος ο χρόνος ζωής του υλικού.

2.4 Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις

Σε σχέση με το σύνολο των πεδίων όπου συναντώνται οι παραμένουσες τάσεις, αυτό που θα μας απασχολήσει ιδιαίτερος είναι οι επιδράσεις των παραμενουσών τάσεων στις εφαρμογές των συγκολλήσεων. Κατά την διαδικασία της συγκόλλησης, λαμβάνει χώρα τοπική θέρμανση και κατόπιν ψύξη του μετάλλου. Καθώς η συγκόλληση ψύχεται, η συστολή που λαμβάνει χώρα στην ζώνη τήξης παρεμποδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης μεταβολής των διαστάσεων της θερμαινόμενης ζώνης (συστολή της ζώνης συγκόλλησης) εμφανίζεται σαν ελαστική παραμόρφωση (στα επίπεδα του ορίου διαρροής) η οποία οδηγεί τελικά στην εμφάνιση της παραμένουσας τάσης. Οι εμφανιζόμενες παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης εξισορροπούνται από αντιδρώσες τάσεις αντίθετου προσήμου στην περιοχή του βασικού μετάλλου. Ο περιορισμός της ελευθερίας των παραμορφώσεων προξενεί την εμφάνιση τάσεων, οι οποίες βρίσκονται από τον ακόλουθο τύπο:

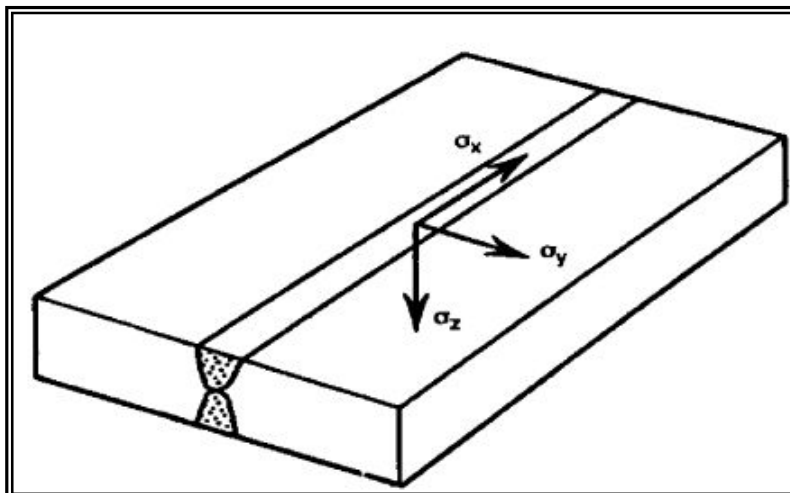
$$\sigma = E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t$$

όπου: E : μέτρο ελαστικότητας του υλικού,
 α_i : γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής,
 Δt : διαφορά θερμοκρασίας της θερμαινόμενης και της μη θερμαινόμενης ζώνης του μετάλλου.

Οι τιμές E και α_i μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό στην περιοχή της εμφανιζόμενης θερμοκρασίας, κατά την διαδικασία της συγκόλλησης. Οι μεταβολές αυτές δίνονται από νομογραφήματα συναρτήσει της θερμοκρασίας, τα οποία συναντώνται στην βιβλιογραφία. Επίσης, μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό και το όριο πλαστικότητας του μετάλλου.

Η μεγάλη διαφορά των θερμοκρασιών κατά την συγκόλληση είναι και η αιτία της δημιουργίας των πλαστικών παραμορφώσεων που οδηγούν στην εμφάνιση των παραμενουσών τάσεων. Οι πλαστικές αυτές παραμορφώσεις, από την άποψη των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς και του μικρού όγκου του θερμαινόμενου μετάλλου (ζώνη της κόλλησης) σε σχέση με τον συνολικό όγκο του συγκολλούμενου στοιχείου, εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους στην περιοχή της σύνδεσης.

2.4.1 Σύμβαση τάσεων στην συγκόλληση

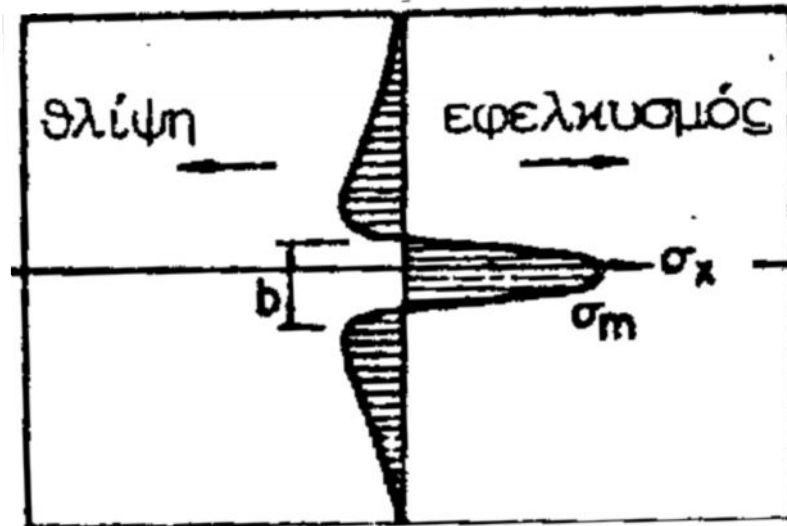


Εικόνα 2.1: Σύμβαση τάσεων στην συγκόλληση

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η σύμβαση των τάσεων που συνήθως χρησιμοποιείται σε μία συγκόλληση άκρων (μετωπική) επιπέδου ελάσματος για να περιγράψει τις διευθύνσεις των τάσεων ως προς την διεύθυνση της ραφής (Συμβατική φορά θετική): σ_x διαμήκης τάση (παράλληλη με την ραφή), σ_y εγκάρσια τάση (κάθετη στην ραφή) και σ_z τάση κατά το πάχος του ελάσματος.

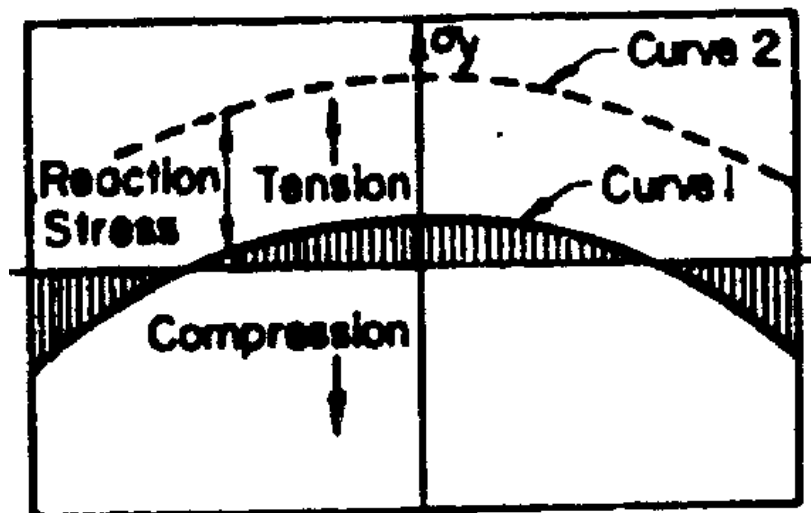
2.4.2 Θεωρητική κατανομή των τάσεων

Οι παραμένουσες τάσεις που αναπτύσσονται σε συγκολλητά τεμάχια είναι εγκάρσιες και διαμήκεις. Για τις τάσεις στην κατά το πάχος διεύθυνση και το πότε και πως αυτές μπορούν να αμεληθούν θα μιλήσουμε στην συνέχεια.



Εικόνα 2.2: Θεωρητική κατανομή διαμήκων παραμενουσών τάσεων

Η κατανομή των διαμήκων παραμενουσών τάσεων σ_x φαίνεται στην εικόνα 2.2. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εφελκυστική συστολή εμφανίζεται σε μία επιφάνεια δεκαπλάσια περίπου από την επιφάνεια της συγκόλλησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή γύρω από την ραφή υπόκειται σε τοπική πλαστική παραμόρφωση μετά την απομάκρυνση της πηγής θερμότητας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, εφελκυστικές τάσεις μεγάλου μεγέθους αναπτύσσονται στην περιοχή γύρω από την συγκόλληση, που σταδιακά μειώνονται, για να γίνουν θλιπτικές σε απόσταση από την γραμμή συγκόλλησης ίση προς μερικές φορές το πλάτος του μετάλλου κόλλησης (αντιστάθμιση τάσεων στην περιοχή του βασικού μετάλλου).



Εικόνα 2.3: Θεωρητική κατανομή εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων

Η κατανομή των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων σ_y φαίνονται στην εικόνα 2.3. Αυτές οι τάσεις, όπως και οι διαμήκεις, είναι αποτέλεσμα της ανομοιομορφης συστολής γύρω από την συγκόλληση, ο μηχανισμός όμως δημιουργίας αυτών διαφέρει σε σχέση με τον προηγούμενο. Η εγκάρσια κατανομή των παραμενουσών τάσεων είναι αποτέλεσμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο επίπεδο της συγκολλώμενης διατομής λόγω της διαμήκους συστολής. Σε κάποια περιοχή η διαμήκης συστολή προκαλεί την δημιουργία μίας βαρελοειδούς μορφής του αρχικά επίπεδου ελάσματος, με συνέπεια την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στις κεντρικές περιοχές και θλιπτικών τάσεων στα άκρα της ραφής. Αν όμως η πλευρική συστολή της ραφής εμποδιστεί από κάποια εξωτερική διάταξη, η κατανομή παίρνει την μορφή της καμπύλης 2 της εικόνας. Παρατηρείται δηλαδή υπέρθεση εφελκυστικών τάσεων με σχεδόν ομοιομορφη κατανομή σε όλο το μήκος της ραφής. Οι τάσεις αυτές είναι τάσεις αντίδρασης. Πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι οι τάσεις αντίδρασης δημιουργούνται και κατά την συγκόλληση με πολλαπλές στρώσεις (δες και παρακάτω).

Τα όσα παρουσιάστηκαν στα παραπάνω σχόλια και εικόνες πρέπει να επισημανθεί πως αναφέρονται σε τάσεις που γεννώνται στην επιφάνεια των συγκολληθέντων ελασμάτων. Γενικά στις συγκολλητές συνδέσεις οι παραμένουσες τάσεις δημιουργούν πάντοτε πολυαξονική κατάσταση τάσεων, αλλά για στοιχεία με πάχη τοιχωμάτων (πάχος μικρότερο των 26mm) η συνιστώσα κατά την διεύθυνση του πάχους του ελάσματος (τάση σ_z) δεν είναι πολύ μεγάλη και είναι δυνατόν να παραληφθεί στους υπολογισμούς. Τέτοιο παράδειγμα διαξονικής κατάστασης θερμικών τάσεων είναι και αυτό που θα μας απασχολήσει στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, η μετωπική συγκόλληση δυο ελασμάτων μικρού σχετικά πάχους.

2.4.3 Βασικοί παράγοντες που σχετίζονται με την ύπαρξη των παραμενουσών τάσεων

Το θέμα των παραμενουσών τάσεων που εμφανίζονται σε συγκολλητές δομές εξετάζεται γενικά υπό τις έννοιες του εύρους, της διεύθυνσης, της διάταξης στον χώρο, και της ποικιλομορφίας των τάσεων αυτών. Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τι είδους παραμένουσες τάσεις και εάν αυτές θα εμφανιστούν σε μία συγκολλητή κατασκευή είναι οι ακόλουθοι:

- **Προϋπαρξη τάσεων λόγω των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή των μερών που πρόκειται να συγκολληθούν.** Οι τάσεις αυτές θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στις περιοχές μακριά από την ραφή, όπου οι «συνολικές» παραμένουσες τάσεις μετά την συγκόλληση θα προκύψουν σαν υπέρθεση των τάσεων που εισήχθησαν στο υλικό λόγω της συγκόλλησης και των τάσεων που προϋπάρχουν στο τεμάχιο προερχόμενες από τις διαδικασίες κατασκευής του. Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης μπορεί να δώσει τάσεις είτε στην ελαστική, είτε στην ελαστο – πλαστική, είτε στην καθαρά πλαστική περιοχή ανάλογα με το εύρος των αθροιζόμενων τάσεων και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Οι παραμένουσες τάσεις που προϋπάρχουν της συγκόλλησης, όπως προαναφέραμε ήδη, μπορεί να οφείλονται σε θερμικές ή μηχανικές διεργασίες κατά την κατασκευή των διαφόρων τεμαχίων. Μερικές τυπικές διεργασίες που μπορούν να οδηγήσουν στην γέννηση παραμενουσών τάσεων της κατηγορίας αυτής είναι η χύτευση, η (δι)έλαση, διάφορες θερμικές κατεργασίες, η βαφή και η ενανθράκωση. Στην κατηγορία των διεργασιών που πιθανόν να γεννήσουν προϋπάρχουσες της συγκόλλησης παραμένουσες τάσεις, εντάσσονται και οι διεργασίες προετοιμασίας ενός τεμαχίου προς συγκόλλησης. Μερικές από αυτές είναι η προθέρμαν-

ση, η συγκράτηση, η κάμψη και η ευθυγράμμιση. Σε πολλές περιπτώσεις για να αποφευχθεί η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων κατά την εφαρμογή κάποιων από τις παραπάνω διεργασίες, ακολουθούνται, είτε κατά την διάρκεια είτε μετά, τεχνικές εξομάλυνσης των τάσεων οι οποίες μπορούν να μειώσουν το εύρος αυτών έως και στο ήμισυ του ορίου διαρροής του υλικού. Μία τέτοια διεργασία είναι η αναθέρμανση του υλικού ακολουθούμενη από αργό ρυθμό ψύξης.

Γενικά η πιθανότητα προϋπαρξης παραμενουσών τάσεων λόγω των διαδικασιών κατασκευής πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη όταν γίνεται εκτίμηση των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές. Κατά τις πειραματικές διαδικασίες στις οποίες στόχος είναι η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητά τεμάχια, συστήνεται η μέτρηση παραμενουσών τάσεων σε περιοχές που δεν έχουν επηρεαστεί από την κόλληση, ή σε τεμάχια πριν υποστούν την κόλληση, έτσι ώστε να υπάρχει μία καλή εκτίμηση του εύρους των προϋπάρχουσών παραμενουσών τάσεων.

- ***Οι ιδιότητες του υλικού της κόλλησης και του υλικού βάσης, συμπεριλαμβανομένων της σύνθεσης, της μικροδομής, των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων.*** Η πιο απλή υπόθεση που σχετίζεται με το εύρος της μέγιστης εφελκυστικής παραμένουσας τάσης σε μία συγκόλληση είναι πώς αυτό ισούται με το όριο διαρροής του υλικού βάσης ή του υλικού της κόλλησης. Είναι μία λογική υπόθεση η οποία ισχύει για τα περισσότερα μα όχι όλα τα υλικά. Γενικά οι εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις θα είναι περίπου ίσες με το όριο διαρροής του υλικού εάν ισχύουν οι ακόλουθες δύο προϋποθέσεις:

(α) εάν υπάρχει κάποιος περιορισμός της ελεύθερης συστολής του θερμαινόμενου υλικού (είναι θέμα που σχετίζεται με την γεωμετρία της κόλλησης και θα εξεταστεί στην συνέχεια) και

(β) εάν η παραμόρφωση θερμικής συστολής από την υψηλή θερμοκρασία σε αυτή του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής του υλικού. Αυτό συμβαίνει όταν ισχύει η σχέση:

$$a \cdot (T_s - T_o) \geq \frac{\sigma_Y}{E}$$

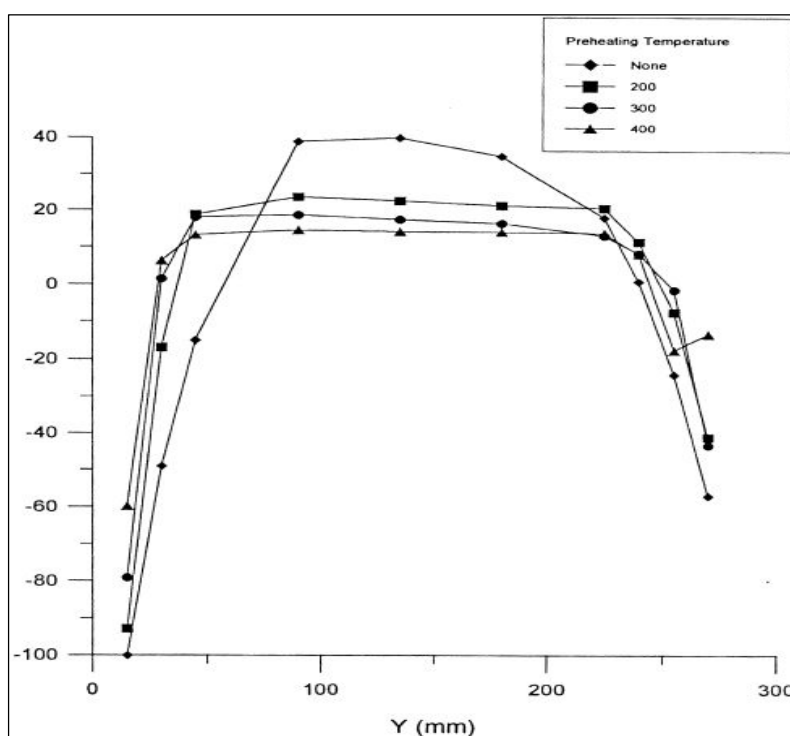
όπου: a είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής, T_s η υψηλή θερμοκρασία η οποία εδώ ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία το όριο διαρροής πέφτει στο 10% της τιμής του στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_o η θερμοκρασία περιβάλλοντος, E το μέτρο ελαστικότητας και σ_Y το όριο διαρροής του υλικού στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κλασική περίπτωση όπου ικανοποιείται η δεύτερη προϋπόθεση και άρα προκύπτουν παραμένουσες τάσεις της τάξης του ορίου διαρροής, είναι όλοι οι ωστενιτικοί χάλυβες.

Το πρόβλημα των παραμενουσών τάσεων επιδεινώνεται από την ιδιότητα του μετασχηματισμού φάσεων ο οποίος είναι αξιοσημείωτος σε πολλά υλικά. Ο μετασχηματισμός φάσεων εισάγει πρόσθετες παραμορφώσεις (και άρα τάσεις) συμβάλλοντας στις μεταβολές όγκου που λαμβάνουν χώρα στο υλικό ιδιαίτερα όταν λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες κατά την ψύξη μετά την συγκόλληση. Το πρόβλημα των ιδίων τάσεων από το μετασχηματισμό των φάσεων δεν είναι ουσιώδες κατά την συγκόλληση μαλακών ανθρακοχαλύβων επειδή οι μετασχηματισμοί λαμβάνουν χώρα στην περιοχή θερμοκρασιών, στην οποία το όριο ελαστικότητας είναι χαμηλό και οι μεταβολές στον όγκο εύκολα ισορροπούνται από τις πλαστικές παραμορφώσεις. Αντίθετα στην περίπτωση των κραματωμένων χάλυβων οι μετασχηματισμοί των φάσεων γίνονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και άρα εδώ η ε-

πίδραση του φαινομένου στην κατάσταση των παραμενουσών τάσεων είναι μεγάλη.

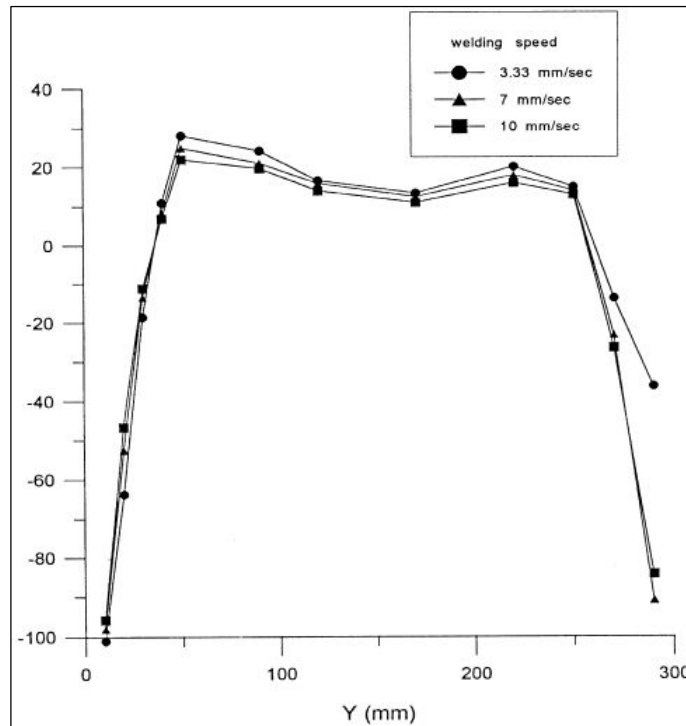
- **Η ίδια η διαδικασία συγκόλλησης που θα επιλεγθεί** στην οποία συμπεριλαμβάνονται η προετοιμασία των προς συγκόλληση στοιχείων (που όπως είδαμε παραπάνω μπορεί να εισάγει παραμένουσες τάσεις προϋπάρχουσες της κόλλησης ή και να τις μειώσει), οι συνθήκες υπό τις οποίες εκτελείται η συγκόλληση καθώς και η σειρά με την οποία εναποτίθενται τα πάσσα σε ραφές που απαιτούν την εναπόθεση περισσότερων του ενός πάσων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διαδικασία της προθέρμανσης που ακολουθείται πολλές φορές κατά την προετοιμασία των προς συγκόλληση στοιχείων. Πειράματα που έγιναν σε δείγματα συγκόλλησης επιπέδου ελάσματος μικρού πάχους έδειξαν πως η προθέρμανση των τεμαχίων μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη των παραμενουσών τάσεων.



Εικόνα 2.3: Προθέρμανση των προς συγκόλληση τεμαχίων στους 200, 300 και 400 °C. Είναι ορατή η μείωση των παραμενουσών τάσεων (εδώ απεικονίζονται οι εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις).

Μία άλλη σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με τις συνθήκες υπό τις οποίες εκτελείται η συγκόλληση και μπορεί να διαφοροποιήσει το αποτέλεσμα ως προς τις παραμένουσες τάσεις, είναι η ταχύτητα κίνησης του ηλεκτροδίου. Πειράματα που έχουν γίνει διαφοροποιώντας την ταχύτητα με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους της κόλλησης, έχουν δείξει πως μία υψηλή ταχύτητα όχι μόνο μειώνει τον όγκο του υλικού βάσης που επηρεάζεται από την θερμότητα που διοχετεύεται από την πηγή αλλά μειώνει ελαφρά και τις παραμένουσες τάσεις όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα.



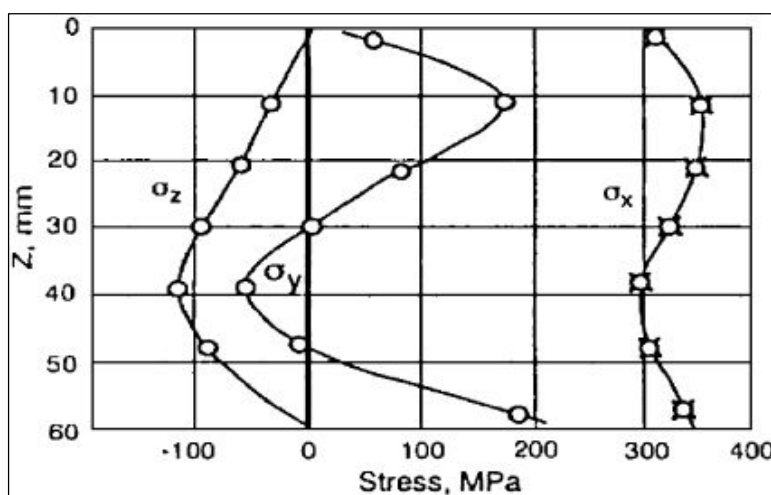
Εικόνα 2.4: Η επίδραση της ταχύτητας κίνησης του ηλεκτροδίου στις εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις

Η χρήση μεθόδων συγκόλλησης με αυξημένη την ταχύτητα κίνησης του ηλεκτροδίου δημιουργεί λεπτότερες ισοθερμικές καμπύλες στο υλικό. Το μικρότερο εύρος των καμπύλων αυτών επηρεάζει την εγκάρσια συρρίκνωση στην συγκόλληση επιπέδου ελάσματος, μη ευνοώντας την, εξηγώντας έτσι γιατί μεγαλύτερες ταχύτητες του ηλεκτροδίου οδηγούν γενικά σε μικρότερες παραμένουσες τάσεις.

- **Η γεωμετρία (διαστάσεις) των συγκολλούμενων στοιχείων και επιπλέον οι περιορισμοί που επιβάλλονται στα τεμάχια** όπως η χρήση μέγγενης, διατάξεων προσανατολισμού ή προσωρινών ραφών (π.χ. πονταρίσματα) με σκοπό την διευκόλυνση του χειριστή στην υλοποίηση της συγκόλλησης. Οι περιορισμοί σε μία συγκολλητή σύνδεση μπορούν γενικά να περιγραφούν ως οι αντιστάσεις που προβάλλονται στα τεμάχια ενάντια στην ελεύθερη διαστολή τους λόγω της θερμότητας που διοχετεύεται σε αυτά. Η έννοια του περιορισμού μοιάζει αρκετά απλή αλλά στην πραγματικότητα παρουσιάζει κάποια πολυπλοκότητα καθώς διαφοροποιείται ως προς την διεύθυνση και την θέση σε μία συγκόλληση ενώ μπορεί να μεταβάλλεται ακόμη και κατά την κόλληση του ίδιου τεμαχίου. Οι περιορισμοί που θα επιβληθούν στα προς συγκόλληση μέρη επηρεάζονται από ένα ευρύ φάσμα παραγόντων στους οποίους συμπεριλαμβάνονται η γεωμετρία των προς συγκόλληση στοιχείων (και πιο συγκεκριμένα η εγκάρσια διατομή της κατασκευής η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερες και οι τάσεις που τελικά θα προκύψουν), τα βοηθητικά εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν (π.χ. μέγγενη, δέστρες κ.α.) και την σειρά εναπόθεσης των κολλήσεων που απαιτούνται. Οι εξωτερικά επιβαλλόμενοι περιορισμοί συνεισφέρουν στην δημιουργία των παραμενουσών τάσεων μέσω των *τάσεων συγκόλλησης*. Ο όρος αυτός συναντάται στην βιβλιογραφία για να ονομαστούν οι τάσεις που προέρχονται από τις δυνάμεις αντίδρασης οι οποίες προξενούνται από την στερέωση του συγκολλούμενου αντικειμένου, και για να διαφοροποιηθούν από τις *ίδιες (ή εσωτερικές) τάσεις* οι οποίες

συνεισφέρουν στην δημιουργία των παραμενουσών τάσεων προερχόμενες από άλλες αιτίες (ανομοιόμορφη θέρμανση και ψύξη, μετασχηματισμός φάσεων) που αναφέραμε παραπάνω.

Εξετάζοντας αναλυτικότερα τις τάσεις που γεννούν οι εξωτερικά επιβαλλόμενοι περιορισμοί με την βοήθεια πειραμάτων που έχουν γίνει μπορούμε αρχικά να πούμε πως οι παραμένουσες τάσεις που προκύπτουν κατά τις τρεις διευθύνσεις (δες Σύμβαση τάσεων παραπάνω) είναι τελείως διαφορετικές. Αυτό συμβαίνει διότι οι επιβαλλόμενοι περιορισμοί δρουν διαφορετικά στις τρεις διευθύνσεις. Οι διαμήκης συρρίκνωση της κόλλησης εμποδίζεται σημαντικά από τα στοιχεία που συγκολλώνται, έτσι γεννώνται υψηλές εφελκυστικές τάσεις κατά το πάχος της κόλλησης. Η εγκάρσια συρρίκνωση του κάθε πάσσου που εναποτίθεται στην ραφή εμποδίζεται από τα πάσσα που περάστηκαν αμέσως πριν, έτσι γεννώνται εφελκυστικές τάσεις κοντά στην επάνω επιφάνεια της κόλλησης, οι οποίες αλληλεπιδρούν με θλιπτικές τάσεις στο μέσο του πάχους και εφελκυστικές στο κατώτερο σημείο της ραφής δημιουργώντας τελικά εφελκυστική μέση τάση κατά το πάχος του ελάσματος. Οι κατά το πάχος παραμένουσες τάσεις είναι πλήρως θλιπτικές. Κάθε πάσσο είναι ελεύθερο να συρρικνωθεί κατά τη διεύθυνση αυτή όταν εναποτίθεται έτσι αρχικά δεν δημιουργούνται τάσεις κατά το πάχος. Όμως στην συνέχεια, με την συμπίεση της κεντρικής περιοχής κατά την εγκάρσια διεύθυνση λόγω της συρρίκνωσης των επιφανειακών στρωμάτων της κόλλησης γεννώνται τελικά θλιπτικές τάσεις στην κατά το πάχος διεύθυνση.



Εικόνα 2.5: Παραμένουσες τάσεις κατά τις τρεις διευθύνσεις οι οποίες δημιουργήθηκαν κατά την συγκόλληση επιπέδου ελάσματος σημαντικού πάχους (60mm). Οι τάσεις αυτές έχουν μετρηθεί στην κεντρική γραμμή της ραφής συγκόλλησης (center line) και απεικονίζεται η κατά το πάχος κατανομή τους στην κεντρική γραμμή. Όπως φαίνεται έχουμε πλήρως εφελκυστικές τάσεις κατά την διαμήκη διεύθυνση, πλήρως θλιπτικές κατά το πάχος και μικτές στη εγκάρσια διεύθυνση με την μέση τάση όμως να είναι εφελκυστική.

- **Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν μετά το πέρας της συγκόλλησης ή οι θερμικές και μηχανικές φορτίσεις που δέχθηκε η συγκολλητή κατασκευή μετά την τοποθέτηση της στην θέση εργασίας** οι οποίες πιθανόν να οδήγησαν στην γένεση νέων εσωτερικών τάσεων ή στην εκτόνωση (εξομάλυνση) των ήδη υπαρχόντων (ή μέρους αυτών). Αυτή η κατηγορία των τάσεων (μετά το πέρας της συγκόλλησης) δεν θα μας απασχολήσει καθόλου.

Κεφάλαιο 3^ο:

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

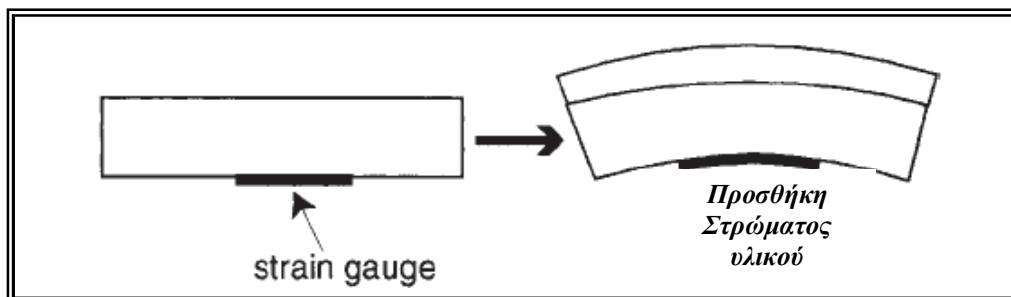
3.1 Γενικά

Οι παραμένουσες τάσεις είναι πολύ δύσκολο στο να προβλεφθούν σε σχέση με τις τάσεις λόγω λειτουργίας, με τις οποίες μάλιστα υπερτίθενται. Για τον λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικό να έχουμε στην διάθεσή μας αξιόπιστες μεθόδους για την μέτρηση των τάσεων αυτών και να μπορούμε να αντιληφθούμε τη σημασία των πληροφοριών που αυτές μας παρέχουν. Οι μέθοδοι μέτρησης των παραμενουσών τάσεων αρχικά διαχωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι: **(Α) Οι μηχανικές μέθοδοι μέτρησης των τάσεων**. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στον έλεγχο (επόπτευση) των αλλαγών στην παραμόρφωση των υπό έλεγχο εξαρτημάτων, είτε κατά την γένεση των παραμενουσών τάσεων, είτε κατόπιν αυτής με την σκόπιμη αφαίρεση τμήματος υλικού επιτρέποντας στις τάσεις να εκτονωθούν. **(Β) Οι μέθοδοι μέτρησης με διάθλαση**. Στις μεθόδους αυτές χρησιμοποιείται η πρόσπτωση ακτίνας γνωστού μήκους κύματος στο υπό εξέταση υλικό η οποία μέσω της γωνίας διάθλασης και της αλληλεπίδρασης με τυχόν αλλαγές στο εσωτερικό του υλικού μπορεί να «εντοπίσει» ελαστική παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή με χρήση κατάλληλης τιμής σκληρότητας μπορεί να μετατραπεί σε τάση. **(Γ) Άλλες μέθοδοι**. Στις μεθόδους αυτές περιλαμβάνονται μαγνητικές και ηλεκτρικές τεχνικές, υπερηχητικές μέθοδοι κ.ά. Στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα γίνει μία συνοπτική αναφορά (επισκόπηση) στις μεθόδους που εντάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες και τελικά θα επικεντρωθούμε στην παρουσίαση της μεθόδου που θα χρησιμοποιήσουμε στο πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας.

3.2 Μηχανικές μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων

3.2.1 Μέτρηση μέσω καμπυλότητας (curvature)

Η μέτρηση μέσω καμπυλότητας χρησιμοποιείται συχνά στον καθορισμό των τάσεων εντός επικαλύψεων και στρώσεων (λεπτών στρωμάτων). Η απόθεση ενός στρώματος μπορεί να εισάγει τάσεις οι οποίες προκαλούν καμπύλωση στο υπόστρωμα, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 3.1: Μέτρηση παραμενουσών τάσεων μέσω καμπυλότητας

Οι προκαλούμενες αλλαγές στην καμπύλωση κατά την εναπόθεση του στρώματος μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στις τάσεις σαν συνάρτηση του πάχους του στρώματος. Η καμπύλωση μπορεί να υπολογιστεί είτε με μεθόδους επαφής (π.χ. επιμηκυνσιόμετρα) είτε χωρίς απευθείας επαφή (π.χ.

βιντεοσκόπηση, laser scanning). Η μέτρηση περιορίζεται συνήθως σε λεπτές λωρίδες για την αποφυγή πολυαξονικής καμπύλωσης και αστάθειας.

3.2.2 Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπής (hole drilling)

Πρόκειται για την μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε εμείς στο πειραματικό κομμάτι και θα αναφερθούμε σε αυτή αναλυτικότερα στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Εισαγωγικά, μπορούμε να πούμε πως με την διάτρηση οπής στην περιοχή όπου προηγουμένως (π.χ. με χρήση επιμηκυσσιόμετρου) έχει μετρηθεί παραμόρφωση, οι τάσεις «ανακουφίζονται» παρέχοντας μας δεδομένα για τον «προς τα πίσω» υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων.

3.2.3 Μέτρηση μέσω ενδοτικότητας (compliance method)

Η μέθοδος ενδοτικότητας ρωγμών περιλαμβάνει την διάνοιξη μίας μικρής εγκοπής για την επόπτευση της εκτόνωσης των τάσεων στην περιοχή πλησίον της εγκοπής με χρήση συμβολομετρίας επιμηκυσσιόμετρου. Με την ρύθμιση (αυξομείωση) του βάθους της εγκοπής είναι δυνατή η ανάλυση του τασικού πεδίου σαν συνάρτηση του βάθους για σχετικά απλές κατανομές τάσεων.

3.3 Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων με διάθλαση

Στην γενική περίπτωση η συνθήκη διάθλασης, η οποία αποτελεί και την αρχή λειτουργίας των μεθόδων μέτρησης παραμενουσών τάσεων με διάθλαση, εκφράζεται από τον νόμο του Bragg:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

όπου,

λ : το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης ακτινοβολίας,

θ : η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας (ή ανακλώμενης) δέσμης και της επιφάνειας των επιπέδων ανάκλασης,

d : η απόσταση μεταξύ των επιπέδων ανάκλασης, και

n : η τάξη ανάκλασης ($n=1, 2, 3 \dots$).

3.3.1 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ηλεκτρονίων (electron beam diffraction)

Η δέσμη ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται για την εξέταση πολύ λεπτών αντικειμένων (πάχος κάτω από 100nm) και μπορεί να επιτύχει πολύ υψηλή εγκάρσια χωρική ανάλυση (έως και τα όρια των κόκκων). Επειδή η μέθοδος εξετάζει πολύ λεπτά αντικείμενα, τα αποτελέσματα που δίνει είναι ευάλωτα σε φαινόμενα επιφανειακής ανακούφισης τάσεων. Παρόλα αυτά η μέθοδος παρέχει έναν τρόπο μέτρησης επιφανειακών τάσεων τόσο τύπου I όσο και τύπου II καθώς και «μάκρο»-εσωτερικές τάσεις σε πολύ μικρά εξαρτήματα ηλεκτρονικών συσκευών.

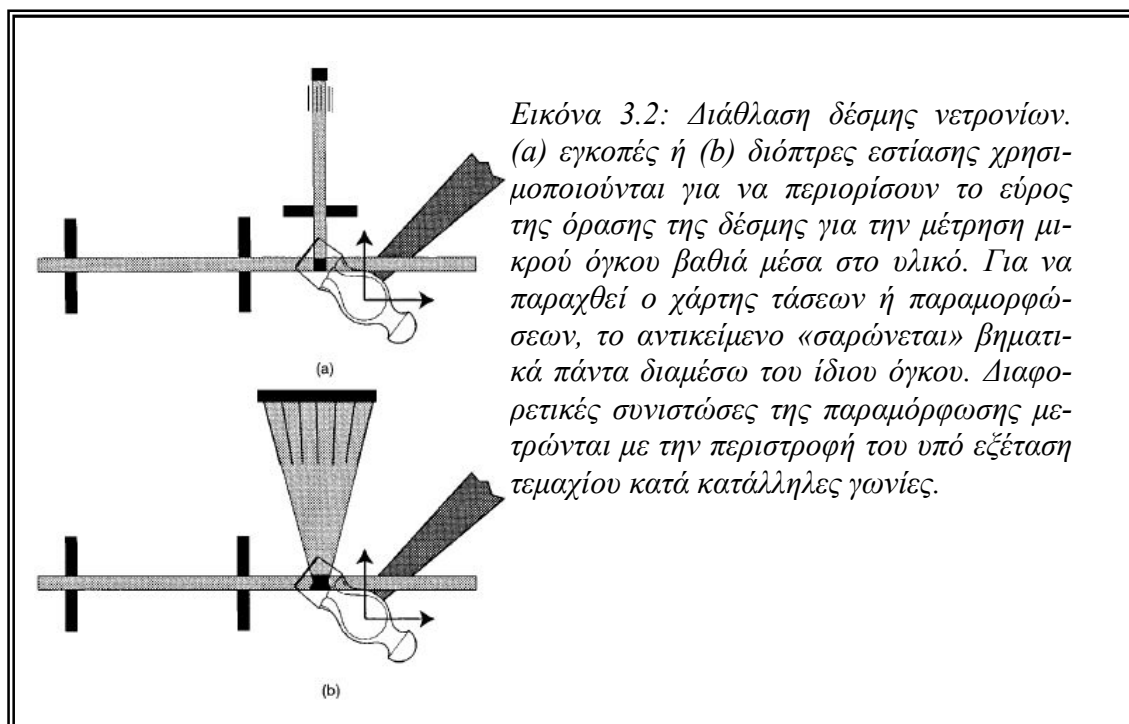
3.3.2 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ακτίνων X (laboratory X – ray diffraction)

Οι εργαστηριακές ακτίνες X (μήκη κύματος μεταξύ 0.1 και 0.2 nm) εξετάζουν συνήθως πολύ λεπτά στρώματα επικάλυψης (τυπικά κάποια δέκατα του μικρομέτρου). Παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα σε τεχνικές οι οποίες θεωρούν πως η περιοχή μέτρησης υπόκειται σε διαξονική καταπόνηση λόγω εσωτερικών τάσεων ($\sigma_{3i}=0$ για κάθε i). Η τεχνική μέτρησης παραμενουσών τάσεων με ακτίνες X (ειδικότερα των

τάσεων που προκαλούν παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής των υλικών, δηλαδή μεταβολή των ενδοατομικών τους αποστάσεων) είναι δυνατή λόγω του γεγονότος ότι το μήκος κύματος των ακτίνων X είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενδοατομική απόσταση εντός των μεταλλικών κρυστάλλων. Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων X καθιστά δυνατή την διείσδυσή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά ένα ποσοστό και την ανάκλασή τους πάνω στα πλεγματικά επίπεδα.

3.3.3 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης νετρονίων (neutron beam diffraction)

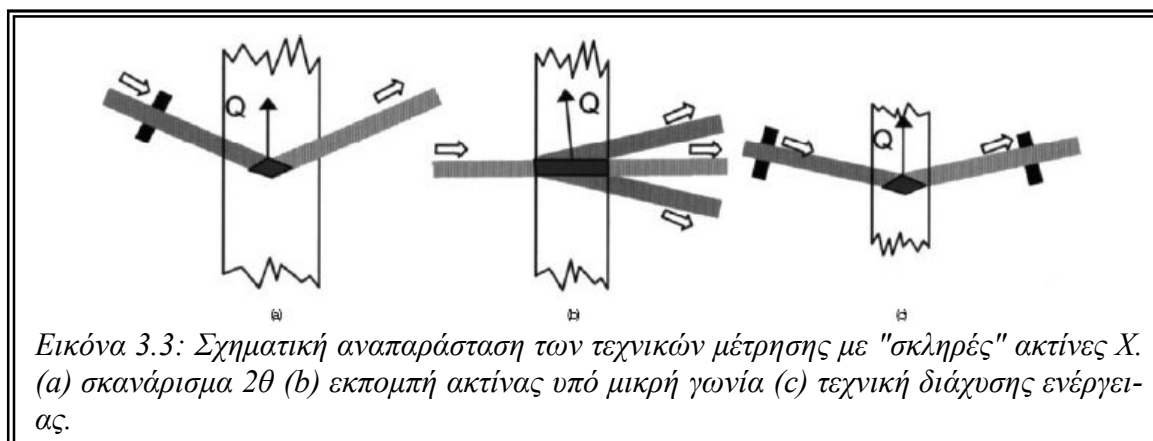
Όπως και οι άλλες τεχνικές διάθλασης, η διάθλαση ακτίνας νετρονίων βασίζεται στις ελαστικές παραμορφώσεις σε ένα πολυκρυσταλλικό υλικό. Οι μετρήσεις γίνονται με παρόμοιο τρόπο όπως στη διάθλαση των ακτίνων X, με έναν ανιχνευτή κίνησης γύρω από το δείγμα που βρίσκει τις θέσεις των διαθλωμένων ακτίνων μεγάλης έντασης. Η δέσμη νετρονίων μας παρέχει το πλεονέκτημα πως, για μήκη κύματος συγκρίσιμα με τον ατομικό χώρο, η διείσδυσή της μέσα στα υλικά τυπικά φτάνει έως αρκετά εκατοστά. Έτσι, περιορίζοντας την περιοχή που ακτινοβολείται και το πεδίο δράσης της δέσμης με την βοήθεια ειδικών σχισμών ή συσκευών εστίασης, είναι δυνατόν να πάρουμε διαθλασμένη ένταση (προερχόμενη από την ακτίνα) η οποία να προέρχεται από έναν πολύ μικρό όγκο (κάτω από 1 mm^3) που βρίσκεται βαθιά μέσα στο υπό εξέταση δείγμα. Παρόλα αυτά, σε σύγκριση με άλλες τεχνικές, όπως την διάθλαση των ακτίνων X, το κόστος είναι πολύ υψηλότερο και η διαθεσιμότητα είναι πολύ μικρότερη. Προς το παρόν η κύρια χρήση της μεθόδου εντοπίζεται κυρίως σε κεντρικά ερευνητικά κέντρα.



3.3.4 Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης «σκληρών» ακτίνων X (hard X – ray diffraction)

Οι «σκληρές» ακτίνες X γίνονται σταδιακά διαθέσιμες σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές. Οι πηγές των «σκληρών» ακτίνων X μπορεί να είναι έως και ένα εκατομ-

μύριο φορές πιο έντονες από τις συμβατικές πηγές και παρέχουν φωτόνια υψηλής ενέργειας που είναι αρκετές χιλιάδες φορές πιο διεισδυτικά σε σχέση με τις συμβατικές ακτίνες X. Αυτή η αύξηση της διεισδυτικής ικανότητας σημαίνει ότι η διάθλαση των «σκληρών» ακτίνων X είναι ικανή να παρέχει πολύ μεγάλη ανάλυση και τρισδιάστατο χάρτη της κατανομής των παραμορφώσεων σε βάθη κάποιων χιλιοστών σε μηχανολογικά δοκίμια. Γενικά έχει διεξαχθεί λίγη έρευνα σχετικά με αυτά έως σήμερα, αλλά έχουν επιτευχθεί τόσο ταχύς χρόνος παραλαβής των δεδομένων (μικρότερος του 1sec) όσο και δυνατότητα μικρών μετρητικών διαστάσεων (έως και 20μm) σε ικανοποιητικά βάθη διείσδυσης (π.χ. 50mm σε αλουμίνιο).



3.4 Άλλες μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων

3.4.1 Μαγνητικές και ηλεκτρικές τεχνικές

Οι μαγνητικές ιδιότητες έχουν χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση παραμενουσών τάσεων και τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι είναι μη καταστροφικές, φθηνές και πολύ απλές μέθοδοι. Ο χάλυβας που έχει σιδηρομαγνητικές ιδιότητες, όπως και άλλα σιδηρομαγνητικά υλικά, είναι ευαίσθητος στις εσωτερικές τάσεις λόγω της παρεμπόδισης του μαγνητισμού και του συνεπαγόμενου μαγνητοελαστικού φαινομένου. Με την ελάχιστη ενέργεια, ο μαγνητισμός θα ευθυγραμμιστεί με τις κρυσταλλικές διευθύνσεις (μαγνητικοί άξονες). Μία αλλαγή στο μέτρο των τάσεων θα έχει ως συνέπεια την αλλαγή του αριθμού των πεδίων που ευθυγραμμίζονται με κάθε άξονα και συνεπώς τη μείωση της μαγνητο – ελαστικής ενέργειας. Αυτή η μαγνητική ανισοτροπία που εισήχθη λόγω των τάσεων, οδηγεί στην εκτροπή ενός τεχνητού μαγνητικού πεδίου από την δεδομένη του διεύθυνση. Ένας σπειροειδής αισθητήρας (πηνίο) μπορεί να αντιληφθεί αυτές τις μεταβολές τόσο στην διεύθυνση των τάσεων όσο και στο μέγεθός τους.

Ένας άλλος τρόπος «εντοπισμού» τάσεων είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή. Πρόκειται για την εκπομπή ελαστικών κυμάτων προερχόμενων από αλλαγές στις παραμορφώσεις λόγω μαγνητοσυστολής από την αλλαγή της θέσης και του προσανατολισμού των διαφόρων «περιοχών» του υλικού.

Δυστυχώς, οι μαγνητικές μέθοδοι είναι ευαίσθητες σε αρκετούς παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την χρήση των μεθόδων σε πειραματικές διαδικασίες. Παρόλα αυτά, για υλικά τα οποία είναι μαγνητοσυστελόμενα, οι μαγνητικές μέθοδοι παρέχουν φθηνές μεθόδους για μη καταστροφική μέτρηση των παραμενουσών τάσεων.

3.4.2 Υπερηχητικές τεχνικές (ultrasonics)

Αλλαγές στην υπερηχητική ταχύτητα μπορούν να παρατηρηθούν όταν ένα υλικό υποβάλλεται σε μία τάση. Οι αλλαγές αυτές παρέχουν ένα μέσο μέτρησης κατά μήκος του κύματος. Οι ακουστοελαστικές μεταβλητές που απαιτούνται για την ανάλυση συνήθως υπολογίζονται μέσω τεστ βαθμονόμησης. Διαφορετικά είδη κυμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μα η πιο κοινή μέθοδος είναι η μέθοδος διαμήκους διαθλώμενου κύματος. Η μεγαλύτερη ευαισθησία επιτυγχάνεται όταν το κύμα διαδίδεται στην ίδια κατεύθυνση με αυτή της τάσης. Η τάση υπολογίζεται από κατάλληλους τύπους συναρτήσεων των χαρακτηριστικών του κύματος.

Η μέθοδος παρέχει την δυνατότητα μέτρησης των «μάκρο»-παραμενουσών τάσεων σε μεγάλα τμήματα όγκου ενός υλικού. Οι ταχύτητες των υπερηχητικών κυμάτων εξαρτώνται από ανομοιογένειες στην μικροδομή των υλικών και συναντώνται δυσκολίες στο διαχωρισμό των επιπτώσεων λόγω πολυαξονικών εντατικών καταστάσεων. Παρόλα αυτά όντας φορητή και φθηνή, η μέθοδος είναι κατάλληλη για επιθεωρήσεις ρουτίνας και μελέτες βιομηχανικής κλίμακας μεγάλων εξαρτημάτων.

3.4.3 Θερμοελαστικές μέθοδοι

Η ελαστική παραμόρφωση ενός υλικού προκαλεί μικρές αλλαγές στην θερμοκρασία (1 mK για 1 MPa στους χάλυβες). Είναι δυνατό, χρησιμοποιώντας κατάλληλη κάμερα υπερύθρων, να χαρτογραφηθούν οι αλλαγές θερμοκρασίας δίνοντας μία ενδεικτική εικόνα των διαφοροποιήσεων της τάσης. Η αλλαγή της θερμοκρασίας στην οποία βασίζεται η μέθοδος είναι αρκετά μικρή συγκρινόμενη με την ευαισθησία των καμερών υπερύθρων που έχουμε στην διάθεσή μας και για αυτό η μέθοδος έχει περιορισμένη χρήση επί του παρόντος.

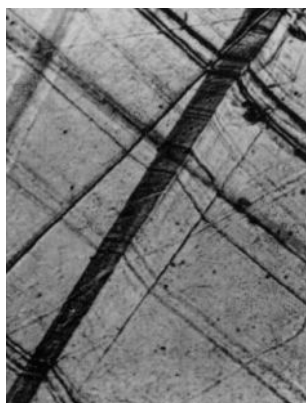
3.4.4 Φωτοελαστικές μέθοδοι

Η ταχύτητα του φωτός καθώς αυτό διέρχεται από διαφανή υλικά έχει την τάση να διαφοροποιείται ανισότροπα όταν το υλικό υπόκειται σε τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοελαστικό και αποτελεί την βάση μιας άλλης μεθόδου για την μέτρηση παραμενουσών τάσεων. Οι τάσεις αυτές αλλοιώνουν το εσωτερικό των υλικών σχηματίζοντας χαρακτηριστικές δομές οι οποίες γίνονται ορατές με την χρήση λευκού ή μονοχρωματικού φωτός (προϋποτίθενται βέβαια υλικά διαμέσω των οποίων μπορεί να διέλθει το φως). Οι δομές αυτές μπορούν να «μεταφραστούν» (μέσω κατάλληλων τύπων) και να δώσουν τις κατά τόπους τάσεις εφόσον γνωρίζουμε την οπτική σταθερά μέσω πειραμάτων βαθμονόμησης. Οι φωτοελαστικές μετρήσεις γενικά γίνονται χρησιμοποιώντας μοντέλα από δισδιάστατη εποξειδική ρητίνη ή πολύ λεπτές φέτες κομμένες από τρισδιάστατα μοντέλα στα οποία οι τάσεις έχουν παραμείνει «παγωμένες».

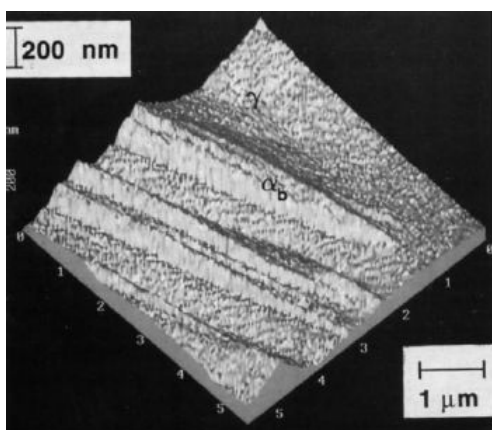
3.4.5 Μέθοδοι μέτρησης παραμορφώσεων λόγω μετασχηματισμού

Οι τεχνικές μέτρησης των παραμορφώσεων λόγω του μετασχηματισμού φάσεων βασίζονται σε παρατηρήσεις που γίνονται επάνω σε ελεύθερες επιφάνειες. Ένα δείγμα της αρχικής φάσης του υλικού ετοιμάζεται με μεταλλογραφικές μεθόδους και στην συνέχεια μετατρέπεται σταδιακά στην νέα φάση. Οι προκύπτουσες μετατοπίσεις στην ελεύθερη επιφάνεια μας δίνουν πληροφορίες για τις παραμορφώσεις λόγω του μετασχηματισμού. Οι μετατοπίσεις μπορούν να μετρηθούν από την απόκλιση διαφό-

ρων σημείων - σημαδιών αναφοράς (όπως χαρακιές ή αυλάκια) ή χρησιμοποιώντας κατάλληλες μικροσκοπικές μεθόδους.



Εικόνα 3.4: Επιφανειακές παραμορφώσεις λόγω μετασχηματισμού φάσεων. Ορατές οι χαραγές στην επιφάνεια.



Εικόνα 3.5: Περίπτωση στην οποία απαιτείται μεγαλύτερη ανάλυση. Χρησιμοποιείται ατομικό μικροσκόπιο το οποίο απεικονίζει επιφανειακή εκτόνωση τάσεων λόγω σχηματισμού μπαινίτη που προκαλεί επιφανειακές μετατοπίσεις

Προτού προχωρήσουμε στην αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία (μέθοδος διάνοιξης οπών) θα παραθέσουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα με τα κυριότερα στοιχεία που αφορούν στις σημαντικότερες μεθόδους μέτρησης των παραμενουσών τάσεων που παρουσιάστηκαν έως τώρα καθώς και έναν πίνακα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά στοιχεία των κυριότερων μεθόδων μέτρησης παραμενουσών τάσεων

Μέθοδος	Διείσδυση	Χωρική ανάλυση	Ακρίβεια	Σχόλια
Διάνοιξη οπών (στρέβλωση που δημιουργείται λόγω εκτόνωσης τάσεων)	Περίπου μία με δύο φορές επί την διάμετρο της οπής	50μm κατά το βάθος	~50MPa, περιοριζόμενη με την μείωση της ευαισθησίας κατά την αύξηση του βάθους	Μετρά εσωτερικές τάσεις τύπου I, ημικαταστροφική
Καμπυλότητα (στρέβλωση καθώς οι τάσεις αναπτύσσονται ή εκτονώνονται)	0.1 έως 0.5 του πάχους	0.05 του πάχους	Περιορίζεται από την ελάχιστη δυνατή μετρήσιμη καμπύλωση	Μετρά εσωτερικές τάσεις τύπου I.
Διάθλαση ακτίνων X	<50μm(Al), <5μm(Ti), <1mm (με αφαίρεση στρώματος)	1mm εγκάρσια, 20μm κατά το βάθος	~20MPa	Μη καταστροφική μόνο κατά την εξέταση επιφανειών, ευαίσθητη στην προετοιμασία της επιφάνειας
Διάθλαση «Σκληρών» ακτίνων X	150-50mm (Al)	20μm κάθετα στην προσπίπτουσα ακτίνα, 1mm παράλληλα στην ακτίνα		Μικρός όγκος μέτρησης οδηγεί σε μη καθαρές μετρήσεις. Μετρά τάσεις τύπου I, II, III
Διάθλαση δέσμης νετρονίων	200mm(Al), 25mm (Fe), 4mm(Ti)	500μm		Δυσκολίες πρόσβασης, χαμηλός ρυθμός ανάκτησης των δεδομένων, δαπανηρή. Μετρά τις τάσεις τύπου I & II
Υπερηχητική (οι τάσεις συσχετίζονται με τις αλλαγές στην ταχύτητα ελαστικών κυμάτων)	>10cm	5mm	10%	Ευαισθησία στις μικροδομές. Μετρά τάσεις τύπου I, II, III.
Μαγνητική	10mm	1mm	10%	Μόνο για

(διαφοροποιή- σεις σε μαγνη- τικά πεδία λό- γω ύπαρξης τάσεων)				μαγνητικά υλικά. Ευαι- σθησία στις μικροδομές. Μετρά τάσεις τύπου I, II, III.
--	--	--	--	---

Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα των διαφόρων μεθόδων μέτρησης παραμενουσών τάσεων

Τεχνική	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Διάνοιξη οπής (Hole drilling)	Γρήγορη & απλή	Καταστροφική
	Εύκολα διαθέσιμη	Περιορισμένη ευαισθησία
	Φορητότητα του εξοπλισμού	Περιορισμένη ανάλυση
	Για μεγάλο εύρος υλικών	
Διάθλαση ακτίνων X (X ray diffraction)	Εύκολα διαθέσιμη	Βασικές μετρήσεις
	Για μεγάλο εύρος υλικών	Για εργαστηριακή χρήση
	Ακριβείς μετρήσεις	
Υπερηχητική (ultrasonic)	Γενικά διαθέσιμη	Περιορισμένη ανάλυση
	Πολύ γρήγορη	Μη ακριβή αποτελέσματα
	Χαμηλό Κόστος	
	Φορητή	
Διάθλαση «σκληρών» ακτίνων X (hard X ray diffraction)	Μεγάλη διεισδυτικότητα	Τελείως εργαστηριακή
	Απεικόνιση του προφίλ των τάσεων κατά βάθος	Πολύ εξειδικευμένη
	Πολύ γρήγορη	
Διάθλαση ακτίνας νετρονίων (neutron beam diffraction)	Εξαιρετική διεισδυτική ι- κανότητα των ακτίνων	Εντελώς εργαστηριακή
	Τρισδιάστατη κατανομή τάσεων	Πολύ εξειδικευμένη
Μαγνητική (magnetic)	Πολύ γρήγορη	Μόνο για έλεγχο σιδηρομα- γνητικών υλικών
	Οικονομική	Χαμηλή ανάλυση
	Φορητή	

3.5 Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπών (hole drilling)

Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη σύγχρονη μέθοδος για την μέτρηση παραμενουσών τάσεων είναι η μέθοδος διάνοιξης οπής. Η τεχνική της μεθόδου αποσκοπεί στην παρακολούθηση και μέτρηση της αλλαγής των τάσεων που παράγονται όταν γίνει μία οπή σε ένα στοιχείο που περιέχει (εμφανίζει) παραμένουσες τάσεις. Όπως φαίνεται από την τεχνική της, πρόκειται για μέθοδο που συνδυάζει την αφαίρεση υλικού και τη χαλάρωση των υπό μελέτη τάσεων ενώ συνήθως μπορεί να χαρακτηριστεί ως ημι – καταστροφική διότι η οπή που δημιουργείται είτε είναι ασήμαντη είτε μπορεί να διορθωθεί στην συνέχεια με κατάλληλες διαδικασίες οι οποίες όμως μπορεί να επιδράσουν στο τελικό πεδίο των τάσεων.

Κατά την διάνοιξη της οπής η μεταβολή των παραμορφώσεων μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους όπως με την μέθοδο της φωτοελαστικότητας ή με την

βοήθεια εύθραυστων επικαλύψεων. Η κύρια μέθοδος όμως την οποία και εμείς θα χρησιμοποιήσουμε κατά την πειραματική διαδικασία είναι η χρήση ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (strain gages). Στην συνέχεια γνωρίζοντας το μέτρο και την κατεύθυνση των τάσεων που υπέστησαν χαλάρωση, το μέγεθος της οπής και τις ιδιότητες του υλικού, οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να προβλεφθούν με κλασική ή εμπειρική ανάλυση. Συχνά, για προφανείς λόγους (μεγάλο μέγεθος του υπό εξέταση τεμαχίου), ανοίγονται τυφλές παρά διαμπερείς οπές, οι οποίες όμως δυσχεραίνουν την ερμηνεία των παραμενουσών τάσεων, όπως θα δούμε στην συνέχεια. Επίσης, συνήθως γίνεται σταδιακή διάνοιξη της οπής (σε διάφορα βάθη) δίνοντάς μας έτσι μία εικόνα της μεταβολής των τάσεων συναρτήσει του βάθους.

Η μέθοδος της διάνοιξης οπής για τη μέτρηση παραμενουσών τάσεων εμφανίζεται για πρώτη φορά το 1934 όταν και προτάθηκε από τον J. Mathar. Στο πέρας των χρόνων μέχρι και σήμερα η μέθοδος εξελίχθηκε και εμπλουτίστηκε με την συνεισφορά πολλών ερευνητών. Η παρουσίαση της εξέλιξης της μεθόδου ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορεί όμως να αναζητηθεί στην παρατιθέμενη βιβλιογραφία [1].

3.5.1 Αρχή της μεθόδου

Η δημιουργία οπής (ακόμη και πολύ μικρής διαμέτρου) σε ένα υλικό που περιέχει παραμένουσες τάσεις, προκαλεί την τοπική χαλάρωση των τάσεων. Αυτό συμβαίνει γιατί οτιδήποτε που είναι κάθετο σε μία ελεύθερη επιφάνεια (στην προκειμένη περίπτωση η οπή) είναι απαραίτητα ένας διευθύνων άξονας στον οποίο οι κάθετες τάσεις είναι μηδενικές. Η εξάλειψη (ανακούφιση) αυτών των τάσεων στην επιφάνεια της οπής διαφοροποιεί τις τάσεις στη γύρω περιοχή, προκαλώντας αλλαγή των τοπικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια του υλικού. Αυτή είναι και η βασική αρχή για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων στην οποία βασίζεται η μέθοδος.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές της μεθόδου, η οπή που διανοίγεται είναι τυφλή και έχει βάθος το οποίο:

- είναι περίπου ίσο με την διάμετρο της ανοιγόμενης οπής,
- έχει σχέση με το πάχος του αντικειμένου.

Δυστυχώς η γεωμετρία της τυφλής οπής είναι αρκετά πολύπλοκη και δεν υπάρχει γρήγορος τρόπος από την θεωρία της ελαστικότητας για απευθείας υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων από τις παραμορφώσεις που μετρώνται.

3.5.2 Βασικά στάδια της μεθόδου

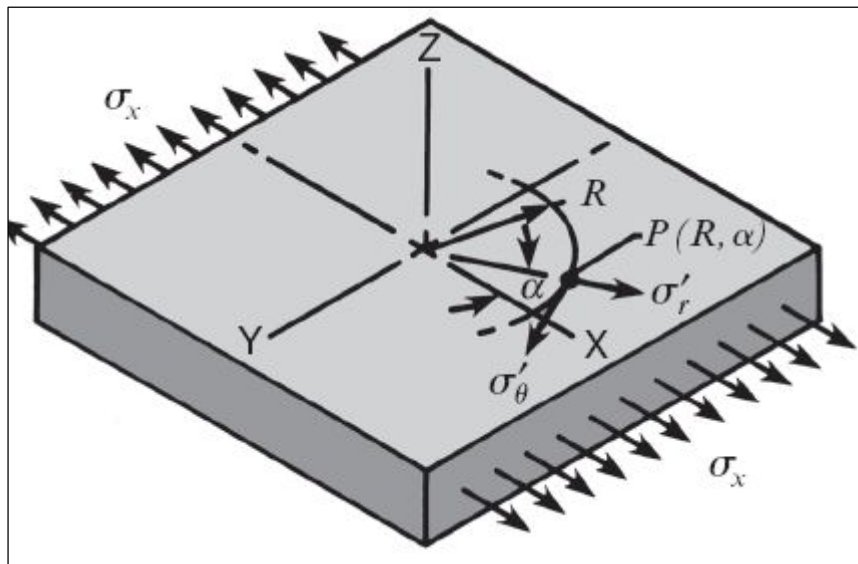
Για την διαδικασία της μέτρησης και του τελικού υπολογισμού των παραμενουσών τάσεων σε ένα τεμάχιο ακολουθούνται έξι βασικά βήματα τα οποία παραθέτουμε συνοπτικά εδώ και πάνω σε αυτά θα επεκταθούμε στην συνέχεια:

- Προσκολλάται ειδική ροζέτα τριών επιμηκυνσιομέτρων ηλεκτρικής αντίστασης (strain gages) στο προς μέτρηση τεμάχιο, στο σημείο όπου επιθυμούμε να υπολογίσουμε τις παραμένουσες τάσεις.
- Συνδέονται τα τρία άκρα των επιμηκυνσιομέτρων (μέσω καλωδίων) σε ένα στατικό μετρητή παραμορφώσεων μέσω μία γέφυρας Wheatstone.
- Πάνω στο τεμάχιο τοποθετείται ένα πολύ μεγάλης ακρίβειας σύστημα διάνοιξης οπής, το οποίο κεντράρεται έτσι ώστε να βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της ροζέτας.
- Αφού ζυγοσταθμιστούν και μηδενιστούν τα κυκλώματα των επιμηκυνσιομέτρων, γίνεται μία μικρή οπή μικρού βάθους στο κέντρο της ροζέτας.

- Στην συνέχεια λαμβάνονται οι ενδείξεις από τις τάσεις που χαλάρωσαν, οι οποίες αντιστοιχούν στις αρχικές παραμένουσες τάσεις.
- Χρησιμοποιώντας ειδικές μαθηματικές μεθόδους αναγωγής των δεδομένων (δες παρακάτω, ανάλυση της μεθόδου) υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις και η κατεύθυνσή τους από τις μετρούμενες καταπονήσεις.

3.5.3 Ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης διαμπερούς οπής (through – hole analysis)

Η θεωρητική βάση της μεθόδου διάνοιξης οπής θα αναπτυχθεί αρχικά για την γεωμετρία της διαμπερούς οπής και κατόπιν θα επεκταθεί στην περίπτωση της τυφλής οπής. Για να βοηθηθούμε στην ανάλυσή μας, υποθέτουμε μία τοπική περιοχή μίας λεπτής πλάκας η οποία υπόκειται σε ομοιόμορφες παραμένουσες τάσεις σ_x (η αρχική απλούστερη περίπτωση).



Εικόνα 3.5: Κατάσταση των τάσεων στο σημείο P πριν την διάνοιξη της οπής

Η αρχική κατάσταση των τάσεων σε τυχαίο σημείο P (ακτίνας R και γωνίας α σε σχέση με την θέση όπου και θα ανοιχθεί η οπή, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα), μπορεί να εκφραστεί με την βοήθεια πολικών συντεταγμένων ως εξής:

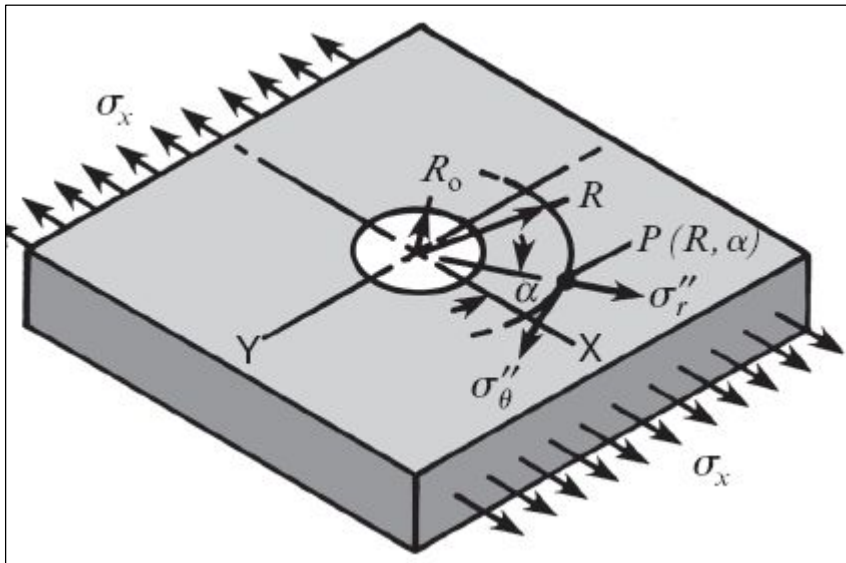
$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2} \cdot (1 + \cos 2\alpha) \quad (3.1.a)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha) \quad (3.1.β)$$

$$\tau'_{\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (3.1.γ)$$

με $r = R/R_0$, R_0 η ακτίνα της οπής και R η αυθαίρετη ακτίνα από το κέντρο της οπής έως το τυχαίο σημείο P.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η ίδια περιοχή της πλάκας που αρχικά θεωρήσαμε, μετά την διάνοιξη της μικρής διαμπερούς οπής.



Εικόνα 3.6: Κατάσταση των τάσεων στο σημείο P μετά την διάνοιξη της οπής

Τώρα οι τάσεις στην περιοχή της οπής (θέση του σημείου P) έχουν διαφοροποιηθεί πλήρως σε σχέση με αυτές πριν την διάνοιξη της οπής, καθώς σύμφωνα με την βασική αρχή της μεθόδου που αναφέραμε παραπάνω οι τάσεις σ_r και $\tau_{r\theta}$ θα πρέπει να είναι μηδενικές παντού στην επιφάνεια της οπής. Μία έκφραση των νέων τάσεων στο τυχαίο σημείο P δόθηκε από τον Kirsch το 1898 και είναι η ακόλουθη:

$$\sigma_r'' = \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2}\right) \cdot \cos 2\alpha \quad (3.2.a)$$

$$\sigma_\theta'' = \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cdot \cos 2\alpha \quad (3.2.β)$$

$$\tau_{r\theta}'' = -\frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2}\right) \cdot \sin 2\alpha \quad (3.2.γ)$$

Έτσι τώρα εύκολα μπορούμε να εκφράσουμε την αλλαγή των τάσεων, δηλαδή την χαλάρωση που επήλθε στις τάσεις που εμφανίζονται στο τυχαίο σημείο P και οφείλεται στην διάνοιξη της διαμπερούς οπής, σχηματίζοντας τις ακόλουθες διαφορές των τάσεων πριν και μετά την ύπαρξη οπής.

$$\Delta\sigma_r = \sigma_r'' - \sigma_r' \quad (3.3.a)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma_\theta'' - \sigma_\theta' \quad (3.3.β)$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau_{r\theta}'' - \tau_{r\theta}' \quad (3.3.γ)$$

Στην συνέχεια αντικαθιστώντας τις αναλυτικές εκφράσεις που δώσαμε παραπάνω για τις τάσεις του σημείου P πριν και μετά την ύπαρξη της οπής στις παραπάνω διαφορές, έχουμε τελικά τις πλήρεις εκφράσεις για τις χαλαρωμένες (ή ανακουφισμένες) τάσεις. Εάν υποθέσουμε πως το υλικό της πλάκας είναι ομοιογενές και ισότροπο στις μηχανικές του ιδιότητες καθώς και γραμμικό – ελαστικό στην τασική του συμπεριφορά έχουμε την δυνατότητα να εισάγουμε τις παραπάνω εξισώσεις στον διαξονικό νόμο του Hooke καταλήγοντας τελικά στις παραμορφώσεις που οφείλονται στην χα-

λάρωση των τάσεων στο σημείο P λόγω της διάνοιξης της οπής. Οι προκύπτουσες εκφράσεις είναι οι ακόλουθες:

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x \cdot (1+\nu)}{2 \cdot E} \cdot \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cdot \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2 \cdot (1+\nu)} \cdot \cos 2\alpha \right] \quad (3.4.a)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x \cdot (1+\nu)}{2 \cdot E} \cdot \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cdot \cos 2\alpha - \frac{4 \cdot \nu}{r^2 \cdot (1+\nu)} \cdot \cos 2\alpha \right] \quad (3.4.β)$$

Απλοποιώντας τις εξισώσεις αυτές, μπορούμε να τις γράψουμε με τέτοιο τρόπο (εισάγοντας κατάλληλους συντελεστές) ώστε να δείξουμε ότι κατά μήκος ενός κύκλου με οποιαδήποτε ακτίνα R μεγαλύτερη της R_0 , οι χαλαρωμένες ακτινικές και εφαπτομενικές παραμορφώσεις ποικίλουν με συνημιτονοειδή τρόπο. Έτσι έχουμε:

$$\varepsilon_r = \sigma_x \cdot [A + B \cdot \cos 2\alpha] \quad (3.5.a)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x \cdot [-A + C \cdot \cos 2\alpha] \quad (3.5.β)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι συντελεστές που εμφανίζονται έχουν την ακόλουθη αναλυτική μορφή:

$$A = -\frac{(1+\nu)}{2 \cdot E} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (3.6.a)$$

$$B = -\frac{(1+\nu)}{2 \cdot E} \cdot \left(\frac{4}{r^2 \cdot (1+\nu)} - \frac{3}{r^4} \right) \quad (3.6.β)$$

$$C = -\frac{(1+\nu)}{2 \cdot E} \cdot \left(-\frac{4 \cdot \nu}{r^2 \cdot (1+\nu)} + \frac{3}{r^4} \right) \quad (3.6.γ)$$

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε πως οι ανακουφισμένες παραμορφώσεις διαφοροποιούνται με έναν αρκετά πολύπλοκο τρόπο, ανάλογα με την απόσταση από την επιφάνεια της οπής. Σε πειραματικές απεικονίσεις στις μεταβολής ακτινικών και εφαπτομενικών παραμορφώσεων με την απόσταση από την οπή [2] διαπιστώνει κανείς πως οι χαλαρωμένες παραμορφώσεις μειώνονται γενικά καθώς η απόσταση από την οπή αυξάνεται. Αυτό καταδεικνύει πως είναι προτιμότερο οι καταπονήσεις αυτές να μετρηθούν σε όσο το δυνατόν μικρότερη απόσταση από την οπή έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το σήμα εξόδου των επιμηκυνσιομέτρων και άρα να έχουμε καλύτερη μέτρηση. Βέβαια, από την άλλη πλευρά, τα πειράματα έχουν δείξει πως τα παρασιτικά φαινόμενα στις μετρήσεις αυξάνονται και αυτά στην άμεση εγγύτητα της οπής. Έτσι είναι προφανές πως απαιτείται ένας κατά το δυνατόν βέλτιστος συνδυασμός των παραπάνω για την επιλογή της καλύτερης ακτίνας τοποθέτησης των επιμηκυνσιομέτρων. Διάφορες αναλυτικές και πειραματικές μελέτες έχουν σταδιακά καθιερώσει μία πρακτική διακύμανση $0.3 < r < 0.45$ όπου $r = R_0/R$ και R ακτίνα ως το κέντρο των επιμηκυνσιομέτρων.

Στις πειραματικές απεικονίσεις των παραμορφώσεων [2] μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι κατά μήκος του άξονα της σημαντικότερης κύριας τάσης η ανακουφισμένη ακτινική παραμόρφωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εφαπτομενική στην περιοχή της μέτρησης. Αυτό έχει ως συνέπεια οι εμπορικές ροζέτες επιμηκυνσιομέτρων για την ανάλυση παραμενουσών τάσεων να σχεδιάζονται με ακτινικά προσανατολισμένα πλέγματα. Επίσης είναι αναμενόμενο πως, για την περιο-

χή αυτή, μόνο η αντίστοιχη εξίσωση (για την ακτινική παραμόρφωση) θα είναι άμεσα σχετική για την περαιτέρω εκτίμηση.

Στην έως τώρα ανάλυσή μας εξετάσαμε μόνο την απλούστερη περίπτωση, τις μονοαξονικές παραμένουσες τάσεις. Στην πράξη όμως, οι παραμένουσες τάσεις είναι συχνά διαξονικές (ή μπορούν με καλή προσέγγιση να θεωρηθούν τέτοιες), με δύο μη μηδενικές διευθύνουσες τάσεις. Χαρακτηριστική περίπτωση ύπαρξης διαξονικών παραμενουσών τάσεων είναι και αυτή που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία δηλαδή συγκόλληση επιπέδου ελάσματος. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (δες κεφάλαιο 2, ενότητα 2.4.1), στην συγκόλληση κατά άκρα έχουμε τις ακόλουθες τάσεις σ_x διαμήκης τάση (παράλληλη με την ραφή), σ_y εγκάρσια τάση (κάθετη στην ραφή) και σ_z τάση κατά το πάχος του ελάσματος. Όμως πειράματα έχουν δείξει πως οι παραμένουσες τάσεις κατά το πάχος (συνιστώσα σ_z) είναι αρκετά μικρότερες των άλλων δύο συνιστωσών και άρα μπορούν με καλή προσέγγιση να θεωρηθούν αμελητέες [3]. Έτσι βρισκόμαστε τελικά σε μία περίπτωση διαξονικού πεδίου παραμενουσών τάσεων. Η συνθήκη των δύο μη μηδενικών διευθυνουσών τάσεων μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στην ανάλυση που έχει προηγηθεί με την υιοθέτηση της αρχικής υπόθεσης, η οποία ισχύει για γραμμική ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Αναφερόμενοι ξανά στην εικόνα 3.6, είναι προφανές ότι εάν η παραμένουσα τάση βρισκόταν μόνο στον άξονα των Y αντί των X, οι εξισώσεις 3.1 και 3.2 θα εξακολουθούσαν να ισχύουν με μόνη διαφορά ότι ο όρος $\cos 2\alpha$ θα αντικατασταθεί από τον όρο $\cos 2(\alpha+90^\circ)$, ή τελικά από τον όρο $-\cos 2\alpha$. Κατά συνέπεια, η χαλαρωμένη ακτινική τάση στο τυχαίο σημείο P μόνο κατά την διεύθυνση Y γράφεται ως εξής:

$$\varepsilon_r^y = \sigma_y \cdot [A - B \cdot \cos 2\alpha] \quad (3.7)$$

ενώ εξακολουθεί να ισχύει (επέκταση της 3.5.α):

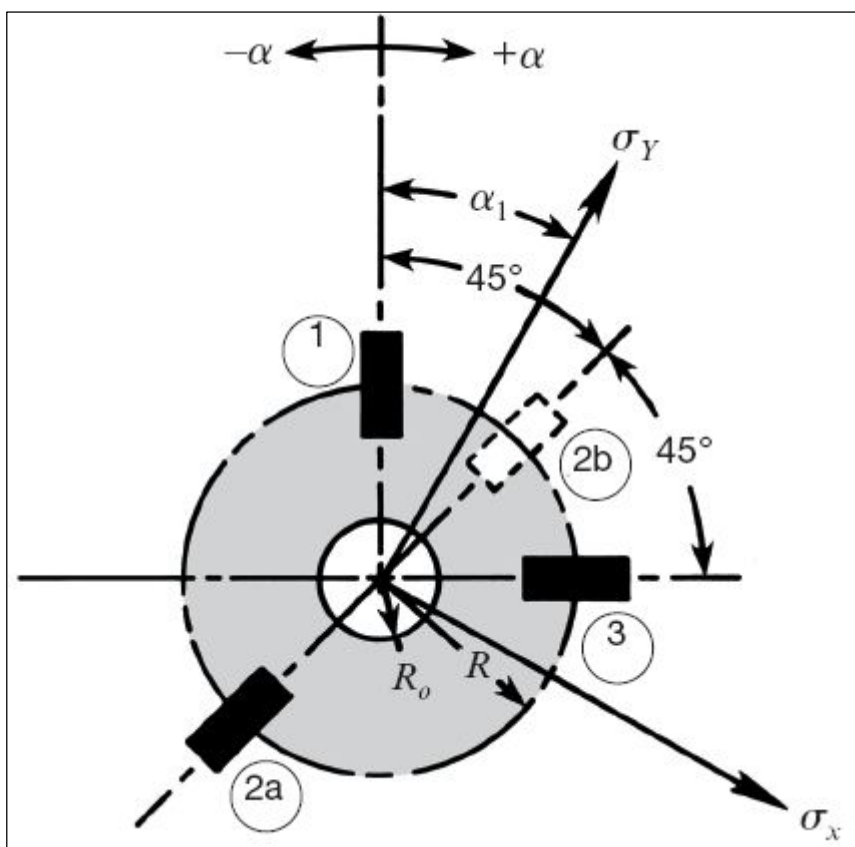
$$\varepsilon_r^x = \sigma_x \cdot [A + B \cdot \cos 2\alpha] \quad (3.8)$$

Τελικά, όταν και οι δύο παραμένουσες τάσεις είναι παρούσες μαζί, τότε από όλα τα παραπάνω προκύπτει η γενική έκφραση για την χαλαρωμένη ακτινική παραμόρφωση λόγω της διαξονικής παραμένουσας τάσης:

$$\varepsilon_r = \sigma_x \cdot (A + B \cdot \cos 2\alpha) + \sigma_y \cdot (A - B \cdot \cos 2\alpha) = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\alpha \quad (3.9)$$

Η παραπάνω εξίσωση αντιπροσωπεύει την βασική σχέση που κρύβεται πίσω από την μέθοδο της διάνοιξης οπής για την ανάλυση των παραμενουσών τάσεων. Αυτή η σχέση πρέπει φυσικά να αναστραφεί για να λυθεί ως προς τις δύο διευθύνουσες τάσεις και τη γωνία α από την άποψη των μετρημένων παραμορφώσεων που συνοδεύουν την χαλάρωση των τάσεων. Δεδομένου ότι υπάρχουν τρεις άγνωστες ποσότητες απαιτούνται τρεις ανεξάρτητες μετρήσεις της ακτινικής παραμόρφωσης για μία πλήρη λύση. Αυτές οι τρεις μετρήσεις μπορούν να αντικατασταθούν διαδοχικά στις εξισώσεις 3.9 για να παραγάγουν τρεις εξισώσεις που λύνονται έπειτα ταυτόχρονα για τα μεγέθη και τις κατευθύνσεις των διευθυνόντων τάσεων.

Η κοινή διαδικασία για την μέτρηση των παραμορφώσεων είναι να τοποθετηθούν τρία επιμηκυσιομέτρα ηλεκτρικής αντίστασης υπό την μορφή ροζέτας γύρω από την περιοχή της οπής πριν από το τρύπημα. Μία τέτοια ροζέτα παρουσιάζεται σχηματικά στην συνέχεια, όπου τα κέντρα τριών ακτινικά προσανατολισμένων επιμηκυσιομέτρων βρίσκονται σε ακτίνα R από το κέντρο της οπής. Αν και οι γωνίες μεταξύ των επιμηκυσιομέτρων μπορούν να είναι αυθαίρετες (πρέπει να τις γνωρίζουμε), μία γωνιακή αύξηση 45° οδηγεί στις απλούστερες αναλυτικές εκφράσεις, και έτσι έχει γίνει το πρότυπο για τις εμπορικές ροζέτες παραμενουσών τάσεων.



Εικόνα 3.7: Ροζέτα τριών επιμηκυνσιόμετρων για την μέτρηση παραμενουσών τάσεων

Όπως υποδεικνύεται στο παραπάνω σχήμα α_1 είναι η οξεία γωνία από τον κοντινότερο κύριο άξονα ως το επιμηκυνσιόμετρο (1), ενώ $\alpha_2 = \alpha_1 + 45^\circ$ και $\alpha_3 = \alpha_1 + 90^\circ$, με τις θετικές γωνίες να μετρώνται στην κατεύθυνση της αρίθμησης των επιμηκυνσιόμετρων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κατεύθυνση της αρίθμησης των επιμηκυνσιόμετρων για τον τύπο της ροζέτας που απεικονίζεται στο σχήμα είναι δεξιόστροφη, αλλά το επιμηκυνσιόμετρο (2), αν και βρίσκεται στην θέση (2a) είναι στην θέση (2b) για λόγους αρίθμησης. Με τις εξισώσεις 3.9 μπορεί να αποδειχθεί ότι και οι δύο θέσεις για το επιμηκυνσιόμετρο (2) παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα αρκεί η παραμένουσα τάση να είναι ομοιόμορφη στην περιοχή που αργότερα καταλαμβάνεται από την οπή. Σε γενικές εφαρμογές προτιμάται η θέση (2a) ενώ σε εφαρμογές περιορισμένου χώρου προτιμάται η θέση (2b). Τώρα η εξίσωση 3.9 γράφεται τρεις φορές, μία για κάθε επιμηκυνσιόμετρο της ροζέτας:

$$\varepsilon_1 = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\alpha \quad (3.10.a)$$

$$\varepsilon_2 = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos [2 \cdot (\alpha + 45^\circ)] \quad (3.10.β)$$

$$\varepsilon_3 = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos [2 \cdot (\alpha + 90^\circ)] \quad (3.10.γ)$$

Όταν οι εξισώσεις αυτές λυθούν για τις κύριες τάσεις και την κατεύθυνσή τους, τα αποτελέσματα μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4 \cdot A} - \frac{1}{4 \cdot B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (3.11.\alpha)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4 \cdot A} - \frac{1}{4 \cdot B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)^2} \quad (3.11.\beta)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (3.11.\gamma_1)$$

όπου α είναι η γωνία από το κοντινότερο κύριο άξονα ως το επιμηκυνσίόμετρο (1). Αν τώρα αντιστρέψουμε την έννοια της γωνίας α και την εκλάβουμε ως την γωνία από το επιμηκυνσίόμετρο (1) ως τον κοντινότερο κύριο άξονα, τότε:

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (3.11.\gamma_2)$$

Για να βρούμε ποιες κύριες τάσεις αναφέρονται στο επιμηκυνσίόμετρο (1), ακολουθούμε τον παρακάτω κανόνα:

Αν $\varepsilon_3 > \varepsilon_1$, τότε το α αναφέρεται στην σ_{\max} .

Αν $\varepsilon_3 < \varepsilon_1$, τότε το α αναφέρεται στην σ_{\min} .

Αν $\varepsilon_3 = \varepsilon_1$, τότε $\alpha = \pm 45^\circ$ και: $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ σ_{\max} στις 45°

$\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ σ_{\max} στις -45°

Τα επιμηκυνσίόμετρα είναι (αν και ελάχιστα) ευαίσθητα και σε εφαπτομενικές παραμορφώσεις. Έτσι μπορούμε να πάρουμε πιο ακριβείς τιμές για τις μεταβλητές βάζοντας τις εξισώσεις 3.4 για τις περιοχές του πλέγματος του επιμηκυνσιόμετρου. Οι μεταβλητές που καθορίζονται με τον τρόπο αυτό και προσδιορίζονται για την πεπερασμένη περιοχή των επιμηκυνσιόμετρων, υποδεικνύονται εδώ ως \bar{A} και \bar{B} για να διαχωρίζονται από τις τιμές που παίρνουν για ένα σημείο, όπως καθορίζονται από τις εξισώσεις 3.6. Μία εναλλακτική μέθοδος για να βρούμε τις \bar{A} και \bar{B} είναι να τις μετρήσουμε με την μέθοδο της πειραματικής βαθμονόμησης (experimental calibration) για την οποία θα γίνει λόγος στην συνέχεια.

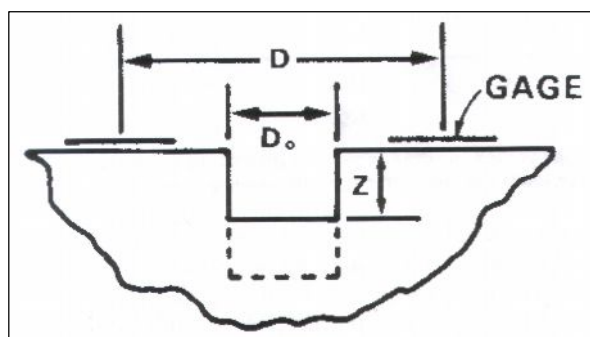
3.5.4 Ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης τυφλής οπής (blind – hole analysis)

Αυτά που έως τώρα είδαμε στην ανάλυσή μας αναφέρονται μεν σε μία γενική θεωρητική περίπτωση (διάνοιξη διαμερούς οπής διαμέσου λεπτής επίπεδης πλάκας υπό ομοιόμορφο τασικό πεδίο) απέχουν όμως αρκετά από τις πρακτικές εφαρμογές της ανάλυσης παραμενουσών τάσεων, δεδομένου ότι τα συνηθισμένα μηχανικά μέρη και τα δομικά μέλη που απαιτούν την ανάλυση παραμενουσών τάσεων μπορούν να είναι οποιουδήποτε μεγέθους ή μορφής και πολύ σπάνια λεπτά ή επίπεδα. Για τους λόγους αυτούς στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται η διάνοιξη μίας ρηχής «τυφλής» οπής.

Η χρήση αυτού του είδους της οπής σε ένα τασικό πεδίο γεννά ένα πολύ σύνθετο τοπικό φορτίο τάσεων, για το οποίο δεν έχουμε στην διάθεσή μας κάποια ακριβή λύση από την θεωρία της ελαστικότητας. Βέβαια, έχει αποδειχθεί από ερευνητές [4] ότι η περίπτωση της τυφλής οπής μπορεί να παραλληλιστεί με την ανάλυση που προ-

ηγήθηκε και αφορούσε στην διάνοιξη διαμπερούς οπής κατά την γενική φύση της κατανομής των τάσεων. Κατά συνέπεια, οι χαλαρωμένες παραμορφώσεις λόγω της διάτρησης τυφλής οπής μπορεί να θεωρηθεί πως μεταβάλλονται με τον τρόπο που περιγράφει η εξίσωση 3.9 κατά μήκος ενός ομόκεντρου κύκλου γύρω από την οπή. Επεκτείνοντας την θεώρηση αυτή λοιπόν, η εξίσωση αυτή καθώς και οι εξισώσεις 3.11, ισχύουν εξίσου στην εφαρμογή της μεθόδου διάνοιξης της τυφλής οπής με την προϋπόθεση βέβαια να εισαχθούν στις σχέσεις κατάλληλοι συντελεστές \bar{A} και \bar{B} οι οποίοι θα αναφέρονται στην τυφλή οπή. Δεδομένου ότι αυτοί οι συντελεστές δεν μπορούν να υπολογιστούν άμεσα από τις θεωρητικές εκτιμήσεις, πρέπει να ληφθούν με εμπειρικά μέσα, δηλαδή από την πειραματική βαθμονόμηση ή από αριθμητικές διαδικασίες, όπως την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Συγκρινόμενη με την διαδικασία διάνοιξης διαμπερούς οπής, η ανάλυση της τυφλής οπής περιλαμβάνει μία πρόσθετη ανεξάρτητη μεταβλητή η οποία είναι το αδιάστατο βάθος οπής και φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.8: Αδιάστατο βάθος οπής

Σε μία γενική απεικόνιση της εξάρτησής τους από τους διάφορους παράγοντες, οι μεταβλητές για την τυφλή οπή μπορούν αρχικά να γραφούν ως εξής:

$$\bar{A} \quad f_{\bar{A}}(E, \nu, r, Z/D) \quad (3.12.a)$$

$$\bar{B} \quad f_{\bar{B}}(E, \nu, r, Z/D) \quad (3.12.β)$$

Για οποιαδήποτε δεδομένη αρχική κατάσταση των παραμενουσών τάσεων, και μία σταθερή διάμετρο οπής, οι παραμορφώσεις λόγω της χαλάρωσης αυξάνονται γενικά με φθίνοντα ρυθμό καθώς το βάθος της οπής αυξάνεται. Αυτό μας δείχνει, πως για να μεγιστοποιήσουμε το σήμα που θα λάβουμε λόγω των παραμορφώσεων, η οπή θα δημιουργηθεί σε ένα βάθος που θα αντιστοιχεί σε τουλάχιστον $Z/D = 0.4$. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής δεν είναι καθόλου τυχαία και προέρχεται από πειράματα [5] τα οποία έδειξαν πως οι παραμορφώσεις σταθεροποιήθηκαν στο 100% για $Z/D = 0.4$. Να σημειωθεί εδώ, πως για την καλύτερη αντιπροσώπευση της πραγματικότητας από τα αποτελέσματα των πειραμάτων θεωρούμε πως οι παραμένουσες τάσεις είναι ομοιόμορφες για όλο το βάθος της οπής.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό αποτέλεσμα στο οποίο κατάληξαν ερευνητές [6] είναι η απόδειξη ότι, για οποιοδήποτε δεδομένο σύνολο ιδιοτήτων ενός υλικού, E (μέτρο ελαστικότητας) και ν (λόγος Poisson), οι συντελεστές \bar{A} και \bar{B} είναι απλώς γεωμετρικές λειτουργίες, και άρα παραμένουν σταθερές για όλες τις γεωμετρικά ό-

μοιες περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι μόλις καθοριστούν οι συντελεστές για ένα συγκεκριμένο τύπο ροζέτας, το μέγεθος της ροζέτας μπορεί να διαφοροποιηθεί και οι συντελεστές αυτοί να ισχύουν ακόμα, αρκεί η διάμετρος και το βάθος (έχοντας φυσικά ίδιο υλικό) να μεταβληθούν με την ίδια κλίμακα. Πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν γίνει σε μία προσπάθεια να αφαιρεθεί η εξάρτηση του υλικού από τους συντελεστές \bar{A} και \bar{B} , και να εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Σε μία τέτοια κατάληξη ο Schajer, ο οποίος εισήγαγε δύο νέους συντελεστές:

$$\bar{a} = -\frac{2 \cdot E \cdot \bar{A}}{1 + \nu} \quad (3.13.α)$$

$$\bar{b} = -2 \cdot E \cdot \bar{B} \quad (3.13.β)$$

για τους οποίους απέδειξε με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων, ότι για τυφλές οπές, μεταβάλλονται κατά λιγότερο από 2% όταν για τον λόγο Poisson ισχύει η σχέση $0.25 \leq \nu \leq 0.35$.

3.5.5 Προσδιορισμός των απαραίτητων συντελεστών

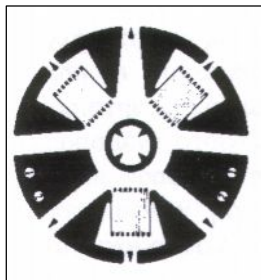
Η εφαρμογή της ανάλυσης των παραμενουσών τάσεων απαιτεί τον καθορισμό των συντελεστών \bar{A} και \bar{B} (ή των \bar{a} και \bar{b}) για να υπολογιστούν οι τάσεις από τις παραμορφώσεις που προκύπτουν λόγω της χαλάρωσης. Στην περίπτωση της διαμετρικής οπής μπορούμε να έχουμε τις ακριβείς τιμές των συντελεστών σχεδόν σε οποιαδήποτε περίπτωση κάνοντας χρήση μαθηματικών μεθόδων ανάλυσης. Αυτές οι μέθοδοι όμως δεν μπορούν να εφαρμοστούν στην ανάλυση τυφλής οπής επειδή δεν διαθέτουμε κατάλληλες εκφράσεις που να συνδέουν τις παραμορφώσεις που υπέστησαν χαλάρωση με τις παραμένουσες τάσεις. Να σημειωθεί εδώ πως παραπάνω αναφέραμε πως οι χαλαρωμένες παραμορφώσεις λόγω της διάτρησης τυφλής οπής μπορεί να θεωρηθεί πως μεταβάλλονται με τον τρόπο που περιγράφει η εξίσωση 3.9 – και κατά συνέπεια οι εξισώσεις 3.11 – κατά μήκος ενός ομόκεντρου κύκλου γύρω από την οπή. Η θεώρηση αυτή είναι ακριβής μόνο με κατάλληλη επιλογή των συντελεστών \bar{A} και \bar{B} . Η επιλογή αυτή όμως, όπως είναι προφανές δεν μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που προαναφέραμε καθώς θα υποπίπταμε σε μία μορφή «φαύλου κύκλου».

Οι αναγκαίοι συντελεστές για την ανάλυση είτε διαμετρών, είτε κυρίως τυφλών οπών (καθώς δεν υπάρχει εναλλακτική) μπορούν να καθοριστούν από την πειραματική βαθμονόμηση. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα ελκυστική δεδομένου ότι αυτόματα μπορεί να υπολογίσει τους συντελεστές που ζητάμε για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, της γεωμετρίας της ροζέτας των επιμηκυνσιομέτρων, του βάθους και της διαμέτρου της οπής. Όταν εκτελείται σωστά και προσεκτικά αποτελεί τον ακριβέστερο τρόπο για το καθορισμό των συντελεστών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα προβούμε σε αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου της πειραματικής βαθμονόμησης. Αυτό γιατί οι συντελεστές για τις ροζέτες που θα χρησιμοποιήσουμε κατά την πειραματική διαδικασία μπορούν να αναζητηθούν από νομογραφήματα που μας παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία των ροζετών και τα οποία έχουν υλοποιηθεί με συνδυασμό της πειραματικής βαθμονόμησης και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η λεπτομερής παρουσίαση της μεθόδου της πειραματικής βαθμονόμησης μπορεί να γίνει στην βιβλιογραφία [7].

3.5.6 Συντελεστές για τις ροζέτες της εταιρείας «Micro – Measurements»

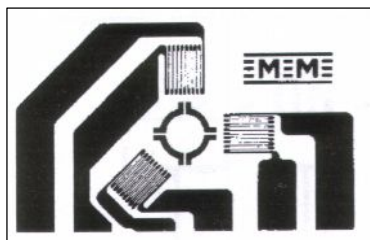
Η εταιρία «Micro – Measurements» είναι μία εταιρία η οποία δραστηριοποιείται στο πεδίο της μέτρησης των παραμενουσών τάσεων. Η εταιρία αυτή προμηθεύει τις πιο κοινά χρησιμοποιούμενες σήμερα ροζέτες για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο διάνοιξης οπής. Οι ροζέτες αυτές παράγονται σε τρεις βασικές διαμορφώσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα:

Ροζέτα τύπου EA-XX-062RE-120 (εν συντομία τύπος «RE»):



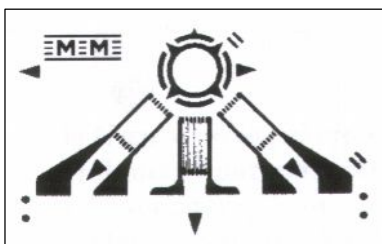
Η γεωμετρία αυτής της ροζέτας προέρχεται από τον αρχικό σχεδιασμό των Rendler και Vigness [8] και έχει χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα τεχνικά άρθρα που έχουν γραφτεί. Είναι διαθέσιμη σε ποικιλία μεγεθών έτσι ώστε να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν διαφορετικές διαμέτρους και βάθη οπής.

Ροζέτα τύπου CEA-XX-062UL-120 (εν συντομία τύπος «UL»):



Αυτό το σχέδιο ροζέτας ενσωματώνει όλα τα πρακτικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης σειράς CEA όπως τους χάλκινους ακροδέκτες κόλλησης. Ο χρόνος εγκατάστασης και τα έξοδα μειώνονται κατά μεγάλο βαθμό και όλοι οι χάλκινοι ακροδέκτες βρίσκονται στην ίδια μεριά για να απλοποιείται η διαδικασία σύνδεσης των καλωδίων. Είναι κατάλληλη για όλες τις μεθόδους διάνοιξης οπής και η γεωμετρία του πλέγματος των επιμηκυνσιομέτρων είναι παρόμοια με το σχέδιο της ροζέτας 062RE.

Ροζέτα τύπου CEA-XX-062UM-120 (εν συντομία τύπος «UM»):

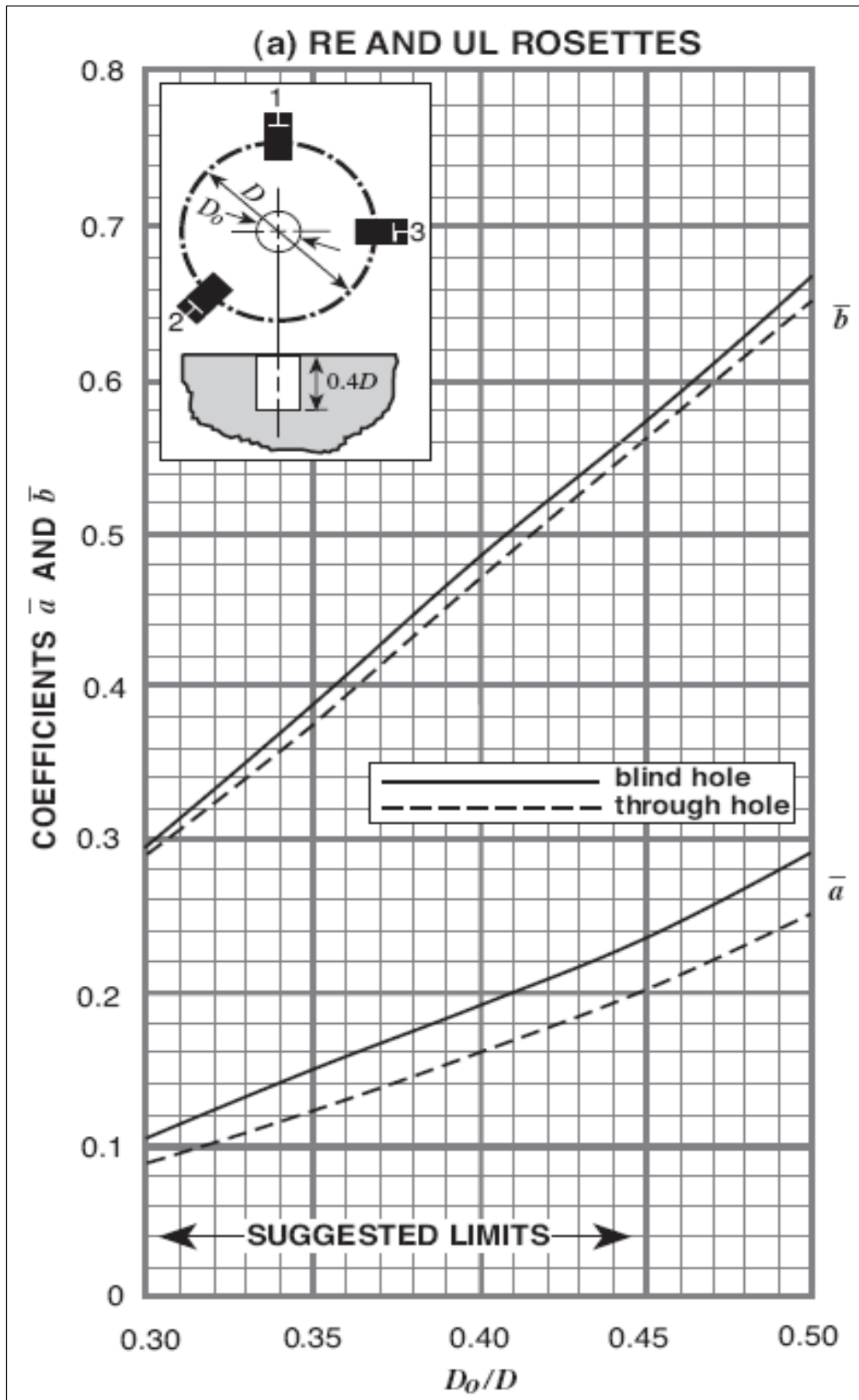


Στην ροζέτα αυτή έχει ελαττωθεί το πλάτος του πλέγματος των επιμηκυνσιομέτρων, επιτρέποντας τη δημιουργία οπής πιο κοντά σε συγκολλήσεις ή σε άλλες ειδικές εφαρμογές. Τα επιμηκυνσιόμετρα και οι ακροδέκτες βρίσκονται στην ίδια πλευρά για εξοικονόμηση χώρου. Η ροζέτα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις μεθόδους διάνοιξης οπής.

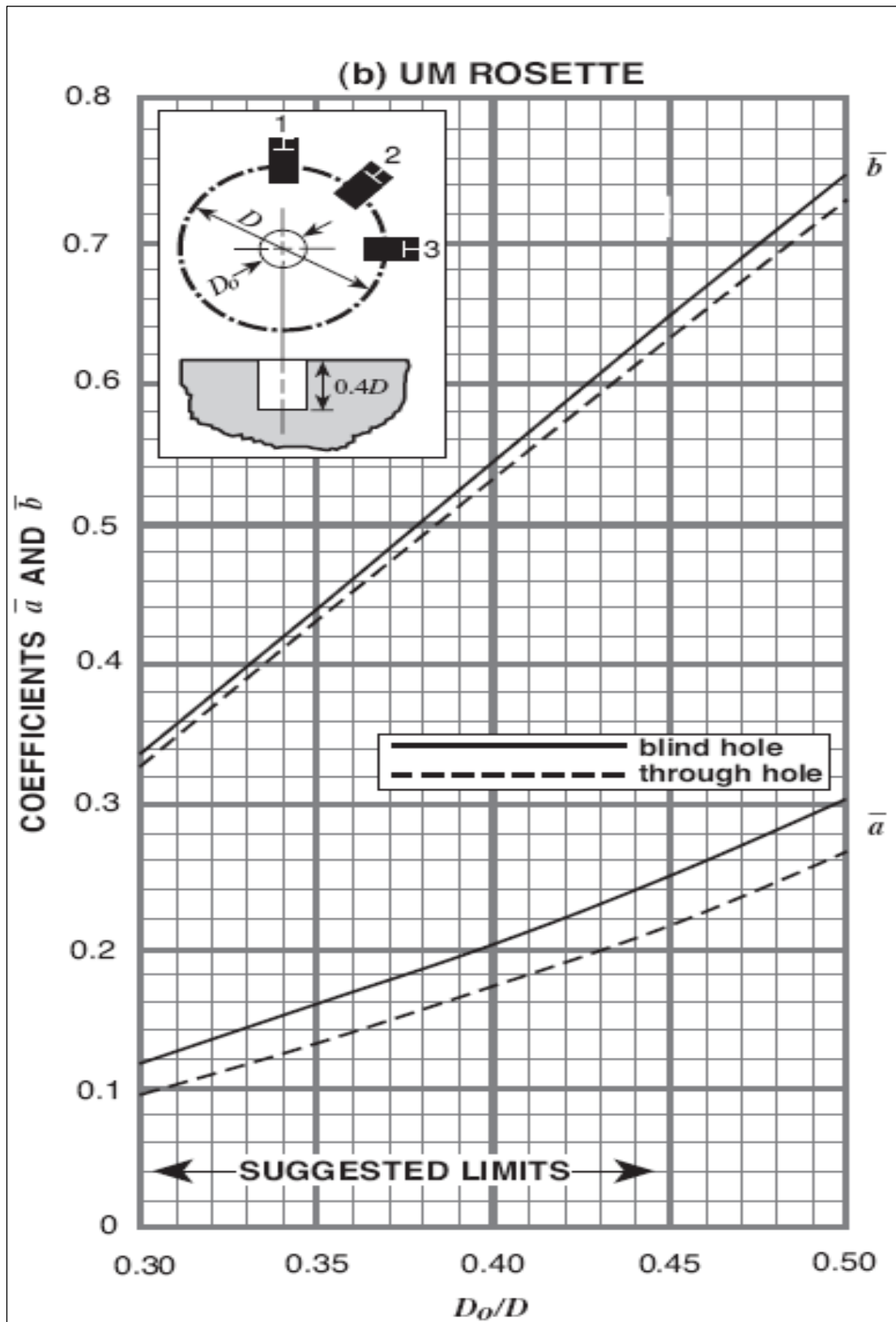
Μεταξύ των άλλων χαρακτηριστικών τους, οι παραπάνω ροζέτες κατασκευάζονται έτσι ώστε να αποτυπώνεται πάνω τους ένα ειδικό σημάδι κεντραρίσματος, ώστε το εργαλείο διάνοιξης της οπής να τοποθετείται ακριβώς στο κέντρο του κύκλου των επιμηκυνσιομέτρων. Όλοι οι τύποι «RE» και «UL» έχουν γεωμετρικά όμοιο σχηματισμό πλέγματος, με την διάμετρο του κύκλου των επιμηκυνσιομέτρων να είναι 3.25 φορές το ενεργό μήκος κάθε επιμηκυνσιομέτρου. Η κατασκευή αυτών των τύπων ροζετών με χρήση του λόγου ομοιότητας επιτρέπει την χρήση των ίδιων συντε-

λεστών \bar{a} και \bar{b} (ανεξάρτητων του υλικού) για όλα τα μεγέθη ροζέτας τύπου «RE» και για τις ροζέτες τύπου «UL», για γεωμετρικά ανάλογες οπές (για ίδια αναλογία D_o/D και Z/D). Οι ροζέτες τύπου «UM» έχουν στενότερα πλέγματα επιμηκυνσιομέτρων για να επιτρέπεται η τοποθέτησή τους εγγύτερα στην οπή. Το αποτέλεσμα είναι να έχουν τα επιμηκυνσιόμετρα αυτού του τύπου ροζέτας μεγαλύτερη ευαισθησία στην παραμόρφωση που δημιουργείται λόγω της χαλάρωσης από τη διάνοιξη της οπής.

Οι συντελεστές \bar{a} και \bar{b} για τις ροζέτες της «Micro – Measurements» παριστάνονται μέσω νομογραφημάτων στα σχήματα των επόμενων σελίδων. Να σημειώσουμε πως οι συντελεστές διαμπερούς οπής για τις ροζέτες τύπου «RE» και «UL» υπολογίστηκαν με τον τρόπο που προαναφέρθηκε (πειραματική βαθμονόμηση, [7]), ενώ οι συντελεστές τυφλής οπής καθορίστηκαν με συνδυασμό πειραματικής βαθμονόμησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Τα νομογραφήματα που παρατίθενται στην συνέχεια θεωρούνται αντιπροσωπευτικά των συγκεκριμένων ροζετών και κατάλληλα για χρήση κατά την αναγωγή των δεδομένων.



Εικόνα 3.9: Συντελεστές \bar{a} και \bar{b} ως προς το D_0/D για ροζέτες τύπου «RE» και «UL»



Εικόνα 3.10: Συντελεστές \bar{a} και \bar{b} ως προς το D_0/D για ροζέτες τύπου «UM»

3.5.7 Αναγωγή των δεδομένων – Διάνοιξη τυφλής οπής

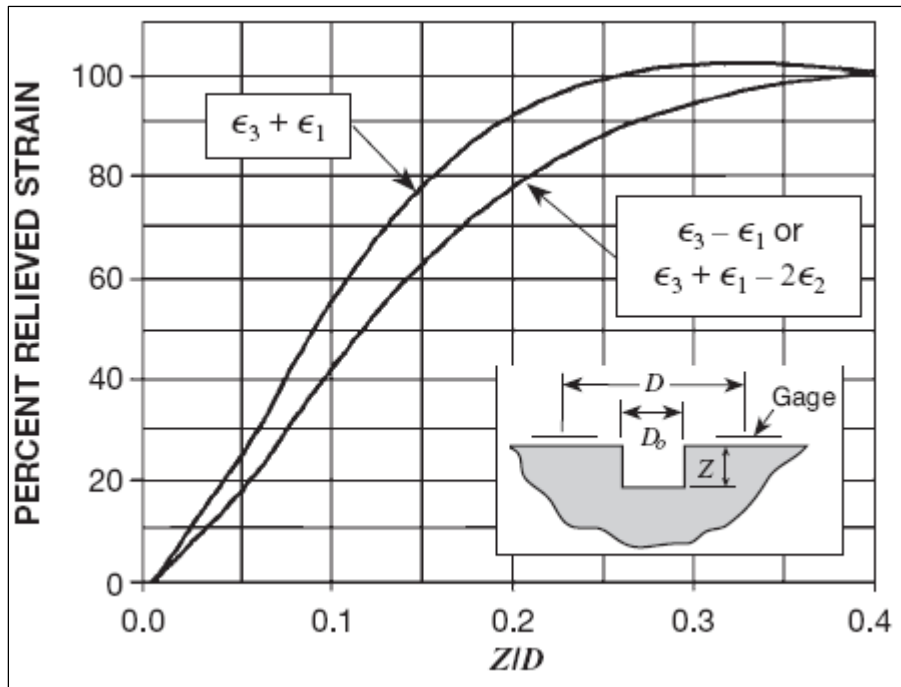
Όπως προαναφέρθηκε, είναι προτιμότερο η δημιουργία της οπής να γίνεται ανά μικρά διαστήματα και να καταγράφονται οι παρατηρούμενες παραμορφώσεις και το βάθος της οπής του κάθε διαστήματος. Αυτό γίνεται για να λαμβάνονται τα δεδομένα και να κρίνεται εάν οι παραμένουσες τάσεις είναι ομοιόμορφες με το βάθος. Αν δεν γίνει αυτή η διαδικασία τότε δεν θα ελεγχθεί η ομοιομορφία των τάσεων και επομένως οι τελικά υπολογισμένες παραμένουσες τάσεις θα είναι αναξιόπιστες.

Προς το παρόν δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο κριτήριο που να αποδεικνύει την ομοιομορφία των τάσεων από την επιφάνεια του υπό μέτρηση τεμαχίου ως το κάτω μέρος της πραγματοποιούμενης οπής. Παρόλα αυτά τα δεδομένα που λαμβάνονται από την «βηματική» διάνοιξη της οπής και που παριστούν την παραμόρφωση ως προς το βάθος της οπής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με στόχο την ανίχνευση τυχόν ανομοιόμορφης κατανομής των τάσεων. Τα βήματα της όλης διαδικασίας συνοψίζονται ακολούθως:

- Υπολογίζονται για κάθε διάστημα βάθους τα αθροίσματα και οι διαφορές των παραμορφώσεων $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$ και $(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$ αντίστοιχα.
- Βρίσκονται οι τιμές των παραπάνω δεδομένων $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$ και $(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$ για το μέγιστο βάθος οπής, δηλαδή όταν το βάθος της οπής ισούται με 0.4 φορές την μέση διάμετρο του κύκλου των επιμηκυνσιομέτρων της ροζέτας ($Z = 0.4 \cdot D$).
- Για κάθε αυξανόμενο διάστημα βάθους, διαιρείται η τιμή του $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$ που αντιστοιχεί σε αυτό το βάθος, με την τιμή $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$ που αντιστοιχεί στο μέγιστο βάθος οπής. Το ίδιο γίνεται και για τις τιμές της ποσότητας $(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$. Το αποτέλεσμα που θα προκύψει μετατρέπεται σε ποσοστό επί τοις % (π.χ. εάν προκύψει $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1) = 0.34$, το αντίστοιχο ποσοστό της χαλάρωσης για τις παραμέτρους $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$ θα είναι 34%).
- Τα ποσοστά των (ανοιγμένων) παραμορφώσεων $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)$ και $(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$ που υπολογίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία, σχεδιάζονται για όλα τα βήματα της διάνοιξης σε γραφική παράσταση ως προς το Z/D που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα διάνοιξης.

Τα σημεία των δεδομένων που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία πρέπει να δίνουν καμπύλη γραφικής παράστασης αρκετά όμοια με αυτή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Εάν αυτό δεν συμβαίνει, τότε είναι ένδειξη ανομοιομορφίας των τάσεων ή λάθους κατά την μέτρηση.

Όταν η κατεύθυνση μίας κύριας παραμένουσας τάσης είναι πιο κοντά στην αξονική κατεύθυνση του επιμηκυνσιομέτρου (2) στο σχήμα 3.4 παρά στο επιμηκυνσιομέτρο (1) ή (3), το άθροισμα των παραμορφώσεων $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)$ θα είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερο από το $(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$. Σε αυτή την περίπτωση ο έλεγχος του ποσοστού των παραμορφώσεων που περιγράφηκε παραπάνω, θα πρέπει να γίνεται χρησιμοποιώντας το $(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2 \cdot \varepsilon_2)$ αντί του $(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)$ όπως φαίνεται άλλωστε και στο επόμενο σχήμα.

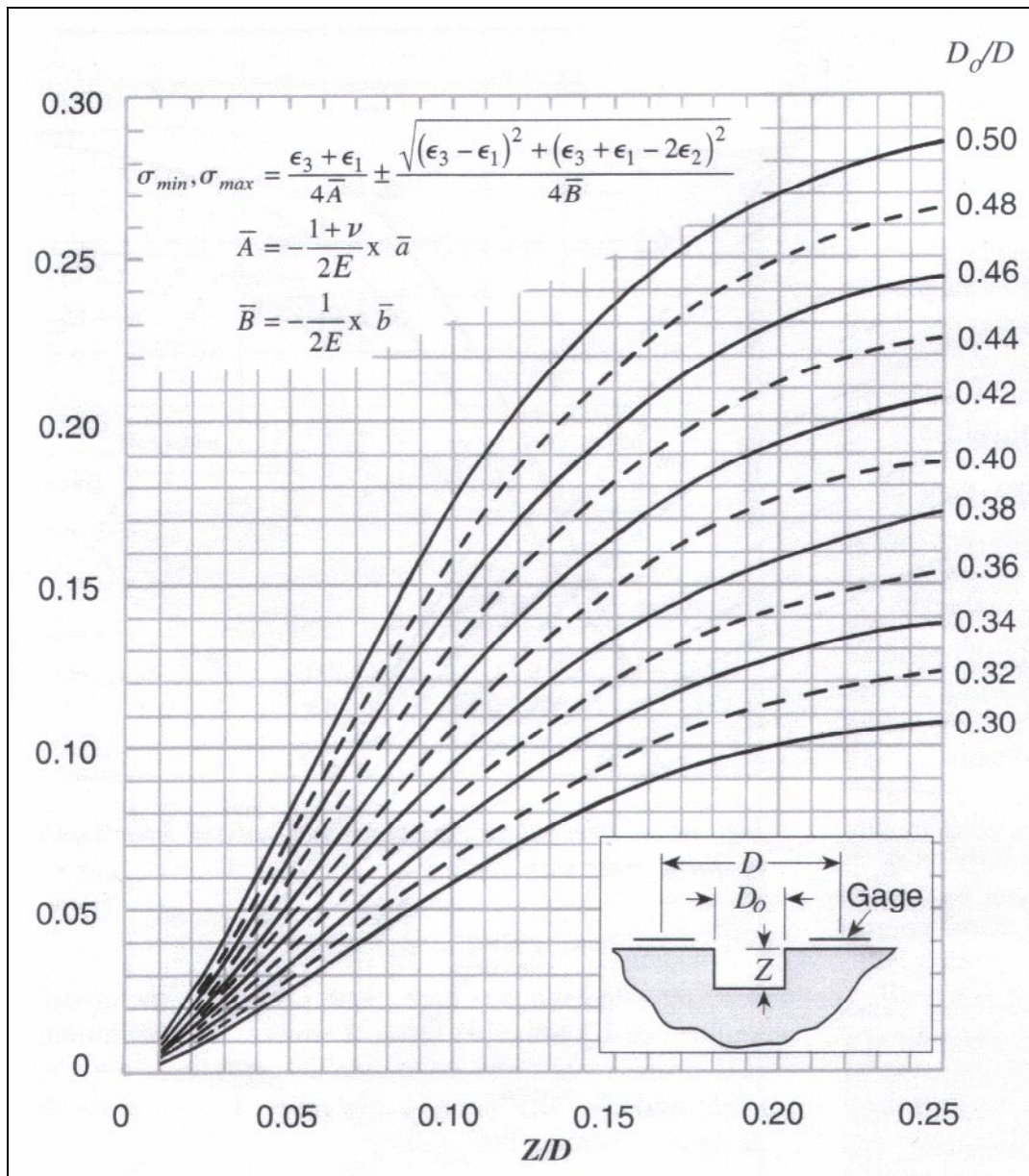


Εικόνα 3.11: Ποσοστό παραμόρφωσης έναντι Z/D για ομοιόμορφες τάσεις με το βάθος

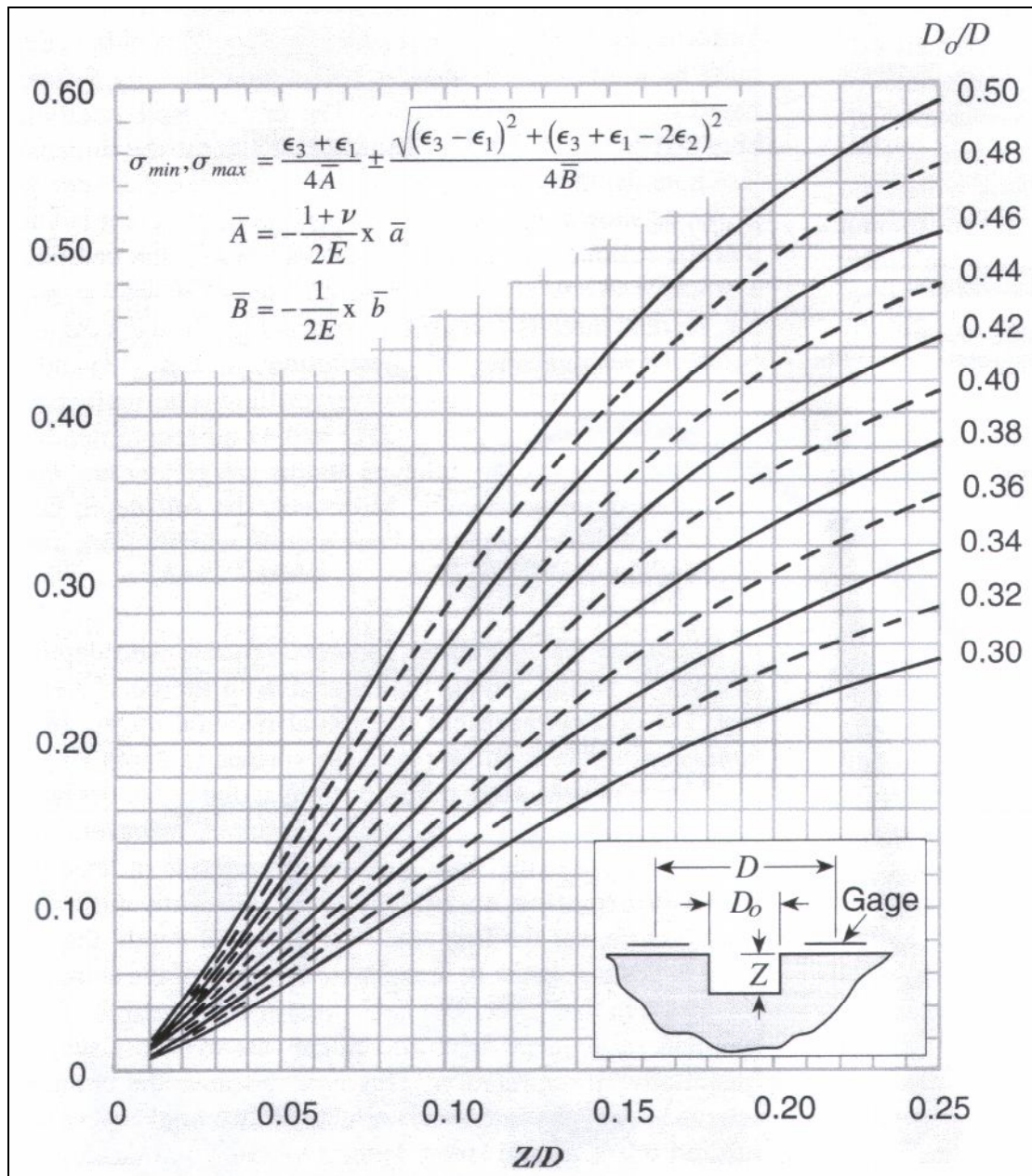
3.5.8 Υπολογισμός των ισοδύναμων ομοιόμορφων παραμενουσών τάσεων

Αν τα σημεία του ποσοστού των παραμορφώσεων που υπολογίστηκαν με την πιο πάνω μέθοδο αποκλίνουν από την καμπύλη – κριτήριο ομοιομορφίας, σημαίνει ότι οι τάσεις είναι ανομοιόμορφες με το βάθος και τότε απαιτείται περαιτέρω ανάλυση έτσι ώστε να υπολογιστούν, για κάθε αύξηση του βάθους οπής, οι αντίστοιχες ισοδύναμες ομοιόμορφες κύριες παραμένουσες τάσεις. Οι ισοδύναμες ομοιόμορφες τάσεις είναι οι τάσεις που αν κατανεμηθούν ομοιόμορφα, θα παράγουν την ίδια συνολική παραμόρφωση, σε κάθε βάθος, με τις τάσεις που μετρήθηκαν κατά την διάνοιξη της οπής (που ήταν ανομοιόμορφες με το βάθος).

Για να υπολογιστούν οι ισοδύναμες ομοιόμορφες τάσεις σε κάθε βάθος, πρέπει να είναι γνωστοί οι συντελεστές των ομοιόμορφων τάσεων \bar{a} και \bar{b} σαν συνάρτηση του βάθους. Οι συντελεστές αυτοί καθορίστηκαν από τον Schajer ο οποίος έκανε τη μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία. Οι συντελεστές που προέκυψαν έχουν σχεδιαστεί σε σχέση με το Z/D για διάφορες τιμές του λόγου των διαμέτρων D_o/D και παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα. Όταν είναι γνωστό ότι η παραμένουσα τάση είναι ομοιόμορφη με το βάθος (βάσει της προηγούμενης μεθοδολογίας ελέγχου), οι συντελεστές για κάθε συνδυασμό των Z/D και D_o/D μπορούν να διαβαστούν κατευθείαν από τις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 3.9 & 3.10 και να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της παραμένουσας τάσης αντικαθιστώντας τα \bar{a} και \bar{b} στην εξίσωση 3.13 και κατόπιν στην 3.11. Πρακτικά όμως η διάνοιξη συνεχίζεται για πλήρες βάθος οπής ($Z = 0.4 \cdot D$), διότι εκεί οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες και μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 3.12: Συντελεστής $\bar{\alpha}$ για ροζέτες τύπου «RE» και «UL» ως προς Z/D για διαφορετικές τιμές του D_o/D



Εικόνα 3.13: Συντελεστής \bar{b} για ροζέτες τύπου «RE» και «UL» ως προς Z/D για διαφορετικές τιμές του D_o/D

Τελειώνοντας την παρουσίαση της μεθόδου διάνοιξης οπής για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων, πρέπει να αναφέρουμε πως έως τώρα εξετάσαμε το θεωρητικό της κομμάτι. Η μέθοδος, πέρα από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων και την επεξεργασία τους, περιλαμβάνει και άλλα στάδια τα οποία αφορούν στην προετοιμασία των δοκιμίων στα οποία θα γίνει η μέτρηση και γενικότερα στο στήσιμο του όλου εξοπλισμού. Τα στάδια αυτά θα παρουσιαστούν στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας στο κεφάλαιο της πειραματικής διαδικασίας.

[1] Διπλωματική Εργασία, Μέτρηση των Παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο Διάνοιξης Οπής, Μ.Κ. Ριτσώνης, Αθήνα 2006, κεφάλαιο 2 σελ. 8.

[2] Διπλωματική Εργασία, Μέτρηση των Παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο Διάνοιξης Οπής, Μ.Κ. Ριτσώνης, Αθήνα 2006, κεφάλαιο 3 σελ. 29, σχήμα 3.3.

[3] Residual Stresses in Welded Structures, R.H. Leggatt (www.sciencedirect.com)

[4] Εργασία των Rendler και Vigness. Δες επίσης και [1].

[5] Διπλωματική Εργασία, Μέτρηση των Παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο Διάνοιξης Οπής, Μ.Κ. Ριτσώνης, Αθήνα 2006, κεφάλαιο 3 σελ. 34, σχήμα 3.5.

[6] Εργασία των Rendler και Vigness. Δες επίσης και [1].

[7] Διπλωματική Εργασία, Μέτρηση των Παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο Διάνοιξης Οπής, Μ.Κ. Ριτσώνης, Αθήνα 2006, κεφάλαιο 3 σελ. 35, Πειραματική Βαθμολόγηση (Experimental Calibration).

[8] Εργασία των Rendler και Vigness. Δες επίσης και [1]

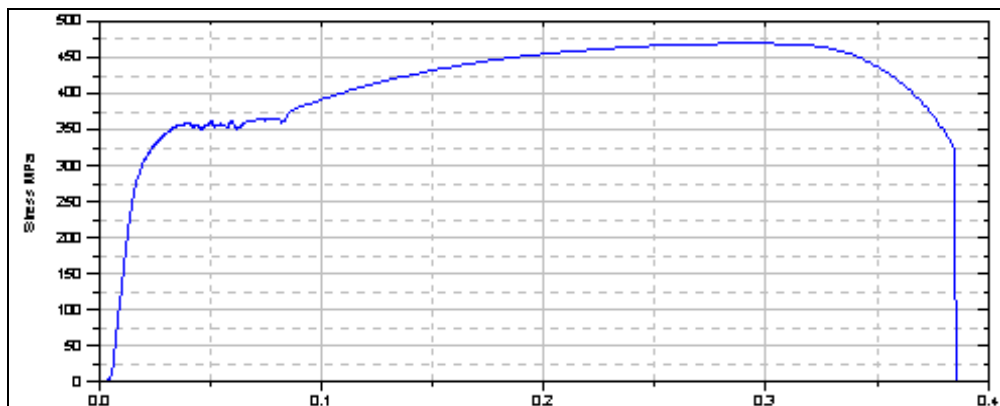
Κεφάλαιο 4^ο: **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναλυτική παρουσίαση όλων των σταδίων της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Σκοπός της όλης διαδικασίας που ακολουθήθηκε ήταν η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων που δημιουργήθηκαν κατά την συγκόλληση τεμαχίου καθώς και η ανάλυση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η πειραματική διαδικασία που έλαβε χώρα μπορεί γενικά να διαχωριστεί στα ακόλουθα στάδια τα οποία και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην συνέχεια:

- Κοπή και μορφοποίηση των ελασμάτων
- Συγκόλληση των ελασμάτων
- Μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο του *hole drilling*
- Επεξεργασία των μετρήσεων

4.1 Κοπή και μορφοποίηση των ελασμάτων – αναγνώριση του υλικού

Στο στάδιο αυτό έγινε η κοπή του μετάλλου και η μορφοποίηση του έτσι ώστε να έχουμε τελικά το έλασμα στην μορφή που επιθυμούμε για την συγκόλληση. Το υλικό που επιλέχθηκε είναι κοινός χάλυβας κατασκευών το οποίο παραγγέλθηκε σε ράβδους (βέργες) μήκους τριών μέτρων, πλάτους 50mm και πάχους 5mm. Αρχικά απαιτήθηκε να γίνει ακριβής αναγνώριση του είδους του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε διότι στην συνέχεια θα έπρεπε να γίνει σωστή επιλογή υλικού για την μοντελοποίηση της συγκόλλησης (κεφάλαιο 5) από την βιβλιοθήκη έτοιμων υλικών του προγράμματος. Η αναγνώριση αυτή επιλέχθηκε να γίνει με δύο τρόπους: με την μέτρηση του ορίου διαρροής του υλικού και με την μέτρηση της σκληρότητας του και στην συνέχεια σύγκριση των τιμών αυτών με τις ενδεικτικές των χαλύβων οι οποίες υπάρχουν πινακοποιημένες. Για την μέτρηση του ορίου διαρροής του υλικού μας έγινε δοκιμή εφελκυσμού σε κατάλληλη συσκευή μηχανικών δοκιμών του εργαστηρίου (συσκευή Instron μέγιστου φορτίου 10 τόνων) δοκιμίου μήκους 100mm και διατομής $\sim 46\text{mm}^2$. Η συσκευή στην οποία έγινε η δοκιμή, μέσω του λογισμικού της, μας έδωσε το ακόλουθο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) από το οποίο μπορούμε να υποθέσουμε ότι το όριο διαρροής του υλικού μας κυμαίνεται στα 360 MPa.



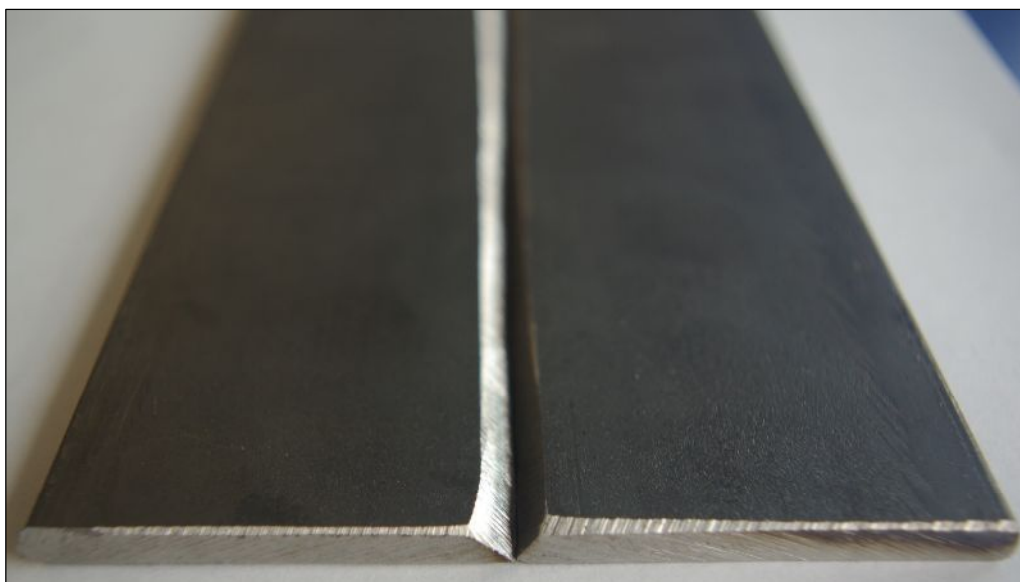
Εικόνα 4.1 : Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων που λήφθηκε μετά την δοκιμή εφελκυσμού

Να σημειώσουμε βέβαια πως το δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή εφελκυσμού δεν ήταν διαμορφωμένο σύμφωνα με τα πρότυπα για τις δοκιμές εφελκυσμού πράγμα που σημαίνει ότι η τιμή του ορίου διαρροής που προέκυψε δεν είναι απαραίτητα η ακριβής, βρισκόμαστε όμως αρκετά κοντά στην πραγματική, τόσο ώστε σε συνδυασμό με τις τιμές της σκληρομέτρησης να μπορέσουμε να αναγνωρίσουμε το υλικό που θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε στην μοντελοποίηση. Όσον αφορά τον δεύτερο τρόπο αναγνώρισης του υλικού, πραγματοποιήθηκε σκληρομέτρηση κατά Vickers σε σκληρόμετρο Wolpert του εργαστηρίου. Επειδή δεν γνωρίζαμε με ποιο φορτίο λαμβάνονται οι τυπικές τιμές σκληρότητας κατά Vickers στους αντίστοιχους πίνακες, πραγματοποιήσαμε τρεις σκληρομετρήσεις με φορτία του 1kg, των 5kg και των 10kg έτσι ώστε από τις τιμές που θα πάρουμε να μπορέσουμε με μεγαλύτερη ευκολία να διαπιστώσουμε σε ποια κατηγορία χάλυβα βρισκόμαστε. Οι τιμές που προέκυψαν είναι οι ακόλουθες:

<i>Φορτίο σκληρομέτρησης</i>	<i>Σκληρότητα κατά Vickers</i>
<i>1kg</i>	<i>309</i>
<i>5kg</i>	<i>201</i>
<i>10kg</i>	<i>165</i>

Ανατρέχοντας σε πίνακες και σε συνδυασμό με τα παραπάνω δεδομένα, μπορούμε με αρκετή ασφάλεια να θεωρήσουμε πως το υλικό μας είναι (μαλακός) ανθρακοχάλυβας C45 κατά DIN 17200.

Μετά την αναγνώριση του υλικού, οι βέργες κόπηκαν στο επιθυμητό μήκος (200mm) κάνοντας χρήση του δισκοτόμου μετάλλων («ψαλίδι») του εργαστηρίου κατεργασιών των υλικών, ιταλικής κατασκευής, μάρκας MEP ισχύος 8kW και στροφών 1400rpm. Στην συνέχεια με την βοήθεια χειροκίνητου λειαντικού τροχού δημιουργήθηκε αυλάκι (λοξοτομή) κατά μήκος των άκρων των ελασμάτων. Η τελική εικόνα των ελασμάτων καθώς και το αρχικό τους σχέδιο παρατίθενται στην συνέχεια.





Εικόνες 4.2 & 4.3: Τελική μορφή των τεμαχίων πριν την πραγματοποίηση της συγκόλλησης

Η παραπάνω μορφή και οι διαστάσεις που αποδόθηκαν στα ελάσματα που προορίζονται για την συγκόλληση δεν έγιναν τυχαία αλλά υπαγορεύτηκαν από την έως τώρα εμπειρία μας στην συγκόλληση ελασμάτων κατά άκρα καθώς και από συγκεκριμένους κανόνες που προβλέπονται για τις περιπτώσεις αυτές.

- Το μήκος των τεμαχίων επιλέχθηκε τέτοιο ώστε να μας δώσει μία ραφή συγκόλλησης «ικανού» μήκους για να μετρηθούν και να μελετηθούν οι διαμήκης παραμένουσες τάσεις και ταυτόχρονα να αποφευχθούν διάφορα προβλήματα που θα οφείλονταν σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο μήκος ελασματος (το λεγόμενο «πετσικάρισμα» για το οποίο θα γίνει μία σύντομη αναφορά στην συνέχεια σχετικά με όσα αντιμετωπίστηκαν κατά την διαδικασία της συγκόλλησης).
- Το πλάτος των ελασμάτων που επιλέχθηκε θεωρήθηκε ικανοποιητικό για την μελέτη των παραμενουσών τάσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Τυχόν μεγαλύτερο πλάτος θα ήταν περιττό καθώς θα ήταν πολύ δύσκολο η ενέργεια (θερμότητα) η οποία παρέχεται στην περιοχή της ραφής κατά την κόλληση να διαχυθεί σε μεγάλη κατά το πλάτος απόσταση από την ραφή λόγω του συγκεντρωμένου τρόπου διοχέτευσής της σε αυτή.
- Το πάχος των ελασμάτων επιλέχθηκε μικρό έτσι ώστε να ισχύσει η θεώρηση (δες κεφάλαιο 2, ενότητα 2.4.2) πως οι παραμένουσες τάσεις για τέτοια μεγέθη του πάχους των συγκολλώμενων ελασμάτων μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται κατά την εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση. Παρόλα αυτά το πάχος των ελασμάτων δεν θα μπορούσε να μειωθεί δραματικά ($1 \sim 2\text{mm}$) καθώς θα υπήρχε διαρροή λουτρού μετάλλου κατά την κόλληση από την κάτω πλευρά του τεμαχίου καθώς και αδυναμία εφαρμογής της μεθόδου διάνοιξης οπής για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων.

- Τέλος, η διαμόρφωση των άκρων των ελασμάτων που επρόκειτο να συγκολληθούν σε μορφή “V” (λοξοτομή) υπαγορεύθηκε από (εμπειρικούς) κανόνες που διέπουν τις συγκολλήσεις και συναντώνται στην βιβλιογραφία. Το μέγεθος του αυλακιού που διαμορφώνεται στα άκρα της συγκόλλησης εξαρτάται κυρίως από το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων και γίνεται έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή διείσδυση του μετάλλου κόλλησης στο μέταλλο βάσης.

4.2 Συγκόλληση των ελασμάτων

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση των ελασμάτων από τον τεχνίτη του εργαστηρίου έτσι ώστε να γίνει μετά η επιλογή του καταλληλότερου τεμαχίου για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 5 συγκολλήσεις (10 τεμάχια) χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους, την συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο σε ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων (Metal Inert Gas – MIG) και την χειρωνακτική συγκόλληση τόξου (Manual Metal Arc – MMA). Ακολουθώντας τις συμβουλές του τεχνίτη, οι οποίες όπως θα δούμε στην συνέχεια ήταν χρησιμότερες, πριν την εκτέλεση της συγκόλλησης επιλέχθηκε τα τεμάχια να συγκρατηθούν μεταξύ του με δύο ή τρεις πολύ μικρές (σχεδόν σημειακές) συγκολλήσεις («τσιμπήματα»). Τα αποτελέσματα της διαδικασίας φαίνονται στις ακόλουθες φωτογραφίες με τον ανάλογο σχολιασμό.



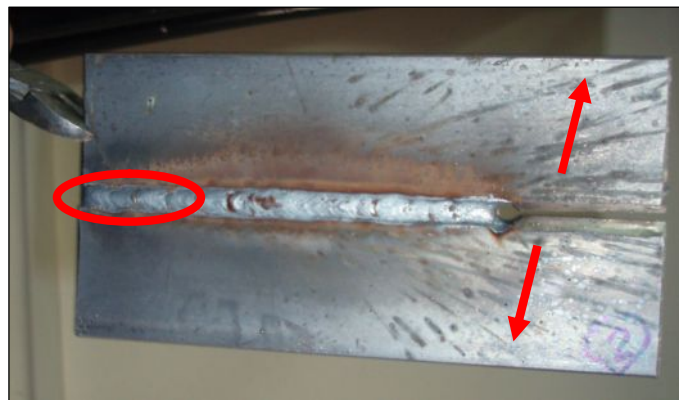
Εικόνα 4.4: Τοποθέτηση των ελασμάτων για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης

Στην παραπάνω φωτογραφία φαίνεται ο τρόπος τοποθέτησης των ελασμάτων με σκοπό την πραγματοποίηση της συγκόλλησης. Τα δύο τεμάχια έρχονται σε επαφή από την πλευρά της λοξοτομής έτσι ώστε να σχηματισθεί το αυλάκι διατομής “V” το οποίο θα βοηθήσει στη διείσδυση της κόλλησης κατά το πάχος του ελάσματος.

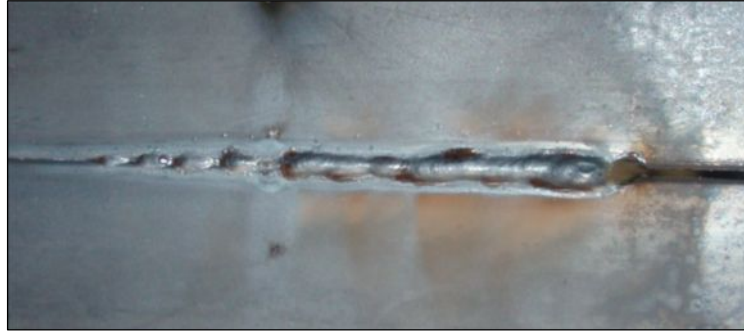


Εικόνα 4.5: Συγκόλληση τεμαχίων χωρίς να έχει προηγηθεί κάποιας μορφής συγκράτηση

Μία από τις συγκολλήσεις η οποία πραγματοποιήθηκε χωρίς να έχει προηγηθεί η συγκράτηση των τεμαχίων. Λόγω της μη συγκράτησης των τεμαχίων έχουμε ορατά μη επιθυμητά αποτελέσματα τα οποία αχρηστεύουν την κόλληση. Το αυλάκι έχει ολοκάθαρα ανοίξει καθώς τα δύο τεμάχια έχουν απομακρυνθεί από την αρχική τους θέση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πλευρά που συγκολλήθηκε πρώτη (σημειώνεται με κόκκινο κύκλο, εικόνα 4.6) κατά την απόψυξή της και μη συναντώντας κάποια αντίσταση (απουσία συγκράτησης) λόγω της συρρίκνωση του μετάλλου «τράβηξε» τα δύο ελάσματα, με αποτέλεσμα αυτά να απομακρυνθούν στο άλλο άκρο (οι κινήσεις των ελασμάτων σημειώνονται με τα κόκκινα βέλη, εικόνα 4.6). Η απομάκρυνση των δύο ελασμάτων είναι ακόμη πιο ευδιάκριτη στις επόμενες φωτογραφίες. Σε μία από αυτές μάλιστα φαίνεται η διαρροή τήγματος μετάλλου κάτω και από την ρίζα του αυλακιού. Επίσης, πέρα από την απομάκρυνση των δύο ελασμάτων, παρατηρήθηκε και το λεγόμενο «πετσικάρισμα», δηλαδή απόκλιση από την αρχική γωνία των 180 μοιρών μεταξύ των ελασμάτων που οφείλεται και αυτό στο φαινόμενο της συστολής κατά την απόψυξη και στην απουσία συγκράτησης.



Εικόνα 4.6: Συγκόλληση τεμαχίων χωρίς να έχει προηγηθεί κάποιας μορφής συγκράτηση

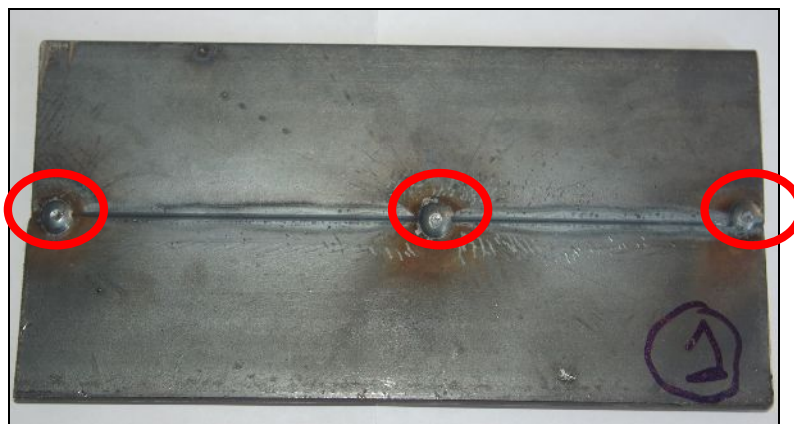


Εικόνα 4.7: Εμφανής διαρροή του τήγματος (λουτρού) του μετάλλου κάτω από την ραφή (σημειώνεται με κόκκινο περίγραμμα) που οφείλεται στην απομάκρυνση των δύο ελασμάτων (συστολή – απουσία συγκράτησης)



Εικόνα 4.8: «Πετσικάρισμα» (οριακά ορατό) των ελασμάτων λόγω απουσίας συγκράτησης, δηλαδή διαφοροποίησης της αρχικής γωνίας μεταξύ των ελασμάτων, η οποία μπορεί να γίνει αντιληπτή σαν «μη επιπεδότητα» μεταξύ των ελασμάτων.

Λόγω αυτού του μη επιθυμητού αποτελέσματος κατά την συγκόλληση των ελασμάτων χωρίς συγκράτηση, τα υπόλοιπα τεμάχια συγκολλήθηκαν αφού πρώτα είχαν συγκρατηθεί. Η συγκράτηση αυτή δεν έγινε με κάποια εξωτερική διάταξη – συσκευή, αλλά με δύο ή τρεις πολύ μικρές συγκολλήσεις σε κομβικά σημεία των ελασμάτων. Οι συγκολλήσεις αυτές φαίνονται στην ακόλουθη φωτογραφία:



Εικόνα 4.9: Συγκράτηση των ελασμάτων

Να σημειώσουμε εδώ πως αυτές οι μικρές συγκολλήσεις συγκράτησης των ελασμάτων («τσιμπήματα») έγιναν όλες με την μέθοδο MIG όποια και αν ήταν η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην συνέχεια για την κανονική συγκόλληση (MIG ή χειροκίνητη) ενώ πρόκειται και για τον ενδεδειγμένο τρόπο συγκράτησης για την συγκόλληση τεμαχίων μεγάλου μήκους.

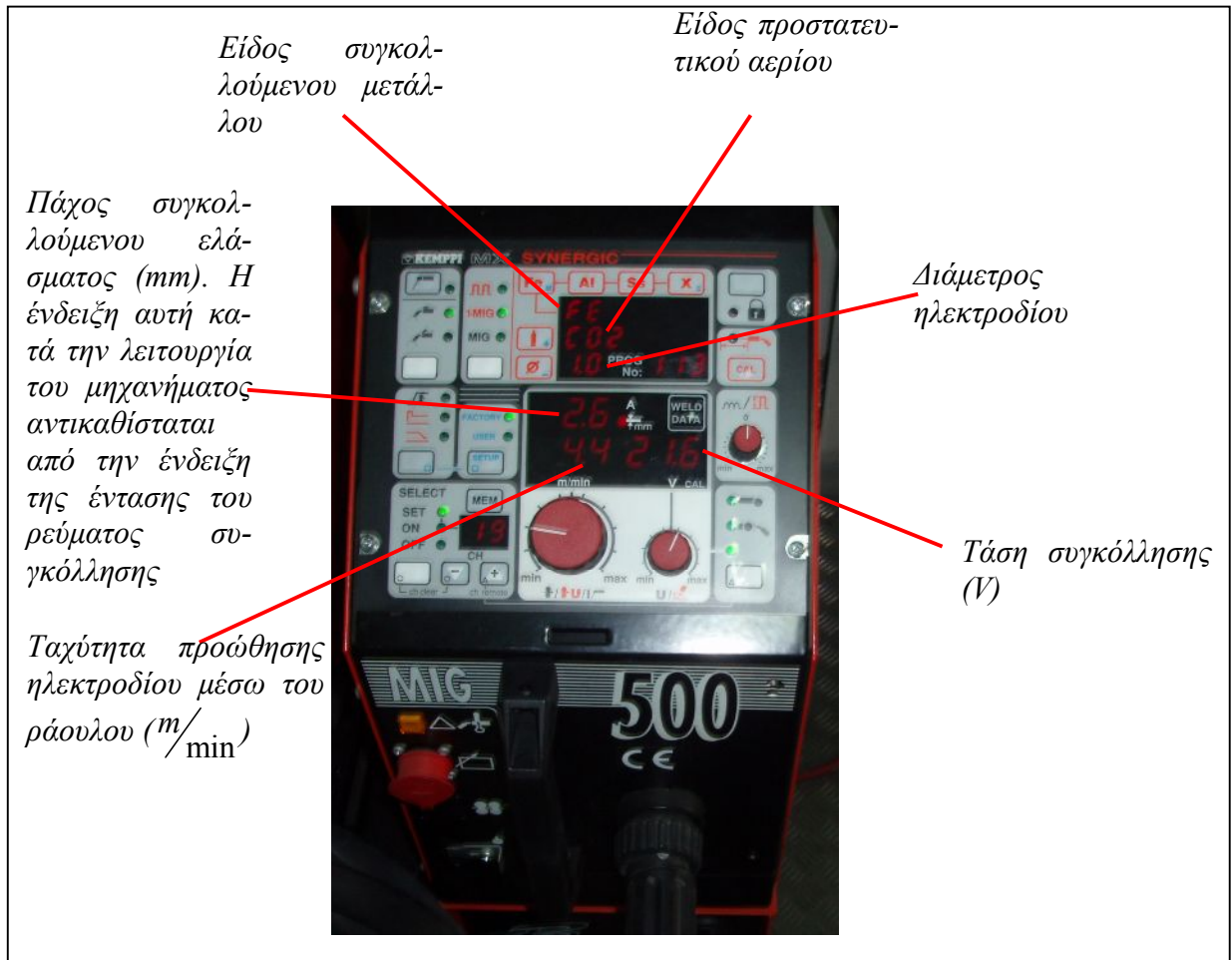
Πέρα λοιπόν από το έλασμα που αχρηστεύθηκε λόγω της μη συγκράτησης συγκολλήθηκαν άλλα τέσσερα ελάσματα, δύο με την μέθοδο MIG και δύο με την μέθοδο της χειροκίνητης συγκόλλησης. Τελικά επιλέχθηκε ένα από αυτά που συγκολλήθηκαν με MIG καθώς έδωσε την κατά την γνώμη μας καλύτερη ραφή. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να πούμε πως στην χειροκίνητη μέθοδο αντιμετωπίσαμε κάποια προβλήματα σε σχέση με την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κόλλησης (τάση, ένταση ρεύματος) με αποτέλεσμα είτε το λουτρό του μετάλλου να «καίγεται» είτε να έχουμε έντονο πιτσίλισμα στην επιφάνεια των ελασμάτων. Το τεμάχιο που τελικά επιλέχθηκε για την μέτρηση μετά από οπτική επιθεώρηση είχαν μία αρκετά καλή συγκόλληση (απουσία στρεβλώσεων) καθώς επίσης και μία σχετικά «καθαρή» επιφάνεια επάνω στην οποία επρόκειτο να κολληθούν τα επιμηκυνσιόμετρα για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων. Τα ελάσματα που επιλέχθηκαν τελικά φαίνονται στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 4.10: Τα τεμάχια που επελέγησαν τελικά για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων

Κατά την συγκόλληση των ελασμάτων με την μέθοδο MIG έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε κάποιες από τις παραμέτρους της συγκόλλησης μέσω του χειρισμού του μηχανήματος που πραγματοποιεί την κόλληση. Οι δύο βασικές παράμετροι που μπορούμε να καθορίσουμε είναι η τάση συγκόλλησης και η ταχύτητα προώθησης του ηλεκτροδίου μέσω του ράουλου της μηχανής. Καθορίζοντας αυτές τις δύο παραμέτρους η μηχανή μας παρέχει κάποια επιπλέον στοιχεία τα οποία βέβαια είναι άμεση συνάρτηση των τιμών που εμείς δώσαμε για τα παραπάνω μεγέθη. Τα στοιχεία αυτά είναι το πάχος του ελάσματος (σε mm) που μπορεί να συγκολληθεί με τις τιμές που δώσαμε καθώς και η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης. Τα μεγέθη της τάσης και της έντασης του ρεύματος της συγκόλλησης είναι πολύ σημαντικά για εμάς καθώς θα τα χρησιμοποιήσουμε στην συνέχεια κατά την μοντελοποίηση του φαινομένου για τον υπολογισμό της θερμότητας που προσδίδεται στα τεμάχια λόγω της συγκόλλησης. Να σημειώσουμε εδώ πως η τιμή του πάχους ελάσματος που δίνει η μηχανή είναι ενδεικτική (δηλαδή ποιο είναι το ενδεικτικό πάχος ελάσματος που μπορούμε να συγκολλήσουμε βάσει των τιμών τάσης και έντασης ρεύματος που έχουμε επιλέξει την δεδομένη στιγμή) και δεν συμπίπτει απαραίτητα με το πάχος του ελάσματος που

εμείς συγκολλούμε. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η οθόνη του μηχανήματος συγκόλλησης MIG και σημειώνονται οι πιο σημαντικές ενδείξεις.



Εικόνα 4.11: Η οθόνη του μηχανήματος συγκόλλησης MIG με τις πιο χαρακτηριστικές ενδείξεις

4.3 Μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο διάνοιξης οπής (hole – drilling)

Αυτό το κομμάτι της πειραματικής διαδικασίας ήταν και το πιο επίπονο και χρονοβόρο καθώς αποτελεί την «καρδιά» της όλης διαδικασίας. Στόχος είναι η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων που δημιουργήθηκαν στα τεμάχια που τελικά επιλέξαμε λόγω της συγκόλλησης που προηγήθηκε, μέσω της μεθόδου διάνοιξης οπής και της συνεπαγόμενης χαλάρωσης των τάσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα έξι βασικά βήματα που περιλαμβάνει η μέθοδος και θα αναλυθούν στη συνέχεια και τα οποία πρέπει να ακολουθηθούν ευλαβικά έτσι ώστε να λάβουμε τελικά αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα βήματα αυτά είναι:

- Προετοιμασία της επιφάνειας
- Κόλληση της ροζέτας.
- Σύνδεση της ροζέτας με τα όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων.
- Τοποθέτηση της διάταξης διάτρησης.
- Καταγραφή των αποτελεσμάτων

4.3.1 Προετοιμασία της επιφάνειας

Η προετοιμασία της επιφάνειας είναι ένα θεμελιώδες βήμα της όλης διαδικασίας το οποίο θα μας βοηθήσει να δημιουργήσουμε μία σταθερή σύνδεση ανάμεσα στα επιμηκυνσιόμετρα και την επιφάνεια έτσι ώστε να έχουμε ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε πως στο στάδιο αυτό θα λάβει χώρα ένας επιμελής καθαρισμός της επιφάνειας στην οποία θα κολληθούν οι ροζέτες. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της προετοιμασίας επιφάνειας είναι να αναπτυχθεί μία χημικά καθαρή επιφάνεια η οποία να έχει μία τραχύτητα κατάλληλη για τις απαιτήσεις της εγκατάστασης των ροζετών, μία αλκαλικότητα επιφάνειας που θα αντιστοιχεί σε ένα pH κοντά στο 7 και να δημιουργηθούν ευδιάκριτες γραμμές σχεδιαγράμματος για τον προσανατολισμό των ροζετών. Για να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν τα προϊόντα και να ακολουθηθούν οι διαδικασίες που συστήνει ο κατασκευαστής των επιμηκυνσιομέτρων. Για αυτό λοιπόν χρησιμοποιήσαμε τα υλικά καθαρισμού επιφανειών της εταιρίας VISHAY, κατασκευαστή των ροζετών και ακολουθήσαμε τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Διάλυση των λιπαρών επικαλύψεων

Η διάλυση των λιπαρών επικαλύψεων πραγματοποιείται για να αφαιρεθούν τυχόν λάδια, λίπη ή άλλοι μολυσματικοί παράγοντες και χημικά υπολείμματα που μπορεί να υπάρχουν στην επιφάνεια. Πρέπει πάντα να είναι η πρώτη ενέργεια κατά την προετοιμασία μίας επιφάνειας έτσι ώστε να αποφευχθεί η μετακίνηση μολυσματικών στοιχείων στα επόμενα στάδια της προετοιμασίας (π.χ. λείανση).

Η διάλυση των λιπαρών επικαλύψεων πραγματοποιείται συνήθως με χρήση δοχείου ψεκάσμου (σπρέι) διότι ψεκάζοντας κατά μία μόνο κατεύθυνση, όλοι οι διαλυμένοι επιβλαβείς παράγοντες λόγω της ροής του διαλύτη δεν μπορούν να μεταφερθούν ξανά στην επιφάνεια που καθαρίζεται. Γενικά πρέπει να ψεκάζεται πάντα ολόκληρη η επιφάνεια. Σε εφαρμογές που αυτό δεν είναι δυνατό μπορούμε να περιορίσουμε σε μία περιοχή που να καλύπτει 10 ~ 15cm γύρω από κάθε πλευρά της ροζέτας που πρόκειται να κολληθεί έτσι ώστε να έχουμε μία επαρκώς μεγάλη καθαρή περιοχή στην διάθεσή μας.

Στην εφαρμογή μας χρησιμοποιήθηκε το πεπαισμένο δοχείο ψεκασμού διαλύτη που παρέχεται από την εταιρία κατασκευής των ροζετών «VISHAY» με ονομασία «CSM-2» το οποίο είναι ισχυρό και προκαλεί την άμεση αφαίρεση των λιπαρών επικαλύψεων. Όπως είπαμε ήδη το δοκίμιο ψεκάζεται προς μία κατεύθυνση για να παρασύρει τις επιβλαβείς ουσίες και εξατμίζεται σχεδόν αμέσως. Μετά την εφαρμογή το δοκίμιο σκουπίζεται με καθαρό σφουγγαράκι γάζας με κατεύθυνση ίδια με αυτή του ψεκασμού. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί έως ότου το δοκίμιο θεωρηθεί αρκετά «καθαρό».



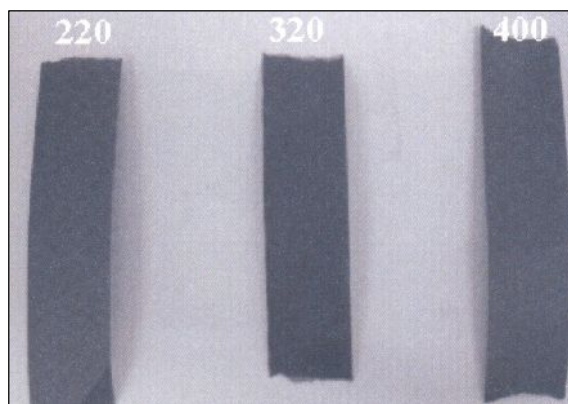
Εικόνες 4.12 & 4.13: Ο διαλύτης που χρησιμοποιείται ενάντια στις επικαλύψεις και η εφαρμογή του επάνω στο τεμάχιο

Βήμα 2^ο: Λείανση της επιφάνειας

Το επόμενο στάδιο της προετοιμασίας της επιφάνειας περιλαμβάνει την λείανσή της με σκοπό την απομάκρυνση εξογκωμάτων, σκουριάς, οξειδίων και άλλων επιστρωμάτων (γαλβανίσματα) και τελικά την διαμόρφωση μίας επιφάνειας κατάλληλης για την κόλληση της ροζέτας. Ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια, η λείανση μπορεί να γίνει ξεκινώντας με σμυριδοτροχό ή/και λίμα (χονδροειδείς επιφάνειες) και να τελειώσει με ειδικό σμυριδόχαρτο (φινίρισμα).

Το βέλτιστο φινίρισμα της επιφάνειας για τέτοιου είδους εφαρμογές (κόλληση ροζέτας – ανάλυση τάσεων) έγκειται σε μία λεία επιφάνεια της τάξης των $2.5\mu\text{m}$ με το πλεονέκτημα το ευκολότερου και διεξοδικότερου καθαρισμού. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκαν τρία σμυριδόχαρτα που παρέχει η εταιρία «VISHAY» κλιμα-

κούμενης τραχύτητας τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν εν σειρά με πρώτο αυτό που δίνει την μεγαλύτερη τραχύτητα. Πιο συγκεκριμένα τα σμυριδόχαρτα αυτά ήταν (με τη σειρά χρήσης) το SCP-3 με τραχύτητα 400, το SCP-2 με τραχύτητα 320 και το SCP-1 με τραχύτητα 220.

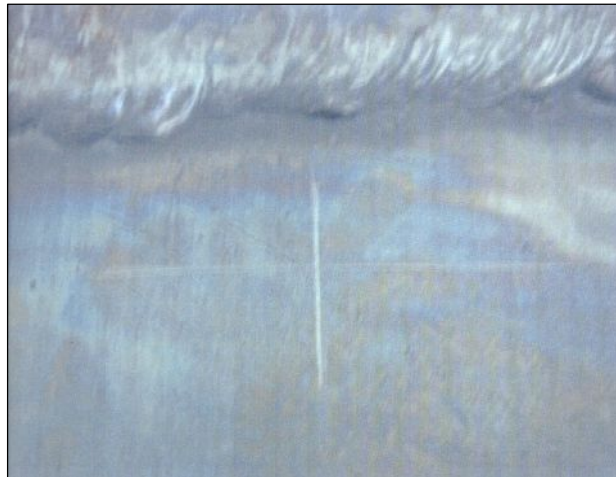


Εικόνες 4.14 & 4.15: Σμυριδόχαρτα κλιμακούμενης τραχύτητας για την λείανση της επιφάνειας και η εφαρμογή τους στο τεμάχιο

Βήμα 3^ο: Δημιουργία γραμμών καθοδήγησης για την τοποθέτηση των ροζετών

Για τον σωστό προσανατολισμό της ροζέτας πάνω στην επιφάνεια στην οποία θα κολληθεί, η επιφάνεια σημαδεύεται με γραμμές στο σημείο όπου θα γίνει η μέτρηση των παραμορφώσεων. Οι γραμμές αυτές χαράσσονται κάθετα η μία ως προς την άλλη (σε σχήμα σταυρού) και προσανατολισμένες στις βασικές κατευθύνσεις μέτρησης των παραμορφώσεων (εγκάρσια και διαμήκης ως προς τα ελάσματα). Στην συνέχεια η ροζέτα τοποθετείται έτσι ώστε τα δύο από τα τρία πλέγματά της που είναι κάθετα μεταξύ τους να ευθυγραμμιστούν με τις γραμμές που σχεδιάστηκαν.

Οι γραμμές αναφοράς συνίσταται να γίνονται με εργαλείο που απλά να γυαλίζει και όχι να χαράσσει την επιφάνεια γεγονός που μπορεί να προκαλέσει τοπική συγκέντρωση τάσεων και άρα αλλοίωση των αποτελεσμάτων και δυσλειτουργία των επιμηκυνσιομέτρων.

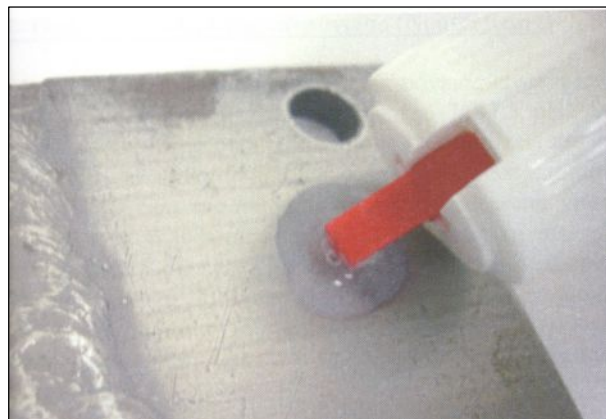


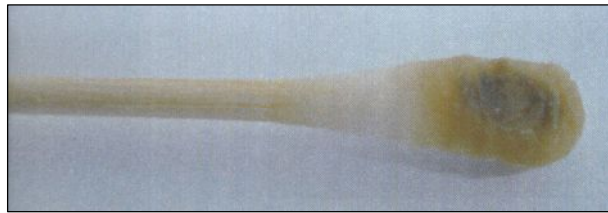
Εικόνα 4.16: Οι γραμμές καθοδήγησης (προσανατολισμού) για την τοποθέτηση της ροζέτας)

Βήμα 4^ο: «Βελτίωση» της επιφάνειας

Μετά την χάραξη της επιφάνειας ακολουθεί περαιτέρω καθαρισμός με την εφαρμογή βελτιωτικού (conditioner) το οποίο απλώνεται στην επιφάνεια έτσι ώστε αυτή να διατηρείται πάντοτε βρεγμένη (τα υλικά καθαρισμού δεν πρέπει να αφήνονται να στεγνώνουν πάνω στην επιφάνεια) και να σκουπίζεται με την βοήθεια καθαρής μπατονέτας έως ότου αυτή παύσει να αλλάζει χρώμα. Με το πέρας της διαδικασίας αυτής η καθαρή επιφάνεια θα πρέπει να σκουπιστεί με γάζα πάντα με εφαρμογή προς μία μόνο κατεύθυνση έτσι ώστε η καθαρή επιφάνεια να μην επαναμολυνθεί.

Στην περίπτωση μας το βελτιωτικό υγρό που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό που παρέχει η εταιρία κατασκευής των ροζετών «VISHAY», το οποίο αποτελείται από χημική ένωση φωσφορικού οξέως.

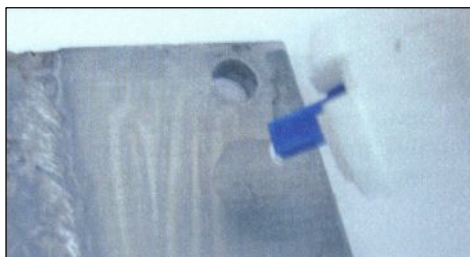




Εικόνες 4.17 έως και 4.21: Το ειδικό χημικό υγρό για την βελτίωση της επιφάνειας και η διαδικασία εφαρμογής του

Βήμα 5^ο: «Ουδετεροποίηση» της επιφάνειας

Το τελικό στάδιο προετοιμασίας της επιφάνειας περιλαμβάνει την επαναφορά της στον βέλτιστο βαθμό αλκαλικότητας, της τάξης του $7.0 - 7.5 pH$. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ειδικό υγρό ουδετεροποίησης (neutralizer) το οποίο ρίχνεται πάνω στην επιφάνεια διατηρώντας την πάντα βρεγμένη και στην συνέχεια σκουπίζεται με μπατονέτες. Όταν πια η επιφάνεια έχει γίνει ουδέτερη, θα πρέπει να στεγνώνεται με σφουγγαράκι γάζας το οποίο περνιέται προς μία μόνο κατεύθυνση σε κάθε εφαρμογή. Το βελτιωτικό υγρό που χρησιμοποιήσαμε παρέχεται από την εταιρία κατασκευής των ροζετών «VISHAY» και είναι το «Neutralizer 5A».



Εικόνες 4.22 έως και 4.25: Το ειδικό χημικό υγρό για την ουδετεροποίηση της επιφάνειας και η διαδικασία εφαρμογής του

4.3.2 Κόλληση της ροζέτας

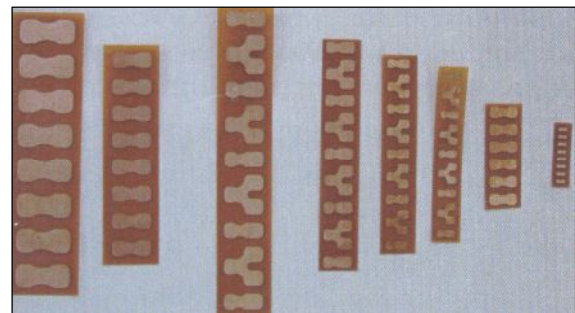
Μετά την εφαρμογή με μεγάλη επιμέλεια όλης της παραπάνω διαδικασίας, η επιφάνεια των ελασμάτων είναι κατάλληλα προετοιμασμένη για την κόλληση των επιμηκυνσιομέτρων. Αξίζει να επισημανθεί πως οι ροζέτες πρέπει να κολληθούν το συντομότερο δυνατό μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας για τον προφανή λόγο της αποφυγής επαναμόλυνσης. Μαζί με τις ροζέτες θα κολληθούν και οι κατάλληλοι (χάλκινοι) ακροδέκτες οι οποίοι θα χρησιμεύσουν στην σύνδεση των ακροδεκτών της ροζέτας με τα καλώδια του οργάνου μέτρησης των παραμορφώσεων. Για την επιτυχημένη κόλληση των ροζετών ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Η ροζέτα πιάνεται πολύ προσεκτικά με ειδική λαβίδα η ύπαρξη της οποίας είναι απαραίτητη για να πιάνονται οι ροζέτες χωρίς να έρχονται σε επαφή με τα χέρια. Παραμικρή επαφή με τα χέρια μπορεί να επηρεάσει άμεσα την ποιότητα της κόλλησης και άρα και των αποτελεσμάτων. Επίσης η λαβίδα πρέπει να ακουμπάει στο άκρο της ροζέτας και όχι πάνω στο πλέγμα των επιμηκυνσιομέτρων ενώ πρέπει επίσης να δοθεί μεγάλη προσοχή στο να μην λυγίσει η ροζέτα από πιθανούς λανθασμένους χειρισμούς.



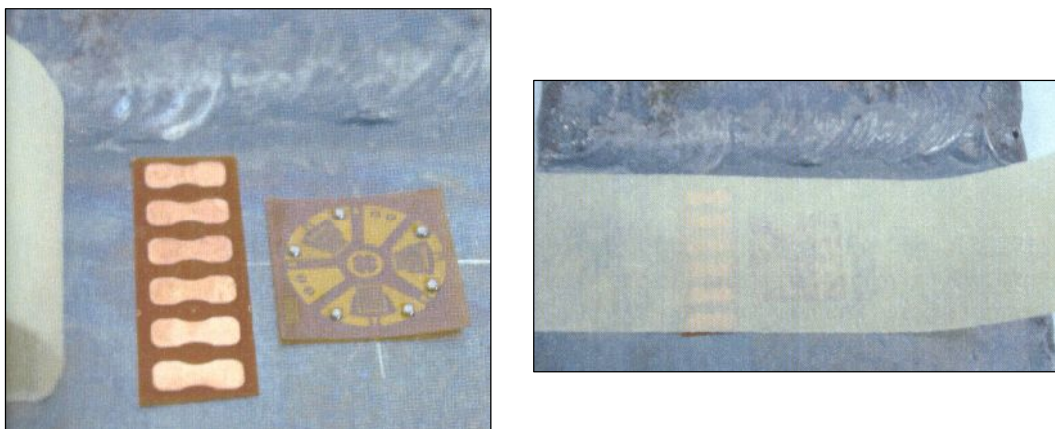
Εικόνα 4.26: Προσεκτικός χειρισμός της ροζέτας με λαβίδα

Βήμα 2^ο: Η ροζέτα τοποθετείται πάνω στις γραμμές αναφοράς που σχεδιάστηκαν στο δοκίμιο και ευθυγραμμίζεται με αυτές. Το κέντρο της ροζέτας πρέπει να συμπίπτει με το κέντρο του σταυρού που σχεδιάστηκε και τα δύο κάθετα πλέγματα της ροζέτας να ακουμπάνε στις κάθετες γραμμές του σταυρού. Από τα δύο κάθετα πλέγματα της ροζέτας, το ένα τοποθετείται παράλληλα με την ραφή της συγκόλλησης και το άλλο κάθετα έτσι ώστε στην συνέχεια να γίνει μελέτη διαμήκων και εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων αντίστοιχα. Σε πολύ μικρή απόσταση από την ροζέτα τοποθετείται μία σειρά από 6 ακροδέκτες (2 για κάθε πλέγμα επιμηκυνσιομέτρου) χωρίς όμως να έρχονται σε επαφή με αυτή.



Εικόνα 4.27: Ο προσανατολισμός της ροζέτας επάνω στον σταυρό και οι διάφοροι τύποι χάλκινων ακροδεκτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν

Βήμα 3^ο: Πάνω από την ροζέτα και τους ακροδέκτες τοποθετείται ειδική κολλητική ταινία (χαρτοταινία) η οποία πρέπει να ακουμπάει και στην επιφάνεια. Για το βήμα αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να αποφευχθεί επαφή της ροζέτας ή της επιφάνειας με τα χέρια και σκοπός του είναι να διατηρηθούν η ροζέτα και οι ακροδέκτες στην θέση που τοποθετήθηκαν και να μην μετακινηθούν πριν την κόλλησή τους.



Εικόνα 4.28: Τοποθέτηση χαρτοταινίας πάνω από την ροζέτα και του ακροδέκτες

Βήμα 4^ο: Με την βοήθεια της λαβίδας ή με προσεκτική χρήση των χεριών η χαρτοταινία αφαιρείται (ανασηκώνεται η μία της άκρη) έως ότου αποκαλυφθούν οι ροζέτα και ακροδέκτες τα οποία θα πρέπει να είναι κολλημένα πάνω στην χαρτοταινία.



Εικόνα 4.29: Ανασήκωμα του ενός άκρου της χαρτοταινίας

Βήμα 5^ο: Στο κέντρο των γραμμών αναφοράς (σταυρός) τοποθετείται μία σταγόνα κόλλας. Να σημειωθεί εδώ πως δεν χρησιμοποιήθηκε η κόλλα που παρέχει η εταιρία κατασκευής των επιμηκυνσιομέτρων καθώς είχε στερεοποιηθεί πλήρως αλλά απλή κόλλα στιγμής (logo). Σκοπός είναι να δημιουργηθεί στην επιφάνεια ένα λεπτό και ομοιόμορφο φιλμ κόλλας έτσι ώστε το σώμα της ροζέτας να κάνει ολοκληρωτική και απόλυτη επαφή με την επιφάνεια.



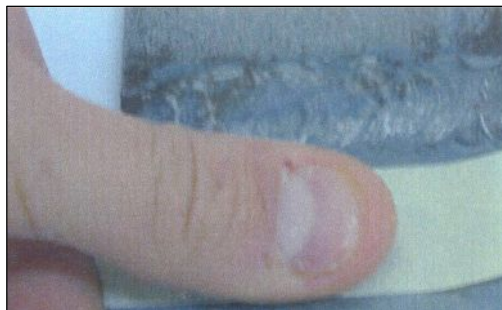
Εικόνα 4.30: Τοποθέτηση σταγόνας κόλλας στο κέντρο του σταυρού

Βήμα 6^ο: Στην συνέχεια η κόλλα απλώνεται καλά με ένα ειδικό αντικολλητικό νάιλον. Η κόλλα πρέπει να απλωθεί σε όλη την επιφάνεια στην οποία θα κολληθεί η ροζέτα και οι χάλκινοι ακροδέκτες.



Εικόνα 4.31: Απλώμα της κόλλας με την βοήθεια αντικολητικού νάιλον

Βήμα 7^ο: Η ροζέτα και οι ακροδέκτες είναι έτοιμα για την κόλληση. Η ταινία κατεβαίνει με προσοχή προς την επιφάνεια μέχρι οι ροζέτα και οι ακροδέκτες να ακουμπήσουν σε αυτή. Τότε ασκείται πίεση για περίπου δύο λεπτά και κατόπιν η ταινία αφήνεται πάνω στη επιφάνεια για τουλάχιστον πέντε λεπτά έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή σύνδεση της ροζέτας με την επιφάνεια. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού η ταινία μπορεί να αφαιρεθεί πάντα με πολύ αργές και προσεκτικές κινήσεις και σε καμία περίπτωση με απότομο τράβηγμα.



Εικόνα 4.32: Κατέβασμα της χαρτοταινίας και άσκηση πίεση για την επιτυχή κόλληση ροζέτας και ακροδεκτών

4.3.3 Σύνδεση της ροζέτας με τα όργανα μέτρησης παραμορφώσεων

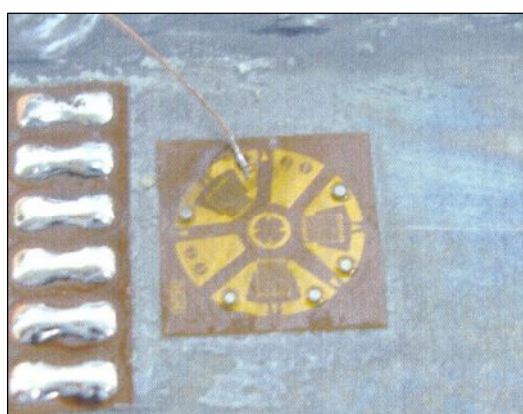
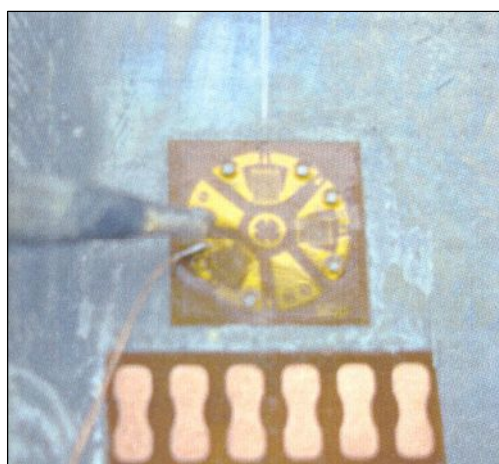
Για να ολοκληρωθεί η σύνδεση της ροζέτας με τα όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων απαιτούνται δύο επιπλέον στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά στην σύνδεση της ροζέτας με τους χάλκινους ακροδέκτες οι οποίοι τοποθετήθηκαν ταυτόχρονα με την κόλληση των ροζετών. Το δεύτερο αφορά στην σύνδεση των χάλκινων ακροδεκτών διαμέσου καλωδίων με το όργανο μέτρησης των παραμορφώσεων. Τα δύο αυτά στάδια παρουσιάζονται στην συνέχεια.

- Σύνδεση της ροζέτας με τους χάλκινους ακροδέκτες:

Η ροζέτα συνδέεται με τους χάλκινους ακροδέκτες μέσω ειδικού, πολύ λεπτού μονωμένου σύρματος. Το σύρμα αυτό είναι κατασκευασμένο από χαλκό και έχει μία

ειδική επικάλυψη από πολυουρεθάνη για να είναι μονωμένο εξωτερικά έτσι ώστε να αποφεύγεται η άμεση επαφή του χαλκού με κάποιο άλλο υλικό (αποφυγή βραχυκυκλώματος – λανθασμένων μετρήσεων). Το σύρμα αυτό διατίθεται σε μορφή καρουλιού των 150m. Έχει διάμετρο 0.16mm και μπορεί να αντέξει θερμοκρασίες από -75 °C έως +150 °C. Η επικάλυψη που διαθέτει μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί στο σημείο όπου θα γίνει η κόλληση, με χρήση της θερμότητας του αυτοθερμαινόμενου εργαλείου κόλλησης (κολλητήρι) που θα χρησιμοποιηθεί. Η διαδικασία της σύνδεσης συνίσταται στα παρακάτω βήματα:

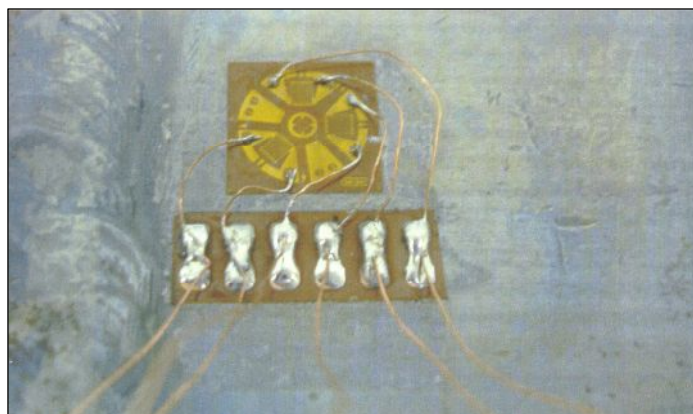
Βήμα 1^ο: Κόβονται έξι κομμάτια χάλκινου σύρματος (ένα για κάθε ακροδέκτη επιμηκυσιομέτρου, συνολικά έξι ακροδέκτες, δύο για καθένα από τα τρία πλέγματα επιμηκυσιομέτρων) μήκους περίπου 5cm. Στην συνέχεια κάθε συρματάκι συνδέεται με την βοήθεια τοπικής θέρμανσης με έναν ακροδέκτη της ροζέτας. Απαιτούνται γρήγορες, ακριβείς και προσεκτικές κινήσεις καθώς και πολύ προσοχή για να αποφευχθεί τυχόν υπερθέρμανση που θα καταστρέψει τα πλέγματα της ροζέτας.



Εικόνες 4.33 & 4.34: Η σύνδεση ενός σύρματος με τους ακροδέκτες της ροζέτας

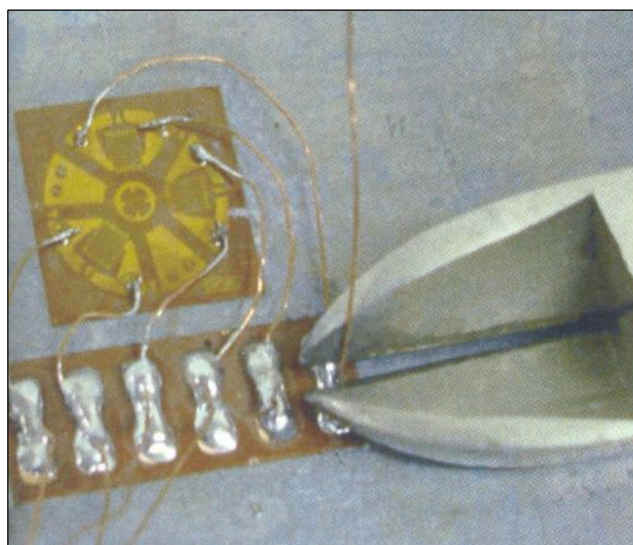
Βήμα 2^ο: Τα χάλκινα σύρματα, μετά την σύνδεσή τους με την ροζέτα, πρέπει να συνδεθούν και με τους χάλκινους ακροδέκτες. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ίδιο τρόπο που συνδέθηκαν τα σύρματα με την ροζέτα. Να επισημάνουμε πως τα

σύρματα από την ροζέτα ως τους ακροδέκτες δεν πρέπει να είναι τεντωμένα, αλλά να σχηματίζουν μία μικρή καμπύλη.



Εικόνα 4.35: Η ολοκληρωμένη σύνδεση της ροζέτας με τους χάλκινους ακροδέκτες

Βήμα 3^ο: Στην συνέχεια το μήκος του σύρματος που περισσεύει, μετά την κόλληση, αφαιρείται χρησιμοποιώντας ειδικό κόφτη καλωδίου.

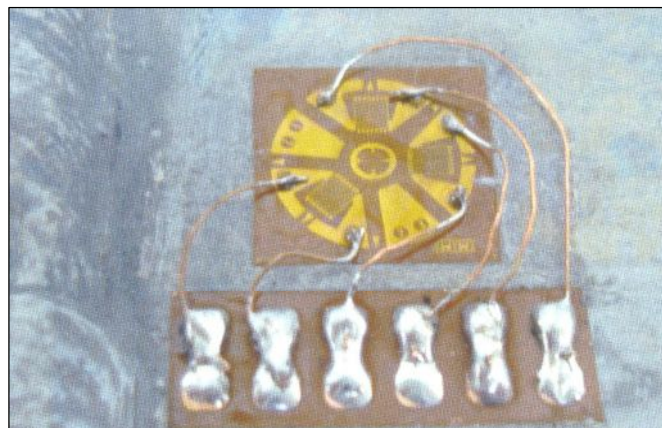


Εικόνα 4.36: Κοπή του σύρματος με κόφτη

Βήμα 4^ο: Στο τελευταίο βήμα του πρώτου σταδίου πραγματοποιείται καθαρισμός των υπολειμμάτων του υλικού που τήκεται με την θερμότητα και συνδέει τα σύρματα με τους ακροδέκτες στις ροζέτας. Τα υπολείμματα αυτά σε μία τόσο λεπτομερή εργασία όπως είναι η μέτρηση παραμενουσών τάσεων πρέπει να αφαιρούνται για να μην επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα ειδικό χημικό διαλυτικό υγρό που παρέχεται από την κατασκευάστρια εταιρία των ροζετών. Με ειδικό πινελάκι που διατίθεται, το υγρό αυτό απλώνεται σε όλη την επιφάνεια της ροζέτας και των χάλκινων ακροδεκτών στην οποία πραγματοποιήθηκαν κολλήσεις.



Εικόνες 4.37 & 4.38: Διαλυτικό καταλοίπων κόλλησης και η εφαρμογή του στις κολλήσεις

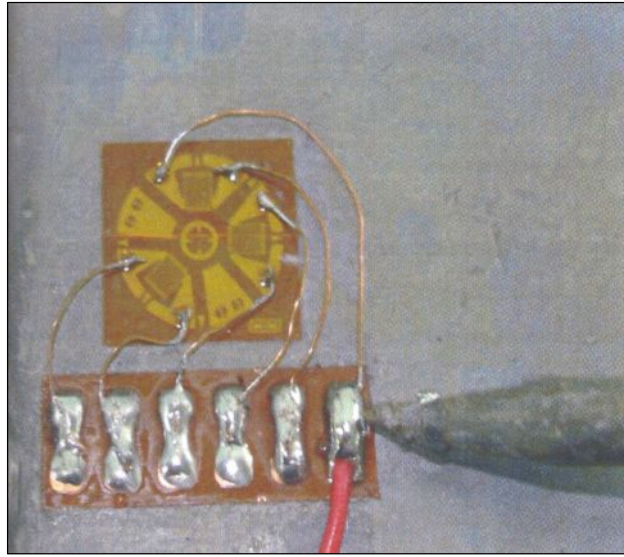


Εικόνα 4.39: Η εικόνα της ολοκληρωμένα συνδεδεμένης ροζέτας

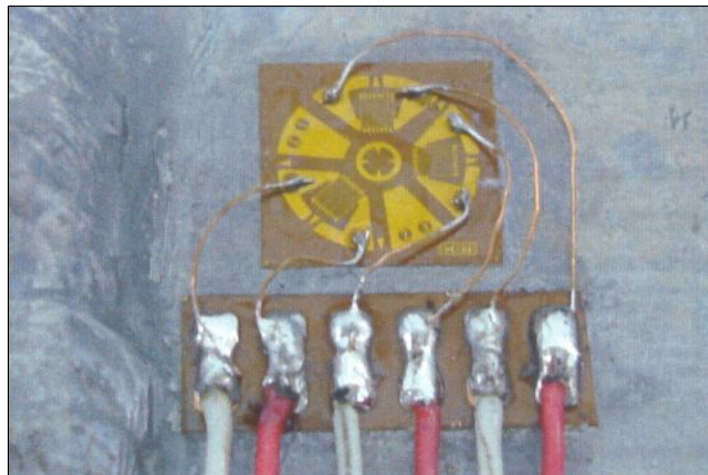
- Σύνδεση των χάλκινων ακροδεκτών με τα όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων:

Στην συνέχεια, οι χάλκινοι ακροδέκτες πρέπει να συνδεθούν με τα όργανα μέτρησης των παραμορφώσεων. Για τον σκοπό αυτό κάθε όργανο διαθέτει ένα ζεύγος καλωδίων το οποίο θα συνδεθεί με μία ροζέτα μέσω των χάλκινων ακροδεκτών. Η διαδικασία της σύνδεσης συνίσταται στα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Με ιδιαίτερη προσοχή και με την χρήση τοπικής θέρμανσης το κάθε καλώδιο των συσκευών συνδέεται με τον (σωστό κάθε φορά) ακροδέκτη που αντιστοιχεί σε κάθε πλέγμα της ροζέτας.

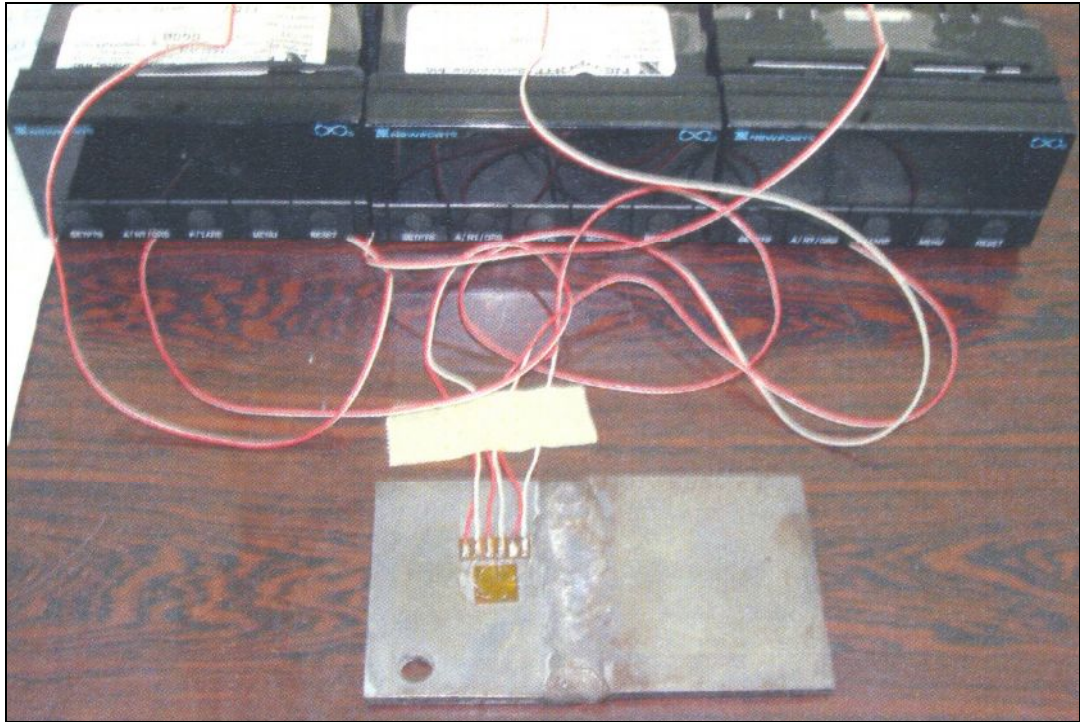


Εικόνα 4.40: Κόλληση των καλωδίων του μετρητικού οργάνου με τους χάλκινους ακροδέκτες



Εικόνα 4.41: Η τελική σύνδεση των καλωδίων

Βήμα 2^ο: Λόγω της κόλλησης των καλωδίων δημιουργήθηκαν επικαλύψεις λόγω του τηγμένου υλικού όπως και προηγουμένως. Η αφαίρεση των επικαλύψεων γίνεται με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο 4^ο βήμα του προηγούμενου σταδίου.



Εικόνα 4.42: Η τελική σύνδεση ροζέτας – μετρητικού οργάνου μέσω των καλωδίων, του χάλκινου σύρματος και των ακροδεκτών



Εικόνα 4.43: Η τελική εικόνα του συγκολλημένου τεμαχίου με όλες τις ροζέτες κολλημένες σε αυτό (η φωτογραφία έχει ληφθεί μετά την διάτρηση)

4.3.4 Τοποθέτηση της διάταξης διάτρησης

Μετά την σύνδεση της ροζέτας, το επόμενο στάδιο είναι η σωστή τοποθέτηση της διάταξης με την οποία θα πραγματοποιηθεί η διάνοιξη της οπής. Η διάταξη είναι ένα μεγάλης ακρίβειας μέσο διάνοιξης οπής, το εργαλείο «RS – 200» της εταιρίας

κατασκευής των ροζετών «VISHAY». Εμείς εδώ δεν αναφερθούμε αναλυτικά στην διάταξη διάτρησης παρά μόνο στην διαδικασία του στησίματός της, η οποία είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία του πειράματος καθώς επίσης και σε κάποιες προσωπικές παρατηρήσεις που προέκυψαν από την χρήση του. Για περισσότερες πληροφορίες (αποτελούμενα μέρη, τρόποι συναρμολόγησης) ο ενδιαφερόμενος παραπέμπεται στη βιβλιογραφία.

Το στήσιμο της διάταξης διάτρησης

Η τοποθέτηση της διάταξης διάτρησης παρόλο που φαινομενικά είναι μία απλή διαδικασία, στην πραγματικότητα απαιτεί πολύ προσοχή, επιμονή καθώς και κάποια εφευρετικότητα. Όπως έδειξε η πράξη, το πιο σημαντικό κομμάτι της όλης διαδικασίας είναι η εξασφάλιση της σταθερότητας στον χώρο των ελασμάτων καθώς και η όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή μεταξύ των ελασμάτων και της βάσης του διατρητικού εργαλείου. Αυτό διότι η παραμικρή σχετική κίνηση ελασμάτων και εργαλείου μετά την τοποθέτηση της διάταξης θα μετατοπίσει το εργαλείο ως προς την ροζέτα με αποτέλεσμα η οπή να πραγματοποιηθεί σε λανθασμένη περιοχή της ροζέτας, πράγμα καταστροφικό τόσο για αυτή όσο και για τις μετρήσεις.

Σταθεροποίηση των ελασμάτων

Λόγω της συγκόλλησης και πιο συγκεκριμένα των «τσιμπημάτων» που έγιναν για την συγκράτηση των ελασμάτων, τα ελάσματα δεν έρχονταν σε πλήρη επαφή με την επιφάνεια του τραπέζιου στο οποίο θα τοποθετούνταν η όλη διάταξη με αποτέλεσμα να παρατηρείται «παλαντζάρισμα» των ελασμάτων με τη άσκηση μικρής πίεσης σε συγκεκριμένα σημεία. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο τα ελάσματα συγκρατήθηκαν επάνω στο τραπέζι με την βοήθεια μέγγενης η υποχρέωσε τα ελάσματα σε πλήρη ακινησία ως προς το τραπέζι επάνω στο οποίο επρόκειτο να γίνει η διάτρηση.



Εικόνα 4.44: Σταθεροποίηση των ελασμάτων με χρήση μέγγενης

Σταθεροποίηση της βάσης

Αρχικά είναι πολύ σημαντικό να καθαριστούν τα πόδια της βάσης πριν αυτή έρθει σε επαφή με την επιφάνεια ή με το τεμάχιο. Ο καθαρισμός αυτός μπορεί να γίνει με ένα καλό καθαριστικό όπως ασετόν ή οινόπνευμα. Επειδή το άνοιγμα μεταξύ

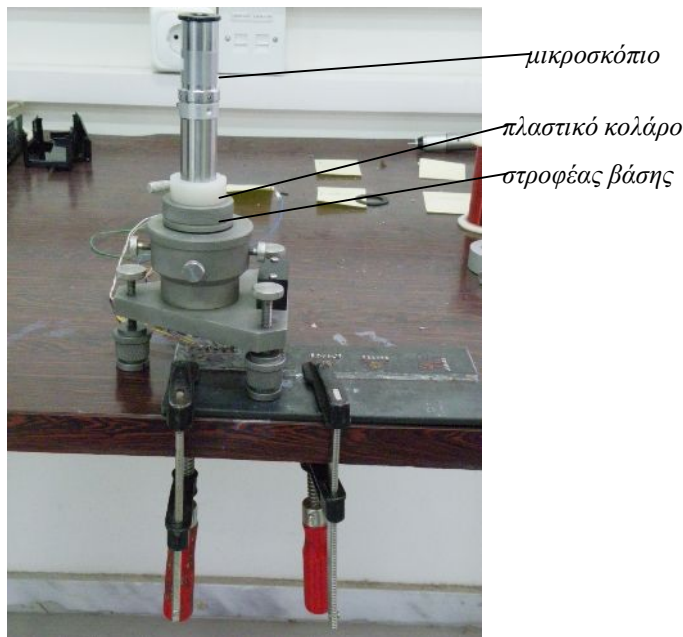
των ποδιών της βάσης είναι μικρότερο από το πάχος των ελασμάτων απαιτείται για κάθε ροζέτα κάποιος αυτοσχεδιασμός ως προς την τοποθέτηση της βάσης έτσι ώστε η ροζέτα να έρθει περίπου στο μέσο της οπής του στροφέα της βάσης. Γενικά αποτελεσματική ήταν η τοποθέτηση δύο ποδιών σε ελεύθερη περιοχή του ελάσματος και ενός στην επιφάνεια του τραπεζιού. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση των κοχλιών ρύθμισης του ύψους που διαθέτει το κάθε πόδι. Μόλις η βάση βρίσκεται στην σωστή θέση ως προς το ύψος σταθεροποιείται χρησιμοποιώντας τα περικόχλια ασφάλισης που επίσης διαθέτει το κάθε πόδι. Επίσης για την εξασφάλιση της ακινησίας της βάσης τόσο ως προς τα ελάσματα όσο και ως προς το τραπέζι τοποθετήθηκε κάτω από το κάθε πόδι κολλητική ταινία διπλής όψεως η οποία σε συνδυασμό με τις μέγγενες έκανε το όλο σύστημα (τραπέζι – ελάσματα – βάση εργαλείου) απόλυτα σταθερό.



Εικόνα 4.45: Βάση εργαλείου διάτρησης

Προσαρμογή και ρύθμιση του μικροσκοπίου

Το μικροσκόπιο αφαιρείται από την συσκευασία του και στο περίβλημά του προσαρμόζεται το πλαστικό κολάρο. Σε αυτή τη φάση το κολάρο δεν σφίγγεται με τον κοχλία που διαθέτει. Με ένα απαλό, καθαρό πανί καθαρίζεται το εξωτερικό μέρος του μικροσκοπίου και στην συνέχεια εισάγεται στην κεντρική οπή του στροφέα της βάσης. Κατόπιν τοποθετείται η διάταξη του φωτισμού μέσα στην ειδική οπή και ενεργοποιείται ο φωτισμός. Να σημειώσουμε εδώ πως ο φωτισμός που έδινε η διάταξη κρίθηκε ανεπαρκής και έτσι χρησιμοποιήθηκε τελικά εξωτερική πηγή φωτισμού, φακός τύπου *LED*. Το μικροσκόπιο μετακινείται πάνω κάτω εντός του στροφέα της βάσης (για τον λόγο αυτό δεν βιδώθηκε ο κοχλίας στερέωσης του πλαστικού κολάρου) έως ότου η ροζέτα είναι καθαρά ορατή. Προκειμένου να διατηρηθεί αυτή η θέση του μικροσκοπίου σταθερή και να ευθυγραμμιστούν ροζέτα και μικροσκόπιο, το πλαστικό κολάρο πρέπει να σφιχτεί πάνω στο μικροσκόπιο με τον κοχλία που διαθέτει.



Εικόνα 4.46: Εργαλείο διάτρησης – τεμάχιο – ροζέτα – και καλώδια σύνδεσης σε διάταξη έτοιμη για την πραγματοποίηση της διάτρησης.

Η ευθυγράμμιση ροζέτας – μικροσκοπίου είναι μία από τις δυσκολότερες φάσεις της όλης διαδικασίας. Η ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται με την βοήθεια του σταυρού που φαίνεται μέσα από το μικροσκόπιο και των σημείων του σταυρού της ροζέτας. Είναι προφανές πως για να έχουμε σωστή ευθυγράμμιση θα πρέπει τα σημεία των δύο αυτών σταυρών να συμπέσουν έτσι ώστε η οπή να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα στο κέντρο της ροζέτας. Η ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ρύθμιση των κοχλιών προσαρμογής θέσης που διαθέτει το σώμα της βάσης και τους οποίους χειριζόμαστε ως δύο ζεύγη κοχλιών τα οποία αποτελούνται από τους αντιδιαμετρικούς κοχλίες. Καθώς το κάθε ζεύγος περιστρέφεται (κάθε κοχλίας χωριστά), μέσα από το μικροσκόπιο παρατηρείται η πορεία του σταυρού του μικροσκοπίου. Όταν η μία γραμμή του σταυρού συμπέσει με τα σημεία της ροζέτας οι κοχλίες σφίγγονται ελαφρά και προχωράμε στον χειρισμό του άλλου ζεύγους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτύχουμε την κατά το δυνατόν καλύτερη ευθυγράμμιση των δύο σταυρών οπότε και σφίγγουμε καλά τους κοχλίες προσαρμογής και τον δακτύλιο κλειδώματος. Όπως γίνεται αντιληπτό πρόκειται για μία διαδικασία που απαιτεί πολύ λεπτούς χειρισμούς και η παραμικρή λανθασμένη κίνηση προκαλεί επανεκκίνηση της διαδικασίας. Για τον λόγο αυτό η ευθυγράμμιση έγινε με λίγο διαφορετικό και πιο απλοϊκό τρόπο. Οι τέσσερις κοχλίες ρύθμισης και ο δακτύλιος κλειδώματος σφίχτηκαν εξ' αρχής κρατώντας το μικροσκόπιο σε μία σταθερή θέση ως προς την βάση. Κατόπιν, παρακολουθώντας την πορεία του σταυρού μέσα από το μικροσκόπιο, μετακινήσαμε ολόκληρη την βάση έως ότου επιτευχτεί πλήρης σύμπτωση των δύο σταυρών. Ο τρόπος αυτός αποδείχθηκε πολύ πιο σύντομος και με πολύ καλά αποτελέσματα.

Εισαγωγή της υψηλόστροφης διάταξης τουρμπίνας αέρα

Σε πρώτη φάση εισάγεται η διάταξη των ελασμάτων στην ειδικά διαμορφωμένη θέση της βάσης και τα φύλλα των ελασμάτων περιστρέφονται έτσι ώστε να βρί-

σκονται μακριά από την κεντρική οπή του στροφέα της βάσης. Κατόπιν τοποθετείται ο προσαρμοστής που εμποδίζει την περιστροφή πάνω από τον δακτύλιο κλειδώματος.

Στην συνέχεια συνδέεται η σωλήνα παροχής της διάταξης της βαλβίδας σε μία φιλτραρισμένη παροχή πεπιεσμένου αέρα πίεσης 40psi ή 276kPa . Επίσης συνδέεται και η σωλήνα που φεύγει από την βαλβίδα με την διάταξη της τουρμπίνας αέρα.



Εικόνα 4.47: Ρύθμιση του αέρα σε πίεση 40psi



Η σωλήνα που παρέχει τον πεπιεσμένο αέρα

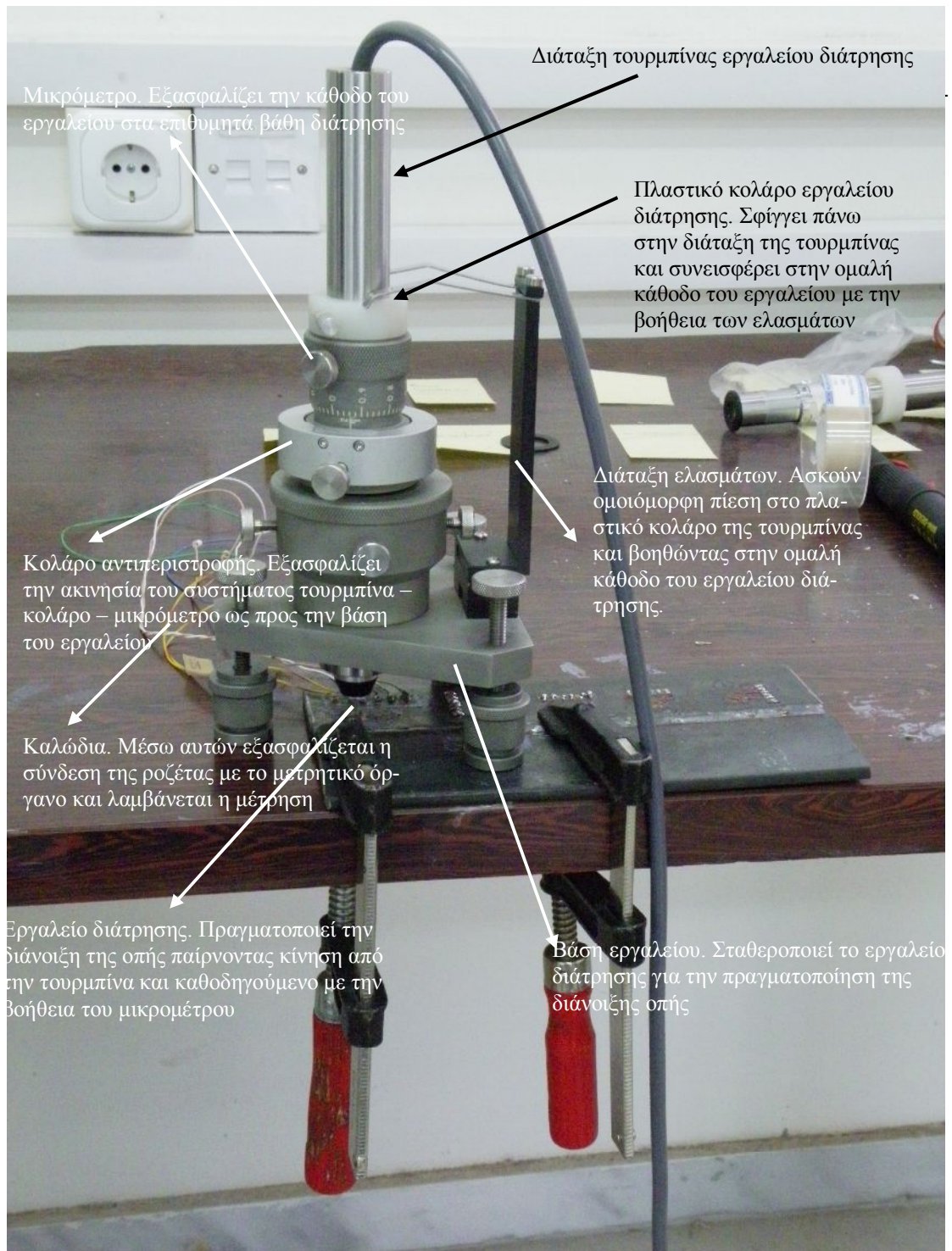
Η σωλήνα που οδηγεί τον πεπιεσμένο αέρα στο εργαλείο διάτρησης

Εικόνα 4.48: Η βαλβίδα για την διοχέτευση του πεπιεσμένου αέρα στην διάταξη της διάτρησης

Σε τρίτη φάση τοποθετείται το μικρόμετρο πάνω από τον προσαρμοστή αντί – περιστροφής και με πολύ προσοχή εισάγεται η διάταξη της τουρμπίνας αέρα στην κεντρική οπή του στροφέα. Το μικρόμετρο θα πρέπει να είναι μηδενισμένο και να έχει προβλεφθεί επίσης το πάχος της ροζέτας (περίπου 0.03mm) που θα πρέπει πρώτα να «φαγωθεί» προτού ξεκινήσει η διάτρηση του τεμαχίου. Η διάταξη ωθείται με αργές κινήσεις προς τα κάτω μέχρι το κοπτικό εργαλείο να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της μέτρησης.

Κατά την τελευταία φάση περιστρέφονται τα φύλα των ελασμάτων προς το πλαστικό κολάρο της διάταξης της τουρμπίνας και τοποθετούνται στις ειδικά διαμορφωμένες εγκοπές έτσι ώστε να πιέζουν το πλαστικό κολάρο. Κατόπιν, αφού μηδενιστεί η ένδειξη του μικρομέτρου, ασκείται μικρή πίεση στο πάνω μέρος της διάταξης

της τουρμπίνας και σφίγγονται οι κοχλίες του πλαστικού κολάρου και του προσαρμοστή αντί – περιστροφής.



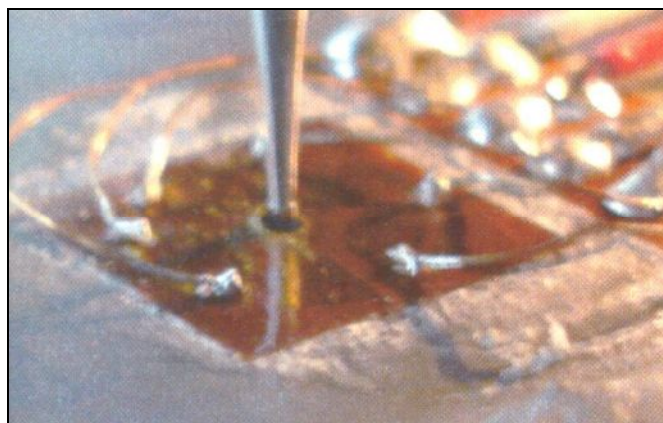
Εικόνα 4.49: Τραπέζι, ελάσματα & εργαλείο διάτρησης σε διάταξη για την διάνοιξη της οπής

Διάνοιξη της οπής

Πριν θέσουμε σε λειτουργία το διατρητικό εργαλείο μηδενίζουμε τις ενδείξεις των μετρητικών οργάνων παραμορφώσεων. Το πάνω μέρος του μικρομέτρου περιστρέφεται δεξιόστροφα για να ελευθερωθεί η επαφή μεταξύ διατρητικού εργαλείου και επιφάνειας μέτρησης (η δεξιόστροφη περιστροφή του μικρομέτρου ανυψώνει την διάταξη της τουρμπίνας). Στην συνέχεια πιέζεται η βαλβίδα παροχής και το διατρητικό εργαλείο αρχίζει να περιστρέφεται. Όταν περιστρέφεται ελεύθερα γυρίζει με εκατοντάδες χιλιάδες στροφές το λεπτό. Όμως είναι κατασκευή χαμηλής ροπής και σταματάει σχετικά εύκολα. Η διαδικασία στην συνέχεια συμπυκνώνεται στα ακόλουθα βήματα τα οποία πρέπει να ακολουθηθούν για κάθε οπή που θα ανοιχθεί:

- Περιστρέφεται το μικρόμετρο αριστερόστροφα για να κατέβει πιο χαμηλά το διατρητικό εργαλείο ώσπου να έρθει σε επαφή με το τεμάχιο στο οποίο γίνεται η μέτρηση.
- Με χαμηλό ρυθμό περιστροφής του μικρομέτρου αρχίζει η είσοδος του διατρητικού εργαλείου στο τεμάχιο. Ο ρυθμός με τον οποίο θα πρέπει να περιστρέφεται το μικρόμετρο είναι περίπου 4sec για κάθε 0.025mm (δηλαδή το διατρητικό εργαλείο να διανύει 0.025mm το πολύ σε 4sec). Ο χαμηλός αυτός ρυθμός περιστροφής του μικρομέτρου είναι πολύ σημαντικός καθώς σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της ροζέτας και στρέβλωσης του διατρητικού εργαλείου.
- Όταν επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος διείσδυσης (υπολογίζεται βάσει της περιστροφής του μικρομέτρου) η διείσδυση του εργαλείου σταματά.
- Πριν αφηθεί ελεύθερη η βαλβίδα και σταματήσει η περιστροφή του εργαλείου, περιστρέφεται το μικρόμετρο δεξιόστροφα ώστε να ανυψωθεί το εργαλείο διάτρησης από το τεμάχιο κατά περίπου 0.05mm.
- Σημειώνονται οι μετρήσεις των παραμορφώσεων.
- Επαναλαμβάνονται τα προηγούμενα βήματα για όλα τα αυξανόμενα διαστήματα βάθους (για την ίδια οπή) στα οποία θα γίνουν οι μετρήσεις.

Σημείωση: Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων πρέπει να γίνονται πάντα με κλειστή οποιαδήποτε πηγή φωτισμού και αν χρησιμοποιείται. Αυτό διότι η θερμότητα που εκπέμπει η λυχνία είναι ικανή να προκαλέσει διαστολή των πλεγμάτων της ροζέτας και να μεταβάλλει κατά μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων.



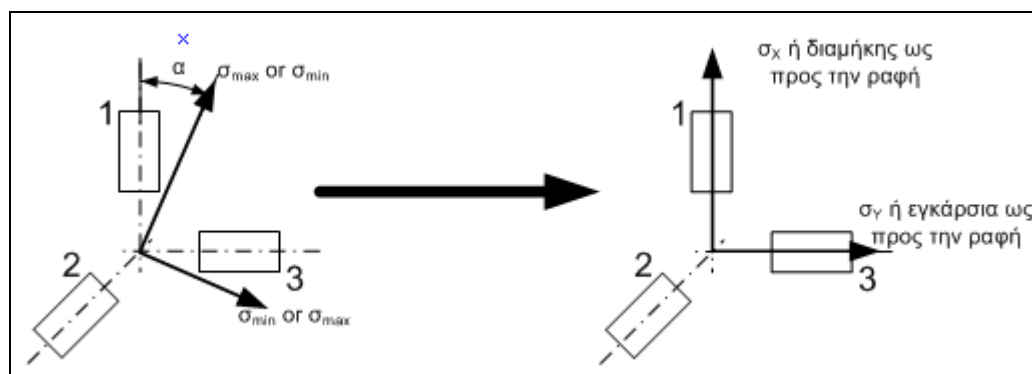
Εικόνα 4.50: Το διατρητικό εργαλείο κατά την διάνοιξη της οπής

Μέτρηση της διαμέτρου της οπής

Μετά την διάνοιξη της οπής για όλα τα αυξανόμενα βάθη επανενεργοποιείται ο φωτισμός στην περιοχή της ροζέτας και απομακρύνεται η διάταξη της τουρμπίνας από την κεντρική οπή του στροφέα. Στην θέση της εισάγεται η διάταξη του μικροσκοπίου και ρυθμίζεται το ύψος της όπως προηγουμένως έτσι ώστε να διακρίνεται καθαρά και εστιασμένα η ροζέτα. Στην συνέχεια μετράται η διάμετρος της οπής χρησιμοποιώντας την διαβαθμισμένη κλίμακα που φαίνεται στο μικροσκόπιο. Σύμφωνα με την κλίμακα αυτή (στον οριζόντιο άξονα του μικροσκοπίου) οι 25 (συνολικά) υποδιαρέσεις του άξονα αντιστοιχούν σε μήκος 1mm. Επομένως το κάθε διάστημα της κλίμακας που φαίνεται στο μικροσκόπιο αντιστοιχεί σε μήκος 0.04mm. Οι δοκιμές και η εμπειρία έχουν δείξει πως η διάμετρος που προκύπτει από την μέτρηση μπορεί να υπερβαίνει τη θεωρητική τιμή η οποία προφανώς θα είναι ίση με την διάμετρο του τρυπανιού που θα χρησιμοποιηθεί. Βάση του τύπου της ροζέτας που χρησιμοποιήσαμε (τύπος 062RE) έχουμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε και τους δύο τύπος διατρητικού εργαλείου (διαμέτρων 1.6mm & 0.8mm). Τελικά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί εργαλείο διαμέτρου 1.6mm και άρα η θεωρητική διάμετρος της οπής θα πρέπει να είναι 1.6mm.

4.4 Επεξεργασία των μετρήσεων

Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Excel στο οποίο προγραμματίστηκαν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί που προϋποθέτει η μέθοδος *hole drilling* για την εξαγωγή των τελικών τιμών των τάσεων στην κάθε θέση μέτρησης (δες κεφάλαιο 3: Αναγωγή δεδομένων – Διάνοιξη τυφλής οπής & σχέσεις 3.11α /3.11β/3.11γ1/3.11γ2) και εισάχθηκαν όλα τα απαραίτητα διαγράμματα για τον υπολογισμό των διαφόρων σταθερών έτσι ώστε να εκτελεστούν σύντομα όλες οι απαραίτητες μαθηματικές πράξεις. Τα φύλλα των μετρήσεων - υπολογισμών παρατίθενται στην συνέχεια με την τελική τιμή των τάσεων υπολογισμένη για κάθε θέση. Να υπενθυμίσουμε πως το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε από την επεξεργασία (τάσεις σ_{max} , σ_{min} , γωνία α) αναφέρονται στο κύριο σύστημα των τάσεων (απουσία διατμητικών τάσεων) και στην στροφή αυτού ως προς τον άξονα του βασικού επιμηκυνσιόμετρου (δες σχήμα 3.7 επιμηκυνσιόμετρο 1). Για τον λόγο αυτό απαιτείται η μετατροπή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα η οποία γίνεται με τους γνωστούς από την μηχανική τύπους για την εύρεση του κυρίου συστήματος τάσεων (είναι προφανές ότι κατά την μετατροπή γεννάται και μία διατμητική τάση η οποία δεν απεικονίζεται στο σχήμα).



Εικόνα 4.51: Μετατροπή των τάσεων που λαμβάνουμε από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων

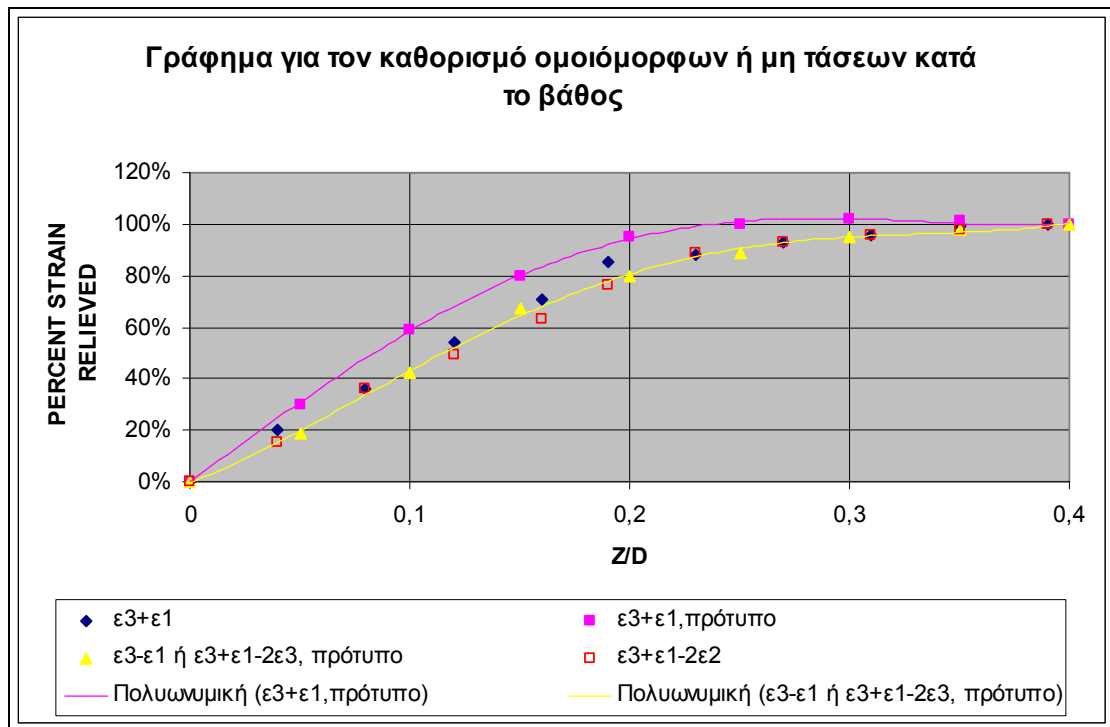
Προτού παραθέσουμε τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας πρέπει επίσης να αναφέρουμε πως για όλες τις οπές που πραγματοποιήσαμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν ακολουθούσαν την καμπύλη – κριτήριο ομοιομορφίας των τάσεων (δες κεφάλαιο 3, εικόνα 3.11) που σημαίνει πως οι τάσεις του τεμαχίου μας είναι ομοιόμορφες κατά το βάθος και άρα η διαδικασία της επεξεργασίας των μετρήσεων θα πρέπει να ακολουθήσει τα όσα υπάγονται σε αυτή την περίπτωση. Οι σχέσεις για την μετατροπή των τάσεων από και προς το κύριο σύστημα είναι οι ακόλουθες:

$$\sigma_{\max,\min} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

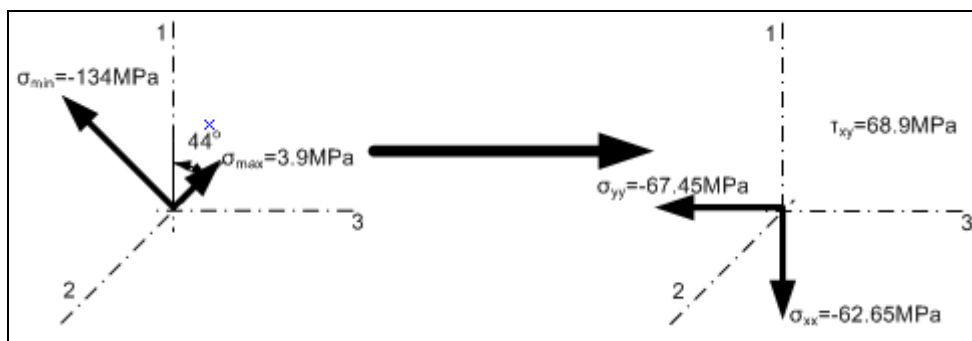
$$\tan(2 \cdot \alpha) = \frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}$$

ΟΠΗ / ΡΟΖΕΤΑ 1

α/α	Βάθος οπής		Μετρούμενες παραμορφώσεις		Ποσοστό παραμορφώσεων			Συντελεστές				α°	Παραμένουσες τάσεις (GPa)	
	Z(mm)	Z/D			ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ -2ε ₂ %	(A×10 ⁻⁸ , B×10 ⁻⁸)					σ _{min}	σ _{max}
0	0	0	ε ₁	0	0	0	0	a	-	b	-	-	0	0
			ε ₂	0				A	-	B	-			
			ε ₃	0				4A	-	4B	-			
1	0,2	0,04	ε ₁	11	32 20%	10 143%	50 15%	a	0,135	b	0,340	39	-0,023	-0,0022
			ε ₂	-9				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	21				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
2	0,4	0,08	ε ₁	25	58 36%	8 114%	120 36%	a	0,135	b	0,340	43	-0,047	0,0016
			ε ₂	-31				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	33				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
3	0,6	0,12	ε ₁	40	88 54%	8 114%	164 49%	a	0,135	b	0,340	44	-0,068	-0,0012
			ε ₂	-38				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	48				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
4	0,8	0,16	ε ₁	54	116 71%	8 114%	210 63%	a	0,135	b	0,340	44	-0,089	-0,0033
			ε ₂	-47				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	62				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
5	1,0	0,19	ε ₁	65	139 85%	9 129%	253 76%	a	0,135	b	0,340	44	-0,107	0,0045
			ε ₂	-57				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	74				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
6	1,2	0,23	ε ₁	67	143 88%	9 129%	299 89%	a	0,135	b	0,340	44	-0,118	0,0036
			ε ₂	-78				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	76				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
7	1,4	0,27	ε ₁	72	152 93%	8 114%	312 93%	a	0,135	b	0,340	44	-0,124	0,0038
			ε ₂	-80				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	80				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
8	1,6	0,31	ε ₁	75	157 96%	7 100	323 96%	a	0,135	b	0,340	44	-0,129	0,0035
			ε ₂	-83				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	82				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
9	1,8	0,35	ε ₁	77	161 99%	7 100%	329 98%	a	0,135	b	0,340	44	-0,131	0,0039
			ε ₂	-84				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	84				4A	-0,002507	4B	-0,004857			
10	2	0,39	ε ₁	78	163 100%	7 100%	335 100%	a	0,135	b	0,340	44	-0,134	0,0039
			ε ₂	-86				A	-6,27E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	85				4A	-0,002507	4B	-0,004857			



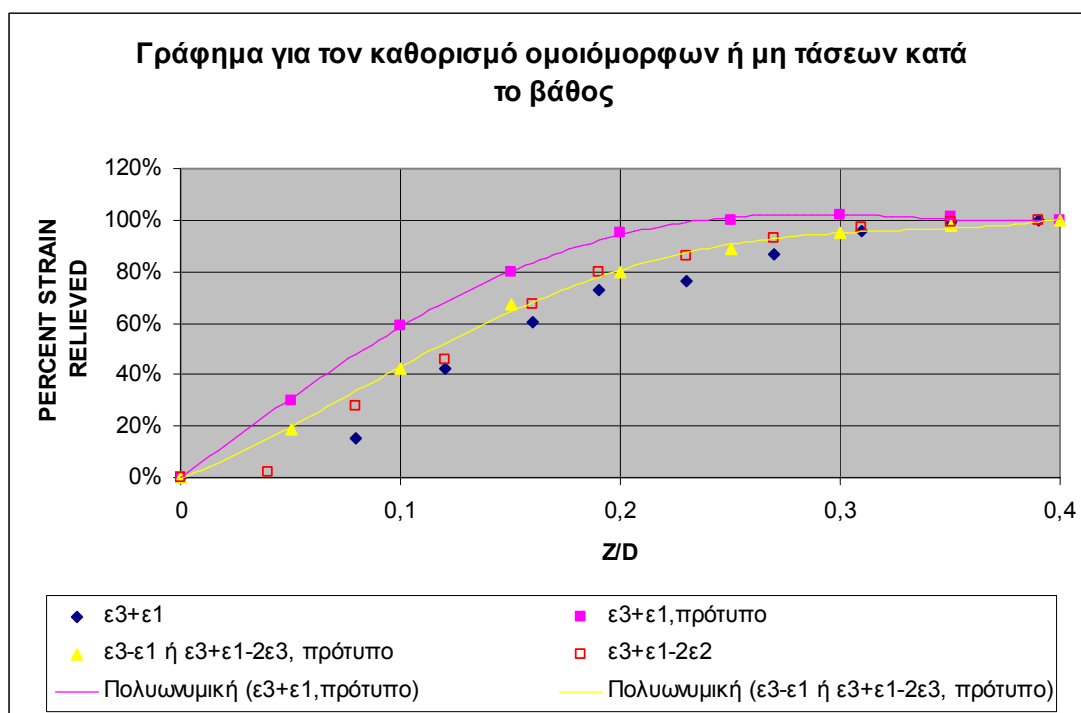
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα και την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης οπής έχουμε το ακόλουθο σχήμα που αφορά στο σύστημα των κυρίων τάσεων για την θέση της ροζέτας 1 το οποίο και μετατρέπεται στο σύστημα των τάσεων που αναφέρονται στους άξονες που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα όσο είδαμε παραπάνω (εικόνα 4.11). Για την ροζέτα 1 γενικά ισχύει $\epsilon_3 > \epsilon_1$ και άρα η γωνία α αναφέρεται στην σ_{max} . Επίσης βλέπουμε πως σε κάθε βήμα διάτρησης η τιμή της παραμόρφωσης ϵ_1 είναι αρκετά κοντά με αυτή της ϵ_3 γεγονός που δικαιολογεί και το ότι η γωνία α προσεγγίζει τις 45° .



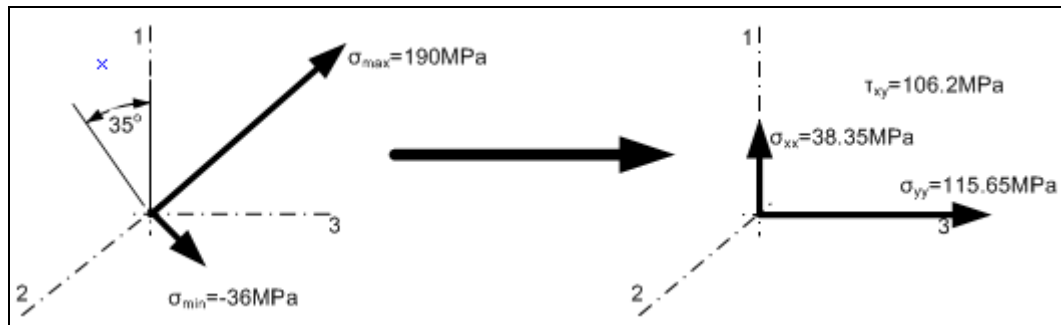
Εικόνα 4.52: Κύριο σύστημα και αναγωγή των τάσεων στην ροζέτα 1

ΟΠΗ / ΡΟΖΕΤΑ 2

α/α	Βάθος οπής		Μετρούμενες παραμορφώσεις		Ποσοστό παραμορφώσεων			Συντελεστές ($\bar{A} \times 10^{-8}$, $\bar{B} \times 10^{-8}$)				α°	Παραμένουσες τάσεις (GPa)	
	Z(mm)	Z/D			ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ -2ε ₂ %	a	b	A	B		σ _{min}	σ _{max}
0	0	0	ε ₁	0	0	0	0	a	-	b	-	-	0	0
			ε ₂	0				A	-	B	-			
			ε ₃	0				4A	-	4B	-			
1	0,2	0,04	ε ₁	-10	10 -5%	30 16%	-10 2%	a	0,137	b	0,340	-9	-0,010	0,0025
			ε ₂	10				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	20				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
2	0,4	0,08	ε ₁	-44	-28 15%	60 31%	-144 28%	a	0,137	b	0,340	-34	-0,021	0,0431
			ε ₂	58				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	16				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
3	0,6	0,12	ε ₁	-93	-81 42%	105 55%	-241 46	a	0,137	b	0,340	-33	-0,022	0,0859
			ε ₂	80				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	12				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
4	0,8	0,16	ε ₁	-125	-115 60%	135 71%	-351 67%	a	0,137	b	0,340	-34	-0,032	0,1226
			ε ₂	118				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	10				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
5	1,0	0,19	ε ₁	-149	-140 73	158 83%	-416 80%	a	0,137	b	0,340	-35	-0,036	0,1466
			ε ₂	138				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	9				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
6	1,2	0,23	ε ₁	-161	-147 76%	175 92%	-449 86%	a	0,137	b	0,340	-34	-0,041	0,1569
			ε ₂	151				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	14				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
7	1,4	0,27	ε ₁	-172	-167 87%	177 93%	-483 93%	a	0,137	b	0,340	-35	-0,040	0,1715
			ε ₂	158				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	5				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
8	1,6	0,31	ε ₁	-183	-185 96%	181 95%	-507 97%	a	0,137	b	0,340	-35	-0,038	0,1835
			ε ₂	161				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	-2				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
9	1,8	0,35	ε ₁	-189	-191 99%	187 98%	-517 97%	a	0,137	b	0,340	-35	-0,038	0,1882
			ε ₂	163				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	-2				4A	-0,002544	4B	-0,004857			
10	2	0,39	ε ₁	-192	-193 100%	191 100%	-521 100%	a	0,137	b	0,340	-35	-0,038	0,190
			ε ₂	164				A	-6,36E-04	B	-1,21E-03			
			ε ₃	-1				4A	-0,002544	4B	-0,004857			



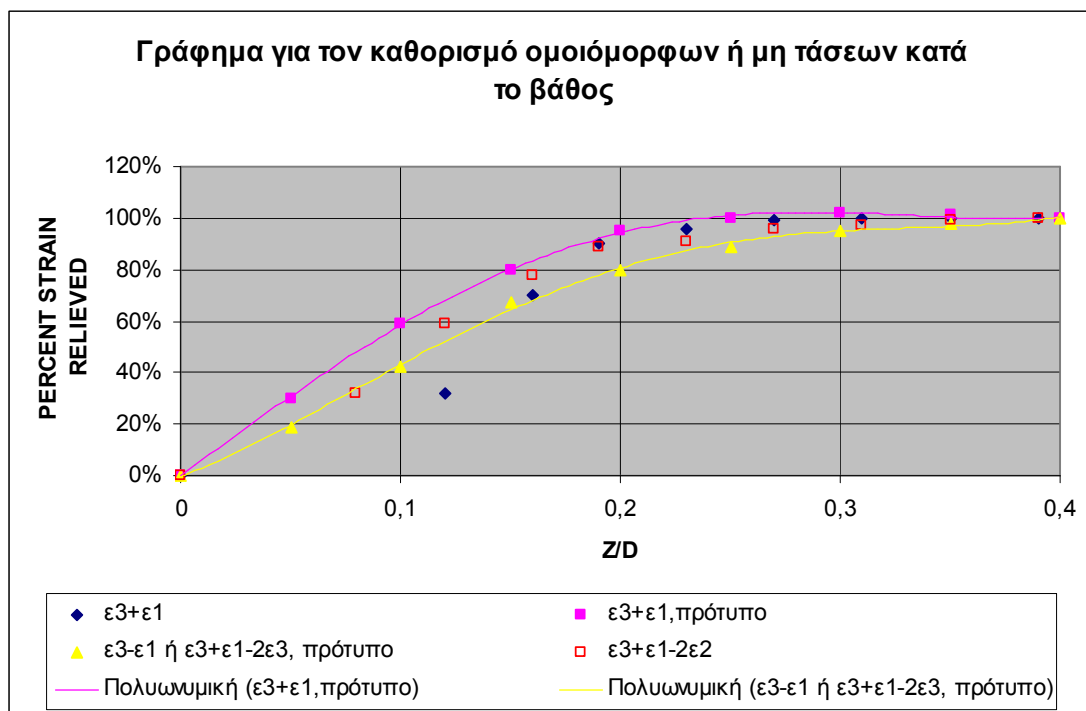
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα και την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης οπής έχουμε το ακόλουθο σχήμα που αφορά στο σύστημα των κυρίων τάσεων για την θέση της ροζέτας 2 το οποίο και μετατρέπεται στο σύστημα των τάσεων που αναφέρονται στους άξονες που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα όσο είδαμε παραπάνω (εικόνα 4.11). Για την ροζέτα 2 γενικά ισχύει $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$ (κατ' απόλυτη τιμή, διότι ουσιαστικά μία παραμόρφωση -100 είναι μεγαλύτερη από μία -20) και άρα η γωνία α αναφέρεται στην σ_{\min} .



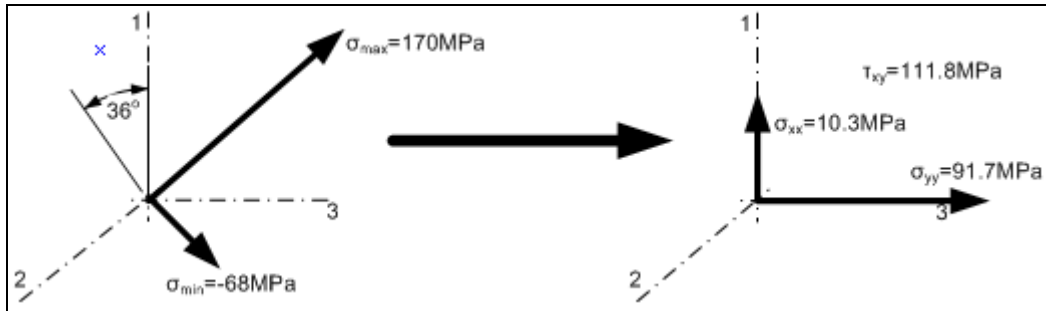
Εικόνα 4.53: Κύριο σύστημα και αναγωγή των τάσεων στην ροζέτα 2

ΟΠΗ / ΡΟΖΕΤΑ 4

α/α	Βάθος οπή		Μετρούμενες παραμορφώσεις		Ποσοστό παραμορφώσεων			Συντελεστές $(\bar{A} \times 10^{-8}, \bar{B} \times 10^{-8})$				α°	Παραμένουσες τάσεις (GPa)	
	Z(mm)	Z/D			ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ -2ε ₂ %	a	b	A	B		σ _{min}	σ _{max}
0	0	0	ε ₁	0	0	0	0	a	-	b	-	-	0	0
			ε ₂	0				A	-	B	-			
			ε ₃	0				4A	-	4B	-			
1	0,2	0,04	ε ₁	16	30 -22%	-2 -1%	4 -1%	a	0,140	b	0,360	-32	-0,012	-0,0106
			ε ₂	13				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	14				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
2	0,4	0,08	ε ₁	-6	47 -35%	59 27%	-183 32%	a	0,140	b	0,360	-36	-0,055	0,0193
			ε ₂	115				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	53				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
3	0,6	0,12	ε ₁	-92	-43 32%	141 65%	-339 59%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,054	0,0879
			ε ₂	148				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	49				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
4	0,8	0,16	ε ₁	-140	-94 70%	186 85%	-450 78%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,058	0,130
			ε ₂	178				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	46				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
5	1,0	0,19	ε ₁	-163	-121 90%	205 94%	-511 89%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,060	0,153
			ε ₂	195				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	42				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
6	1,2	0,23	ε ₁	-170	-129 96%	211 97%	-525 91%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,060	0,159
			ε ₂	198				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	41				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
7	1,4	0,27	ε ₁	-173	-133 99%	213 98%	-553 96%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,064	0,166
			ε ₂	210				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	40				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
8	1,6	0,31	ε ₁	-176	-134 100%	218 100%	-560 97%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,065	0,168
			ε ₂	213				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	42				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
9	1,8	0,35	ε ₁	-177	-134 100%	222 101%	-572 99%	a	0,140	b	0,360	-34	-0,067	0,170
			ε ₂	219				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	43				4A	-0,0026	4B	-0,005143			
10	2	0,39	ε ₁	-176	-134 100%	218 100%	-576 100%	a	0,140	b	0,360	-35	-0,068	0,171
			ε ₂	221				A	-6,50E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	42				4A	-0,0026	4B	-0,005143			



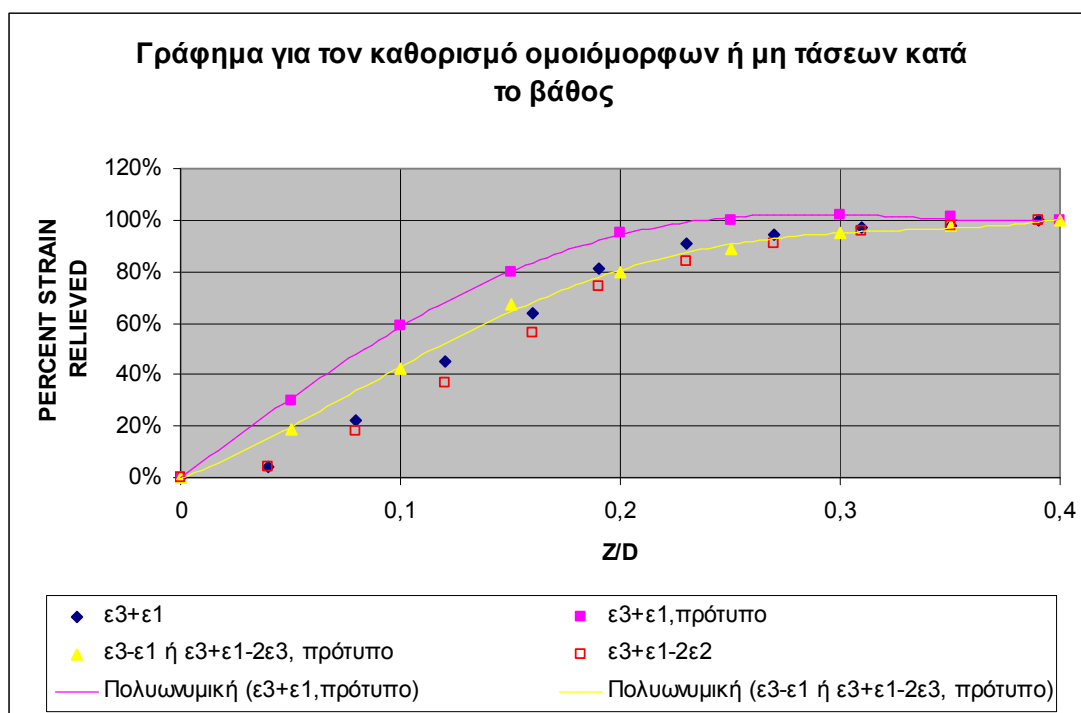
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα και την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης οπής έχουμε το ακόλουθο σχήμα που αφορά στο σύστημα των κυρίων τάσεων για την θέση της ροζέτας 4 το οποίο και μετατρέπεται στο σύστημα των τάσεων που αναφέρονται στους άξονες που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα όσο είδαμε παραπάνω (εικόνα 4.11). Για την ροζέτα 4 γενικά ισχύει $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$ (κατ' απόλυτη τιμή, διότι ουσιαστικά μία παραμόρφωση -100 είναι μεγαλύτερη από μία -20) και άρα η γωνία α αναφέρεται στην σ_{\min} .



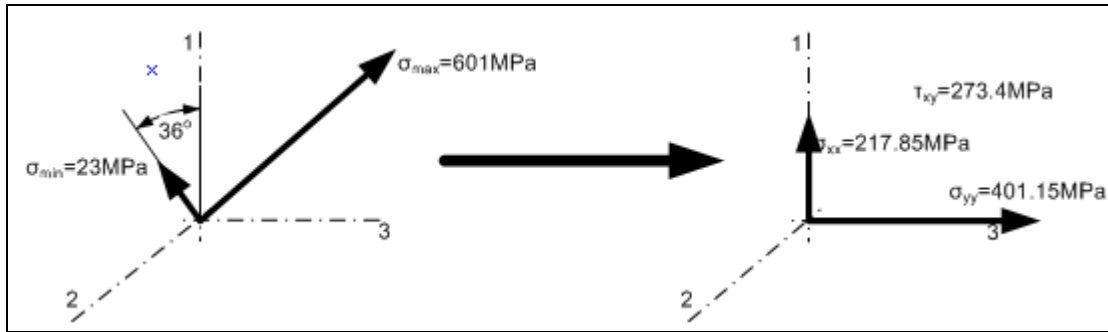
Εικόνα 4.54: Κύριο σύστημα και αναγωγή των τάσεων για την ροζέτα 4

ΟΠΗ / ΡΟΖΕΤΑ 5

α/α	Βάθος οπής		Μετρούμενες παραμορφώσεις		Ποσοστό παραμορφώσεων			Συντελεστές ($\bar{A} \times 10^{-8}$, $\bar{B} \times 10^{-8}$)				α°	Παραμένουσες τάσεις (GPa)	
	Z(mm)	Z/D			ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ -2ε ₂ %	a	b	A	B		σ _{min}	σ _{max}
0	0	0	ε ₁	0	0	0	0	a	-	b	-	-	0	0
			ε ₂	0				A	-	B	-			
			ε ₃	0				4A	-	4B	-			
1	0,2	0,04	ε ₁	-53	-29 4%	77 17%	-57 4%	a	0,142	b	0,362	-18	-0,007	0,0295
			ε ₂	14				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	24				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
2	0,4	0,08	ε ₁	-123	-179 22%	67 15%	-253 18%	a	0,142	b	0,362	-38	0,017	0,118
			ε ₂	37				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-56				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
3	0,6	0,12	ε ₁	-264	-368 45%	160 36%	-534 37%	a	0,142	b	0,362	-37	0,031	0,247
			ε ₂	83				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-104				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
4	0,8	0,16	ε ₁	-389	-525 64%	253 57%	-797 56%	a	0,142	b	0,362	-36	0,037	0,360
			ε ₂	136				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-136				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
5	1,0	0,19	ε ₁	-506	-670 81%	342 77%	-1052 74%	a	0,142	b	0,362	-36	0,040	0,467
			ε ₂	191				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-164				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
6	1,2	0,23	ε ₁	-568	-746 91%	390 87%	-1192 84%	a	0,142	b	0,362	-36	0,040	0,525
			ε ₂	223				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-178				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
7	1,4	0,27	ε ₁	-598	-776 94%	420 94%	-1298 91%	a	0,142	b	0,362	-36	0,030	0,558
			ε ₂	261				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-178				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
8	1,6	0,31	ε ₁	-618	-797 97%	439 98%	-1363 96%	a	0,142	b	0,362	-36	0,025	0,579
			ε ₂	283				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-179				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
9	1,8	0,35	ε ₁	-629	-808 98%	450 101%	-1394 98%	a	0,142	b	0,362	-36	0,023	0,589
			ε ₂	293				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-179				4A	-0,002637	4B	-0,005171			
10	2	0,39	ε ₁	-635	-824 100%	446 100%	-1425 100%	a	0,142	b	0,362	-36	0,023	0,601
			ε ₂	301				A	-6,59E-04	B	-1,29E-03			
			ε ₃	-189				4A	-0,002637	4B	-0,005171			



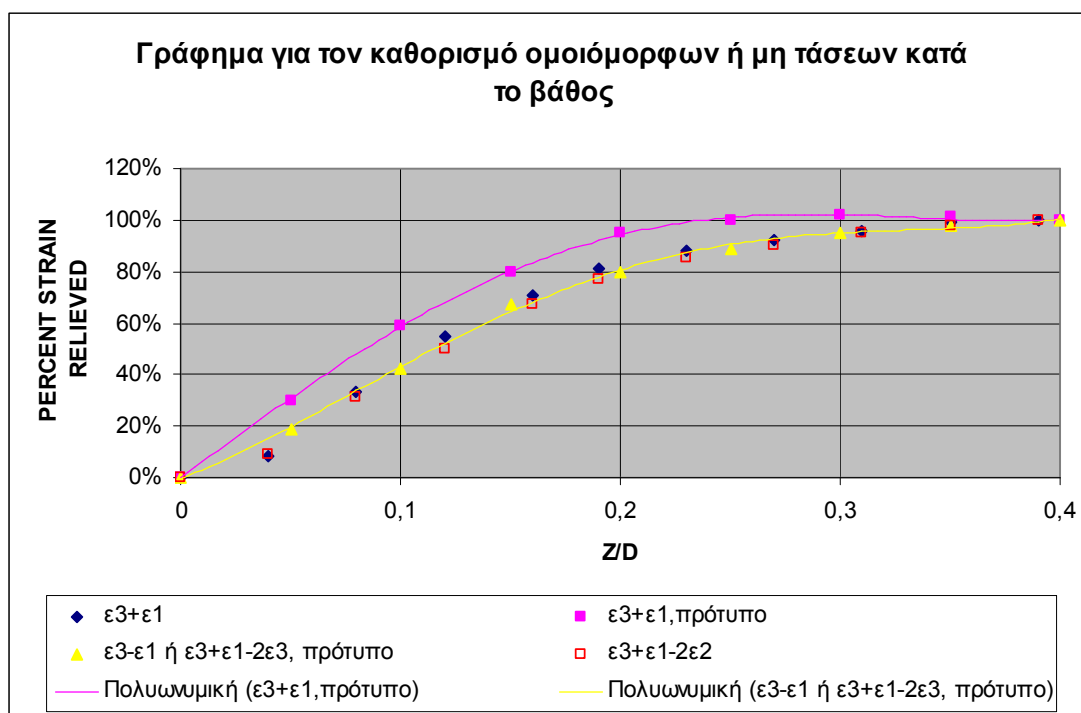
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα και την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης οπής έχουμε το ακόλουθο σχήμα που αφορά στο σύστημα των κυρίων τάσεων για την θέση της ροζέτας 5 το οποίο και μετατρέπεται στο σύστημα των τάσεων που αναφέρονται στους άξονες που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα όσο είδαμε παραπάνω (εικόνα 4.11). Για την ροζέτα 5 γενικά ισχύει $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$ (κατ' απόλυτη τιμή, διότι ουσιαστικά μία παραμόρφωση -100 είναι μεγαλύτερη από μία -20) και άρα η γωνία α αναφέρεται στην σ_{\min} .



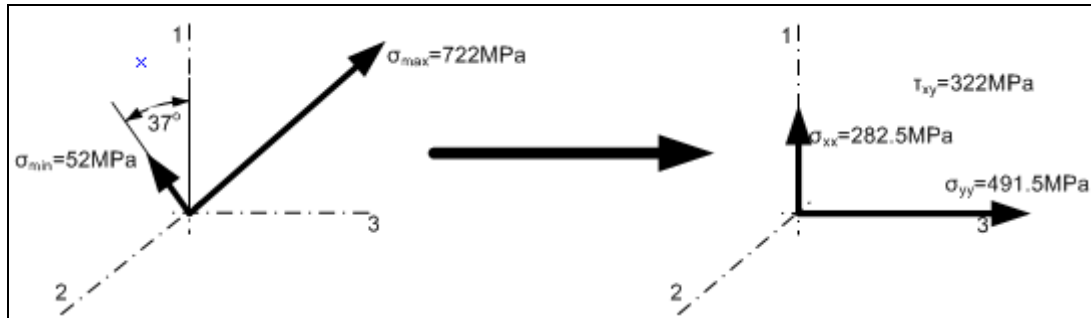
Εικόνα 4.55: Κύριο σύστημα και αναγωγή των τάσεων στην ροζέτα 5

ΟΠΗ / ΡΟΖΕΤΑ 6

α/α	Βάθος οπής		Μετρούμενες παραμορφώσεις		Ποσοστό παραμορφώσεων			Συντελεστές ($\bar{A} \times 10^{-8}$, $\bar{B} \times 10^{-8}$)				α°	Παραμένουσες τάσεις (GPa)	
	Z(mm)	Z/D			ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ -2ε ₂ %	a	b	A	B		σ _{min}	σ _{max}
0	0	0	ε ₁	0	0	0	0	a	-	b	-	-	0	0
			ε ₂	0				A	-	B	-			
			ε ₃	0				4A	-	4B	-			
1	0,2	0,04	ε ₁	-119	-85 8%	153 34%	-149 9%	a	0,139	b	0,350	-22	-0,009	0,075
			ε ₂	32				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	34				4A	-0,002581	4B	-0,005			
2	0,4	0,08	ε ₁	-256	-332 33%	180 40%	-506 31%	a	0,139	b	0,350	-35	0,211	0,236
			ε ₂	87				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-76				4A	-0,002581	4B	-0,005			
3	0,6	0,12	ε ₁	-424	-548 55%	300 67%	-812 50%	a	0,139	b	0,350	-35	0,039	0,385
			ε ₂	132				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-124				4A	-0,002581	4B	-0,005			
4	0,8	0,16	ε ₁	-540	-709 71%	371 82%	-1079 67%	a	0,139	b	0,350	-36	0,046	0,502
			ε ₂	185				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-169				4A	-0,002581	4B	-0,005			
5	1,0	0,19	ε ₁	-607	-810 81%	404 90%	-1244 77%	a	0,139	b	0,350	-36	0,052	0,573
			ε ₂	217				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-203				4A	-0,002581	4B	-0,005			
6	1,2	0,23	ε ₁	-654	-880 88%	428 95%	-1364 85%	a	0,139	b	0,350	-36	0,054	0,626
			ε ₂	242				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-226				4A	-0,002581	4B	-0,005			
7	1,4	0,27	ε ₁	-680	-922 92%	438 97%	-1450 90%	a	0,139	b	0,350	-37	0,054	0,660
			ε ₂	264				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-242				4A	-0,002581	4B	-0,005			
8	1,6	0,31	ε ₁	-704	-963 96%	445 99%	-1531 95%	a	0,139	b	0,350	-37	0,054	0,691
			ε ₂	284				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-259				4A	-0,002581	4B	-0,005			
9	1,8	0,35	ε ₁	-720	-991 99%	449 100%	-1587 98%	a	0,139	b	0,350	-37	0,054	0,713
			ε ₂	298				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-271				4A	-0,002581	4B	-0,005			
10	2	0,39	ε ₁	-726	-1001 100%	451 100%	-1613 100%	a	0,139	b	0,350	-37	0,052	0,722
			ε ₂	306				A	-6,45E-04	B	-1,25E-03			
			ε ₃	-275				4A	-0,002581	4B	-0,005			



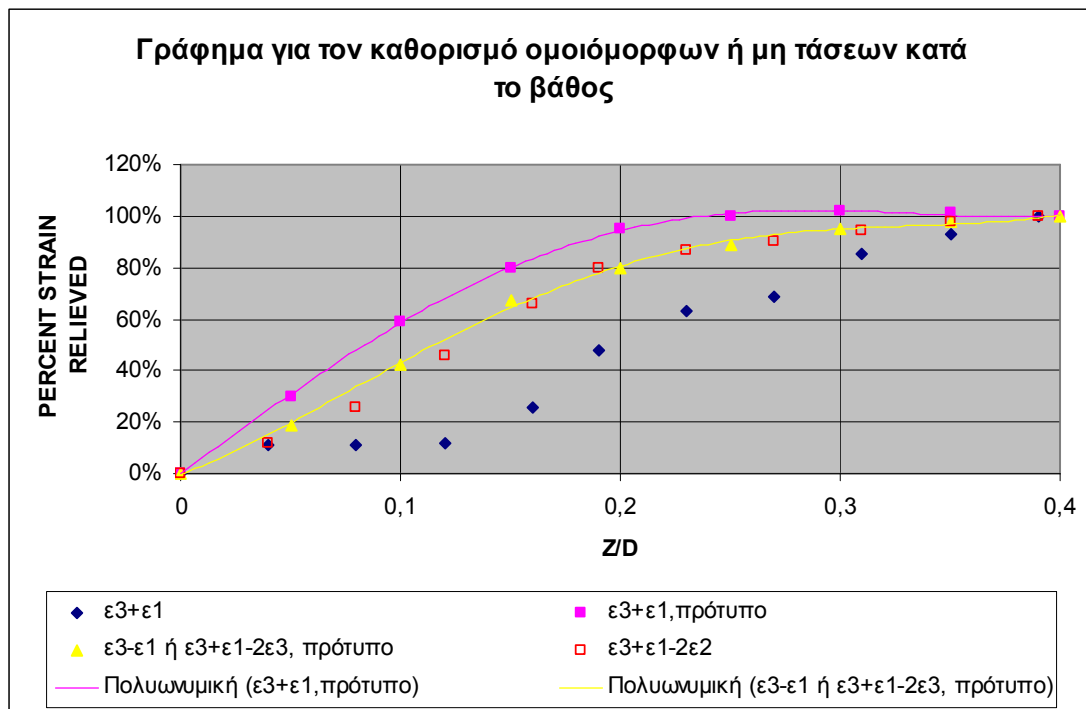
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα και την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης οπής έχουμε το ακόλουθο σχήμα που αφορά στο σύστημα των κυρίων τάσεων για την θέση της ροζέτας 6 το οποίο και μετατρέπεται στο σύστημα των τάσεων που αναφέρονται στους άξονες που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα όσο είδαμε παραπάνω (εικόνα 4.11). Για την ροζέτα 6 γενικά ισχύει $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$ (κατ' απόλυτη τιμή, διότι ουσιαστικά μία παραμόρφωση -100 είναι μεγαλύτερη από μία -20) και άρα η γωνία α αναφέρεται στην σ_{\min} .



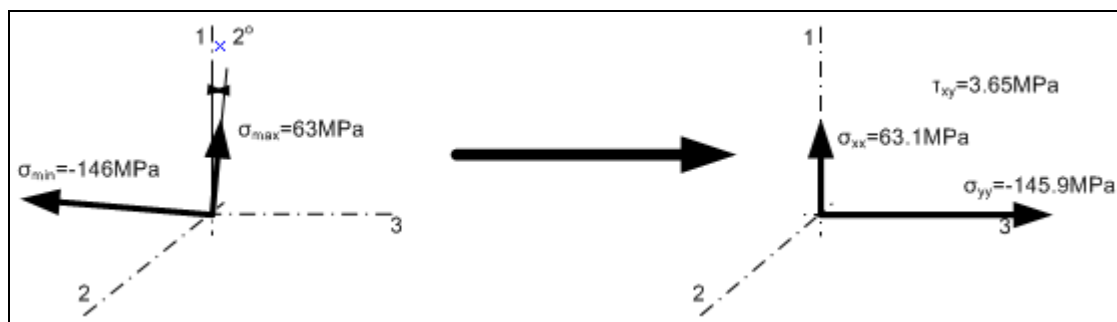
Εικόνα 4.56: Κύριο σύστημα και αναγωγή των τάσεων στην ροζέτα 6

ΟΠΗ / ΡΟΖΕΤΑ 7

α/α	Βάθος οπής		Μετρούμενες παραμορφώσεις		Ποσοστό παραμορφώσεων			Συντελεστές ($\bar{A} \times 10^{-8}, \bar{B} \times 10^{-8}$)				α°	Παραμένουσες τάσεις (GPa)	
	Z(mm)	Z/D			ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ %	ε ₃ +ε ₁ -2ε ₂ %	a	b	A	B		σ _{min}	σ _{max}
0	0	0	ε ₁	0	0	0	0	a	-	b	-	-	0	0
			ε ₂	0				A	-	B	-			
			ε ₃	0				4A	-	4B	-			
1	0,2	0,04	ε ₁	-24	11	59	9	a	0,131	b	0,336	4	-0,016	0,007
			ε ₂	1				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	35				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
2	0,4	0,08	ε ₁	-59	11	129	7	a	0,131	b	0,336	2	-0,031	0,022
			ε ₂	2				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	70				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
3	0,6	0,12	ε ₁	-109	12	230	14	a	0,131	b	0,336	2	-0,052	0,043
			ε ₂	-1				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	121				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
4	0,8	0,16	ε ₁	-152	26	330	16	a	0,131	b	0,336	1	-0,079	0,058
			ε ₂	5				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	178				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
5	1,0	0,19	ε ₁	-176	48	400	26	a	0,131	b	0,336	2	-0,103	0,063
			ε ₂	11				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	224				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
6	1,2	0,23	ε ₁	-185	64	434	32	a	0,131	b	0,336	2	-0,116	0,064
			ε ₂	16				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	249				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
7	1,4	0,27	ε ₁	-190	70	450	34	a	0,131	b	0,336	2	-0,122	0,065
			ε ₂	18				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	260				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
8	1,6	0,31	ε ₁	-192	86	470	38	a	0,131	b	0,336	2	-0,133	0,062
			ε ₂	24				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	278				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
9	1,8	0,35	ε ₁	-198	94	490	38	a	0,131	b	0,336	2	-0,141	0,063
			ε ₂	28				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	292				4A	-0,002433	4B	-0,0048			
10	2	0,39	ε ₁	-200	101	501	41	a	0,131	b	0,336	2	-0,146	0,063
			ε ₂	30				A	-6,08E-04	B	-1,20E-03			
			ε ₃	301				4A	-0,002433	4B	-0,0048			



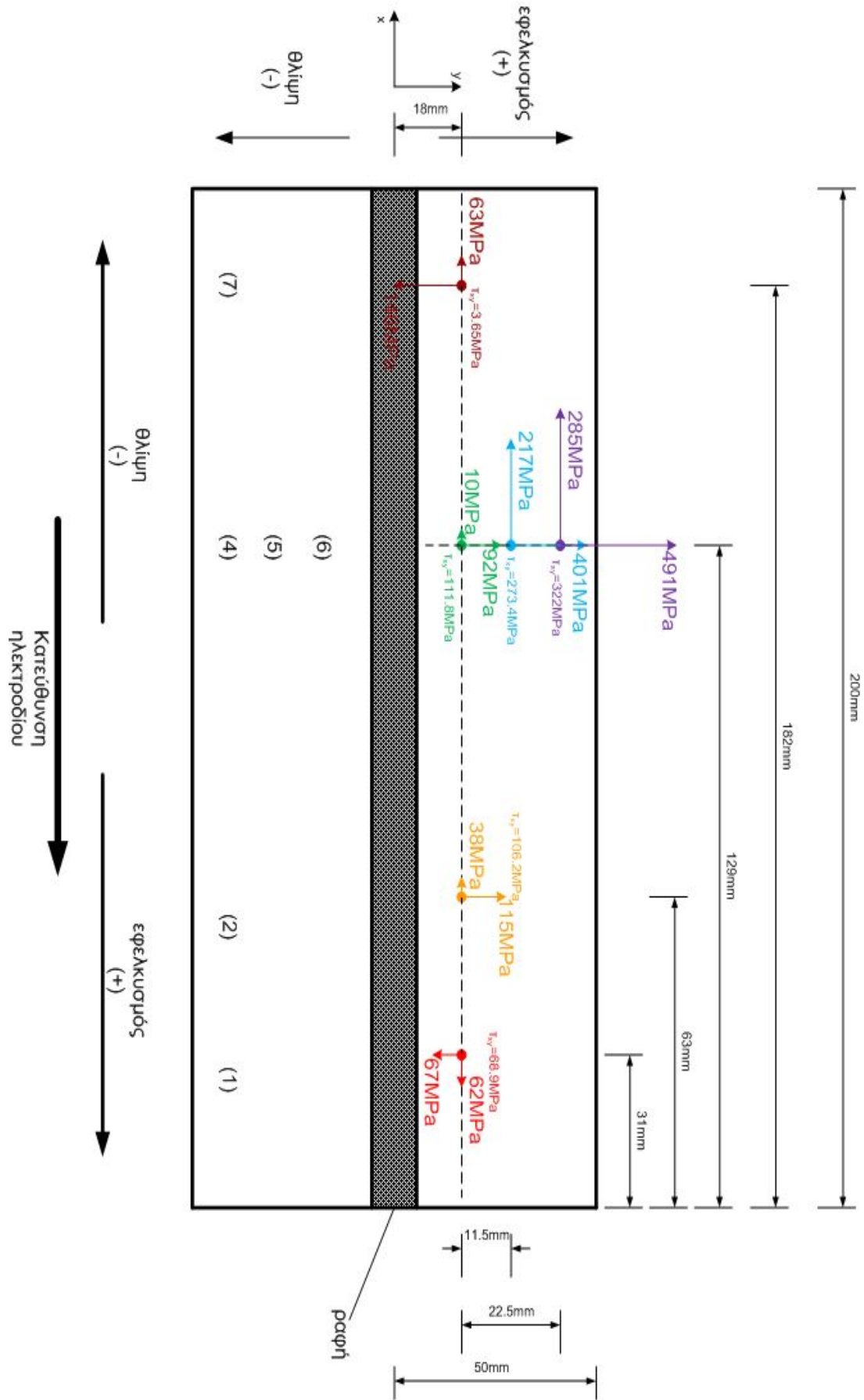
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα και την θεωρητική ανάλυση της μεθόδου διάνοιξης οπής έχουμε το ακόλουθο σχήμα που αφορά στο σύστημα των κυρίων τάσεων για την θέση της ροζέτας 7 το οποίο και μετατρέπεται στο σύστημα των τάσεων που αναφέρονται στους άξονες που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα όσο είδαμε παραπάνω (εικόνα 4.11). Για την ροζέτα 7 γενικά ισχύει $\varepsilon_3 > \varepsilon_1$ και άρα η γωνία α αναφέρεται στην σ_{\max} .



Εικόνα 4.57: Κύριο σύστημα και κατανομή των τάσεων για την ροζέτα 7

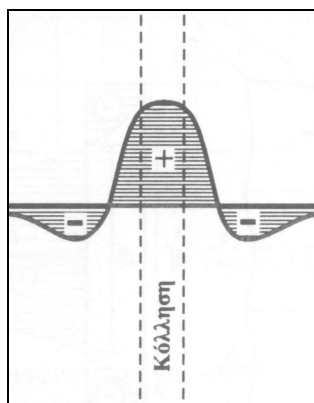
Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων παραθέτουμε ένα συγκεντρωτικό σχήμα των αποτελεσμάτων στην επόμενη σελίδα στο οποίο φαίνονται οι τιμές των τάσεων που υπολογίστηκαν τοποθετημένες επάνω στο τεμάχιο ανάλογα με το που βρισκόταν κάθε ροζέτα.

Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων του πειράματος						
Ροζέτα	Κύριο σύστημα		Γωνία του κυρίου συστήματος ως προς τον βασικό άξονα της ροζέτας ($^{\circ}$)	Διαμήκης παραμένουσα τάση σ_x (MPa)	Εγκάρσια παραμένουσα τάση σ_y (MPa)	Διαμητική παραμένουσα τάση τ_{xy} (MPa)
	σ_{\max}	σ_{\min}				
1	3.9	-134	44	62	-67	68.9
2	190	-36	35	-38	115	106.2
3	-	-	-	-	-	-
4	170	-68	36	-10	92	111.8
5	601	23	36	-217	401	273.4
6	722	52	-37	-285	491	322
7	63	-146	2	-63	-146	3.65



Προτού συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με την προσομοίωση (δες επόμενο κεφάλαιο) κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύγκριση με αυτά που αναμένονται από την θεωρία. Η σύγκριση αυτή θα κινηθεί σε τρία επίπεδα τα οποία είναι η κατανομή των τάσεων κατά την διαμήκη διεύθυνση ως προς τη ραφή (διαμήκειες παραμένουσες τάσεις σ_x), η κατανομή των τάσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση ως προς την ραφή (εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις σ_y) και η αριθμητική τιμή των τάσεων που εμφανίζονται.

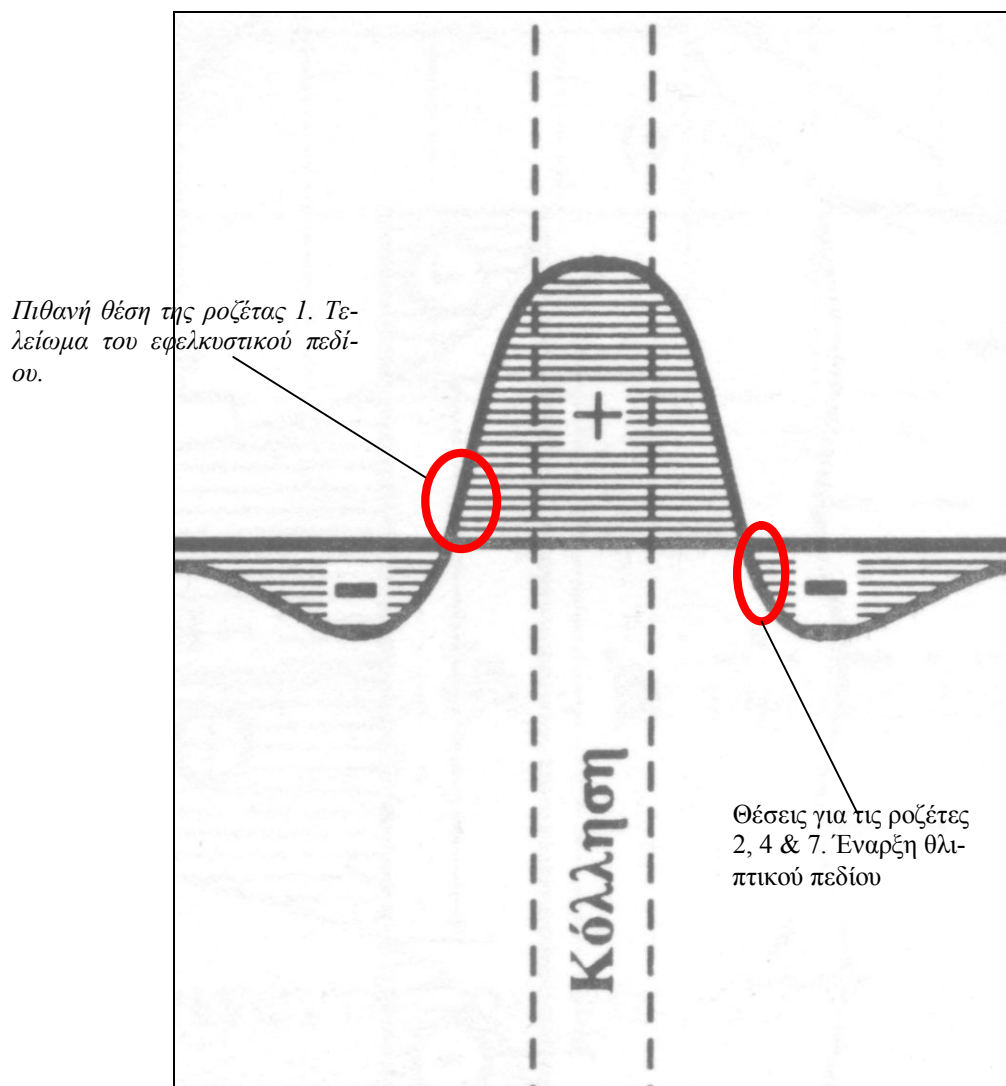
Η πρώτη θεωρητική κατανομή παραμενουσών τάσεων που θα παρουσιάσουμε σχετίζεται με τις διαμήκειες παραμένουσες τάσεις (σ_x), συναντάται στο σύνολο τις σχετικής βιβλιογραφίας και φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 4.58: Θεωρητική κατανομή διαμήκων παραμενουσών τάσεων σε συγκόλληση πλακών κατ' άκρα

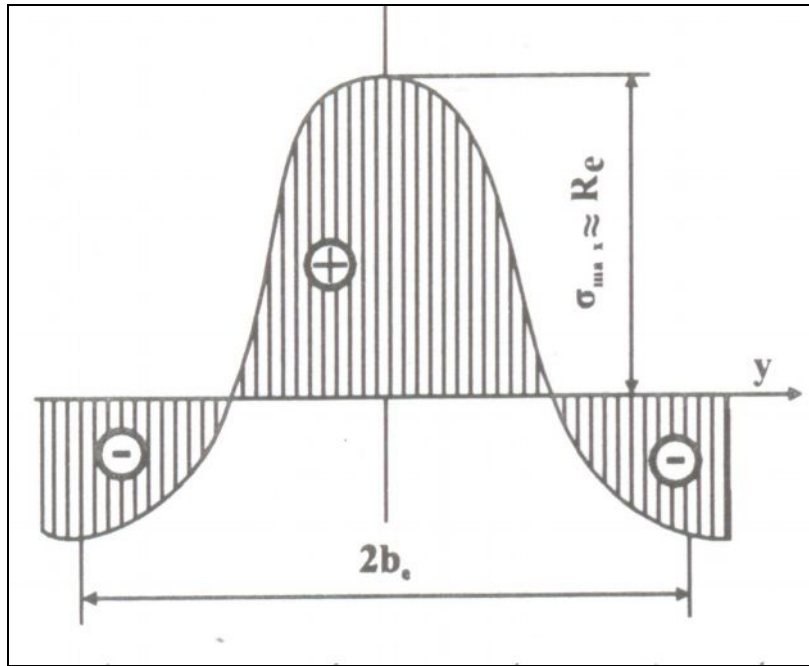
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18, το πεδίο των τάσεων είναι εφελκυστικό εντός της ραφής και στην γειτονιά αυτής (θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, με την τιμή να μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την ραφή) και θλιπτικό στην περιοχή μακριά από την ραφή (βασικό μέταλλο). Οι εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται διότι το λουτρό του μετάλλου (κόλληση) μετά στην συγκόλληση ψύχεται και τείνει να συσταλεί, εμποδίζεται όμως από το υπόλοιπο υλικό μέταλλο βάσης το οποίο και δεν έχει τακεί. Οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται, στην υπόλοιπη μη θερμαινόμενη περιοχή (μέταλλο βάσης) εξισορροπούν τις εφελκυστικές που περιγράψαμε προηγουμένως. Γενικά η περιοχή του δοκιμίου στην οποία αναπτύσσονται οι θλιπτικές τάσεις είναι περίπου δεκαπλάσια αυτής όπου αναπτύσσονται οι εφελκυστικές. Παρατηρώντας τις τιμές των διαμήκων τάσεων που προέκυψαν κοντά στην ραφή (ροζέτες 1, 2, 4 & 7) βλέπουμε πως οι τάσεις ήταν γενικά θλιπτικές (με εξαίρεση την ροζέτα 1) ενώ σύμφωνα με τα όσα προηγήθηκαν θα περίμενε κανείς πως εβρισκόμενοι κοντά στην ραφή θα δούμε μόνο εφελκυστικές τάσεις. Όμως εάν σκεφτούμε πως οι εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται σε περιοχή υποδεκαπλάσιας έκτασης αυτής των θλιπτικών σε συνδυασμό με το σχήμα που δείχνει πως αυτή η περιοχή περιορίζεται στην στενή γειτονιά της ραφής μπορούμε να πούμε πως τελικά το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο διότι οι ροζέτες δεν κολλήθηκαν αρκετά κοντά στην ραφή για να γίνουν ορατές οι εφελκυστικές τάσεις (άλλωστε δεν ήταν δυνατό να γίνει σωστή εφαρμογή τους επάνω ή/και πολύ κοντά στην ραφή) και τελικά, οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν οι ροζέτες είναι αυτές όπου και έχουμε την έναρξη της θλιπτικής περιοχής γι' αυτό και εμφανίζονται χαμηλές τιμές τάσεων. Ειδικότερα για την ροζέτα 1, όπου και προέκυψε εφελκυστική διαμήκη τάση, μπορούμε να πούμε πως επειδή η περιοχή αυτή είναι προς το τέλος της πορείας του ηλεκτροδίου επάνω στο τεμάχιο, είχαμε τέτοια αύξηση της θερμοκρασίας η οποία «άνοιξε» ελαφρώς το εύρος του πεδίου των εφελκυστικών

τάσεων με αποτέλεσμα να πέσουμε πάνω στο τελείωμα αυτό, γι' αυτό άλλωστε και έχουμε επίσης μικρή τιμή τάσης.



Εικόνα 4.59: Η θεωρητική κατανομή των διαμήκων παραμενουσών τάσεων με την τοποθέτηση των ροζετών 1, 2, 4 & 7 βάσει του σχολιασμού των αποτελεσμάτων

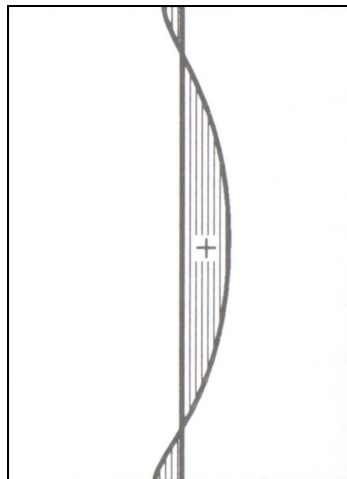
Όσον αφορά το τμήμα των θλιπτικών τάσεων, θα περίμενε κανείς πως οι τιμές που προέκυψαν (ροζέτες 4, 5 & 6) σύμφωνα με το σχήμα θα παρουσίαζαν μία σχετικά απότομη αύξηση και κατόπιν ομαλή πτώση καθώς κινούμαστε προς τα άκρα του τεμαχίου. Όμως παρατηρούμε πως έχουμε συνεχή αύξηση, ταχύτερη αρχικά βραδύτερη στην συνέχεια, καθώς κινούμαστε από την ροζέτα 4 προς την ροζέτα 6. Αυτό οφείλεται στο είδος του χάλυβα που χρησιμοποιήσαμε (μαλακός ανθρακοχάλυβας) για τον οποίο η γενική κατανομή των διαμήκων τάσεων φαίνεται στο επόμενο πιο εξειδικευμένο σχήμα.



Εικόνα 4.60: Θεωρητική κατανομή διαμήκων παραμενουσών τάσεων για μαλακούς ανθρακοχάλυβες

Βλέπουμε λοιπόν πως οι θλιπτικές τάσεις έχουν συνεχή αυξητική τάση με μειούμενο ρυθμό έως τα άκρα του τεμαχίου και άρα μπορούμε να πούμε πως για τον χάλυβα που χρησιμοποιήσαμε επιβεβαιώνονται τα πειραματικά μας αποτελέσματα.

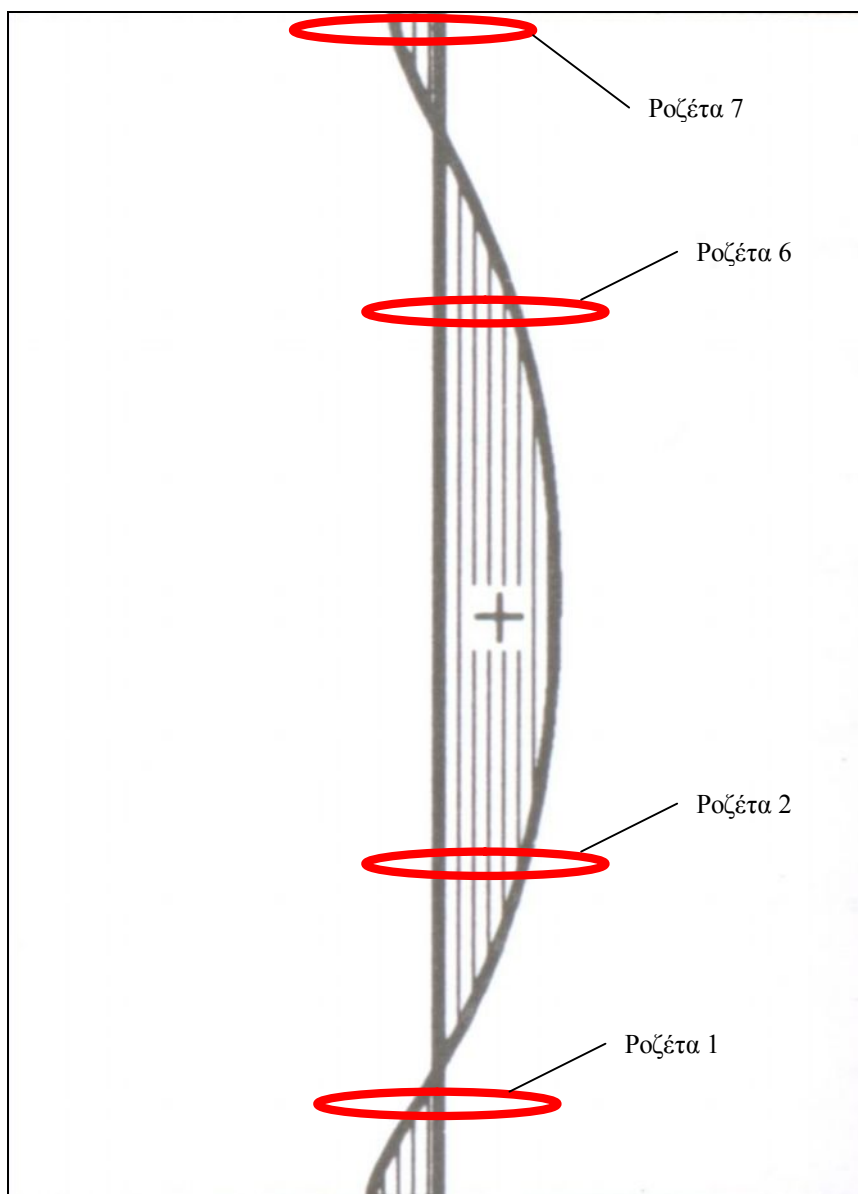
Στην συνέχεια θα εξετάσουμε την κατανομή των εγκάρσιων παραμενουσών τάσεων (σ_y), η θεωρητική κατανομή των οποίων για μετωπική συγκόλληση πλακών φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 4.61: Θεωρητική κατανομή διαμήκων παραμενουσών τάσεων

Όπως παρατηρούμε, οι θλιπτικές τάσεις εμφανίζονται και αποκτούν την μέγιστη τιμή τους στα άκρα της κόλλησης, ενώ στο μέσο της κόλλησης εμφανίζονται οι εφελκυστικές τάσεις. Αυτό προξενείται επειδή το μέσο μέρος της κόλλησης στερεοποιείται με βραδύτερο ρυθμό απ' ότι τα άκρα του μητρικού υλικού. Βλέποντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πήραμε (ροζέτες 1, 2, 4 & 7) παρατηρούμε πως η θεωρία επιβεβαιώνεται καθώς οι τάσεις προκύπτουν θλιπτικές στα άκρα της κόλλησης και εφελκυστικές καθώς κινούμαστε προς το μέσο. Επίσης παρατηρούμε πως

στις περίπου συμμετρικές θέσεις (ροζέτες 2 & 4) οι τιμές είναι περίπου οι ίδιες γεγονός που αναμένεται βάσει του σχήματος, ενώ στην θέση της ροζέτας 7 η οποία βρίσκεται κοντύτερα στο άκρο απ' ότι η ροζέτα 1 (θλιπτικό πεδίο) η παραμένουσα τάση λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή όπως αναμενόταν από την θεωρητική κατανομή. Να σημειώσουμε βέβαια πως οι τιμές μας δεν βρίσκονται ακριβώς επάνω στην ραφή, θεωρούμε όμως με μία καλή προσέγγιση πως θα πρέπει να επικρατεί μία ανάλογη κατανομή ως προς τις εγκάρσιες τάσεις στην γειτονιά της ραφής.



Εικόνα 4.62: Θεωρητική κατανομή των διαμήκων παραμενουσών τάσεων και τοποθέτηση των ροζετών βάσει του σχολιασμού

Τέλος θα κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τις τιμές που λαμβάνουν οι τάσεις τόσο στις θεωρητικές κατανομές όσο και στο τεμάχιο μας. Σύμφωνα με την θεωρία προβλέπεται μέγιστη τιμή των τάσεων στο κέντρο της εφελκυστικής κατανομής (κέντρο της ραφής, σχήμα 4.19 / 4.20) η οποία και θα είναι περίπου ίση με το όριο διαρροής του υλικού. Όπως όμως είναι γνωστό, το όριο διαρροής ενός υλικού είναι μία ιδιότητα σε άμεση συνάρτηση με την θερμοκρασία αυτού. Ενώ μάλιστα στις

κοινές και αρκετά αυξημένες θερμοκρασίες για τα ανθρώπινα δεδομένα αυτό παραμένει πρακτικά αμετάβλητο, όταν προσεγγίζουμε τις θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την συγκόλληση η τιμή του πέφτει κατακόρυφα πράγμα που είναι αναμενόμενο καθώς τότε το υλικό βρίσκεται στην ουσία σε ρευστή μορφή. Έτσι κατά την συγκόλληση, πριν το υλικό αποψυχθεί πλήρως, και λόγω των συστολών που λαμβάνουν χώρα διαρρέει πολύ ευκολότερα (λόγω των χαμηλών τιμών του ορίου διαρροής στις υψηλές θερμοκρασίες) και όταν τελικά αποψύχεται και στερεοποιείται πλήρως η τιμή της τάσεις σταθεροποιείται στα επίπεδα του ορίου διαρροής για τις κοινές θερμοκρασίες. Εμείς βέβαια δεν είναι δυνατό να συγκρίνουμε κάποια από τις τάσεις που μετρήσαμε με το όριο διαρροής του υλικού μας καθώς δεν ήταν δυνατό να πάρουμε μέτρηση επάνω την ραφή. Βασιζόμενοι όμως στα σχήματα των θεωρητικών κατανομών για τις διαμήκεις παραμένουσες τάσεις μπορούμε να κάνουμε κάποια πρόβλεψη – υπόθεση σχετικά με την μέγιστη τιμή των θλιπτικών τάσεων στο άκρο του τεμαχίου (ροζέτα 6). Παρατηρώντας λοιπόν τα σχήματα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι θλιπτικές τάσεις εξισορροπούν το εφελκυστικό πεδίο, σύμφωνα με την μορφή της συνολικής κατανομής το «θετικό» με τα «αρνητικά» εμβαδά θα πρέπει να είναι περίπου ίσο και άρα η μέγιστη τιμή της θλιπτικής τάσης θα πρέπει να ισούται περίπου με το ήμισυ της μέγιστης εφελκυστικής, δηλαδή με το ήμισυ του ορίου διαρροής. Πράγματι, η τιμή των 285MPa μπορούμε να πούμε ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά το ήμισυ του ορίου διαρροής όπως αυτό υπολογίστηκε μέσω της μηχανικής δοκιμής.

Βλέπουμε τελικά πως τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά τα θεωρητικά αναμενόμενα και άρα μπορούν να θεωρηθούν αρκούντως αξιόπιστα. Έτσι μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε στο επόμενο βήμα της διπλωματικής εργασίας έτσι ώστε να τα συγκρίνουμε με αυτά που θα προκύψουν από την προσομοίωση της συγκόλλησης με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 5^ο:
**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ MARC**

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μοντελοποίηση της συγκόλλησης που πραγματοποιήθηκε στο πειραματικό στάδιο της διπλωματικής εργασίας σε προγραμματιστικό περιβάλλον με χρήση τρισδιάστατης (3D) θερμο – μηχανικής (ελαστο – πλαστικής) ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Όπως γνωρίζουμε η συγκόλληση είναι μία αξιόπιστη και αποτελεσματική διαδικασία σύνδεσης των μετάλλων με ευρεία εφαρμογή στις κατασκευές, στην ναυπηγική, στην κατασκευή γεφυρών κλπ.. Βασικά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης σαν διαδικασία σύνδεσης μετάλλων είναι η επίτευξη υψηλού βαθμού συνδεσιμότητας των μετάλλων, το απλό «σετάρισμα» της διαδικασίας και το χαμηλό κόστος. Παρόλα αυτά, όπως είδαμε και παραπάνω, εξαιτίας της εντοπισμένης παροχής θερμότητας και της ψύξης που ακολουθεί κατά την διαδικασία της συγκόλλησης, εμφανίζονται μη ομοιόμορφες θερμοκρασιακές κατανομές στην ραφή και στο μέταλλο βάσης οι οποίες και καταλήγουν στην εμφάνιση παραμενουσών τάσεων. Η μοντελοποίηση που θα κάνουμε έχει σαν στόχο την πρόβλεψη των παραμενουσών τάσεων στα τεμάχια που μελετάμε. Βέβαια η ακριβής πρόγνωση των παραμενουσών τάσεων είναι αρκετά δύσκολη εξαιτίας της πολυπλοκότητας της διαδικασίας συγκόλλησης η οποία περιλαμβάνει εντοπισμένη θέρμανση, ιδιότητες υλικού εξαρτώμενες από την θερμοκρασία, κινούμενη πηγή θερμότητας κλπ. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης που βασίζονται στην μέθοδο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία η τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί, σκοπεύει στο να προσδιοριστούν οι κατανομές των παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα τεμάχια και ειδικότερα των διαμήκων παραμενουσών τάσεων οι οποίες είναι και οι πιο επιβλαβείς για τις δομές των υλικών που συγκολλώνται.

5.2 Τα πεπερασμένα στοιχεία στις συγκολλήσεις

Μοντελοποίηση των συγκολλήσεων – Γενικά

Οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης διαφέρουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο η θερμότητα διοχετεύεται στην περιοχή της κόλλησης και ως προς τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Κάποιες μέθοδοι απαιτούν forging ή πίεση (πλαστική συγκόλληση), ενώ άλλες φέρνουν το μέταλλο σε ρευστή κατάσταση και δεν απαιτούν εφαρμογή πίεσης. Η ανάλυση – μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία περιλαμβάνει πολύ πυκνά πλέγματα και δίνει έμφαση τοπικά στην περιοχή της κόλλησης. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ της περιοχής της κόλλησης και του υπολοίπου συγκολλώμενου τεμαχίου μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη και να μελετηθούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρουσιάζονται περιπλοκές σχετικά με την ελαστική σύνδεση τις περιοχής κόλλησης με την υπόλοιπη δομή της κατασκευής. Κάποια από τα βασικά πεδία χρήσης – εφαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο των συγκολλήσεων είναι τα εξής: 2D & 3D μοντελοποίηση και προσομοίωση συγκόλλησης με πεπερασμένα στοιχεία, παρα-

μορφώσεις και τάσεις: πρόβλεψη της μορφής της συγκόλλησης και των μηχανικών ιδιοτήτων, θερμο – μηχανικά & θερμο – βισκοπλαστικά μεταλλουργικά μοντέλα, κατανομή υδρογόνου και αζώτου στην κόλληση, συμπεριφορά των συγκολλήσεων σε ερπυσμό, ατέλειες συγκολλήσεων κ.α.

Μοντελοποίηση εξειδικευμένων διαδικασιών συγκόλλησης

Η συγκόλληση διάχυσης, η συγκόλληση ηλεκτρικής αντίστασης, η συγκόλληση στερεάς φάσης, η συγκόλληση υγρής – στερεάς φάσης και η adhesive bonding, είναι οι πιο σημαντικές κατηγορίες που συνθέτουν τις διαδικασίες σύνδεσης των υλικών. Για το σύνολο αυτών, συμπεριλαμβανομένων και των υποκατηγοριών τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα πεπερασμένα στοιχεία για ανάλυση και προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα, τέτοιες μέθοδοι είναι οι εξής: συγκολλήσεις τόξου με χρήση βοηθητικού αερίου, συγκολλήσεις πίεσης, συγκολλήσεις τριβής, συγκολλήσεις με ακτίνες laser ή ακτίνες ηλεκτρονίων, υπερηχητικές συγκολλήσεις κ.α.

Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων

Τα συγκολλώμενα μέρη συνήθως περιλαμβάνουν περίπλοκη γεωμετρία και υπόκεινται σε μεγάλα θερμικά φορτία κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Είναι προφανές λοιπόν πως η γεωμετρικές παράμετροι θα επηρεάσουν τις ιδιότητες της συγκόλλησης. Την επιρροή αυτή μπορούμε να μελετήσουμε χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Θέματα στα οποία γίνεται εφαρμογή της ανάλυσης αυτής είναι: επιρροή του specimen length στην διάδοση ρωγμής λόγω ερπυσμού, επιρροή της γεωμετρίας της συγκόλλησης στην κόπωση της κατασκευής, επιρροή της γεωμετρίας της κόλλησης στην failure assessment curves.

Μεταφορά θερμότητας και ροή ρευστών στην συγκόλληση

Η μεταφορά μάζας και θερμότητας που λαμβάνει χώρα στην συγκόλληση καθώς και μικρο- και μακροφαινόμενα που επηρεάζουν τις ιδιότητες της κόλλησης είναι περίπλοκες διεργασίες και η σωστή μελέτη και κατανόηση αυτών απαραίτητη. Με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων μελετάμε θέματα όπως τα εξής: 2D & 3D ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας και των θερμικών τάσεων στην συγκόλληση, παραμορφώσεις ερπυσμού σε υψηλές θερμοκρασίες, καθορισμός των ιδιοτήτων των συγκολλώμενων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες, θερμική ανάλυση της συγκόλλησης με ηλεκτρικό τόξο, θερμική ανάλυση της συγκόλλησης δέσμης laser και ηλεκτρονίων, θερμοκρασιακή κατανομή σε συγκόλληση αντίστασης κ.α.

Παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις στις συγκολλήσεις

Επειδή η περιοχή της κόλλησης θερμαίνεται τοπικά από την πηγή θερμότητας της συγκόλλησης, οι θερμοκρασιακές της κατανομές δεν είναι ομοιόμορφες και μεταβάλλονται καθώς η συγκόλληση προχωρά. Οι παραμορφώσεις που γεννώνται κατά την διαδικασία αυτή συνοδεύονται από πλαστικό upsetting με αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμενουσών τάσεων στην περιοχή μετά το τέλος της συγκόλλησης. Επίσης εμφανίζονται συρρίκνωση και παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις σε συνδυασμό με τις παραμένουσες τάσεις προκαλούν σημαντικά προβλήματα στις συγκολλητές κατασκευές (ιδιαίτερα σε αυτές που είναι μεγάλων διαστάσεων) και αποτελούν βασικό παράγοντα για την δημιουργία ρωγμών (cracking fracture) στις κατασκευές. Μερικά

θέματα στα οποία μελετώνται οι παραμένουσες τάσεις με τα πεπερασμένα στοιχεία είναι: 2D & 3D ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων των παραμενουσών τάσεων, distortions και μικροδομή, επιρροή των παραμενουσών τάσεων στην θραύση και στην κόπωση, επιρροή των συνθηκών συγκόλλησης ως προς την εμφάνιση παραμενουσών τάσεων, παραμένουσες τάσεις σε συγκολλήσεις επισκευής, επίδραση της επαφής με νερό στις παραμένουσες τάσεις κ.α.

5.3 Θεωρητικό υπόβαθρο της τρισδιάστατης θερμο – μηχανικής (ελαστο – πλαστικής) ανάλυσης

Πολύπλοκες αριθμητικές προσεγγίσεις απαιτούνται για την ακριβή μοντελοποίηση της διαδικασίας της συγκόλλησης. Στην ανάλυση πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα: (1) την μεταφορά θερμότητας στην ραφή μέσω αγωγής και συναγωγής, (2) τις απώλειες θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας από τις επιφάνειες και (3) την αγωγή θερμότητας στο μέταλλο βάσης καθώς επίσης και την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής και συναγωγής με το περιβάλλον. Επιπλέον πρέπει να ληφθούν υπόψη το γεγονός ότι σε τόσο μεγάλες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας οι ιδιότητες του υλικού εξαρτώνται από αυτήν, καθώς επίσης και οι μετασχηματισμοί φάσης που λαμβάνουν χώρα στα υλικά.

Η διαδικασία της συγκόλλησης είναι μία συνδυασμένη θερμο – μηχανική διαδικασία (coupled thermo – mechanical process). Το θερμικό πεδίο επηρεάζει σημαντικά το πεδίο των παραμενουσών τάσεων. Από την άλλη, το πεδίο των τάσεων ελάχιστα επηρεάζει το θερμικό πεδίο. Γι' αυτό πέρα από την συζευγμένη (coupled) ανάλυση μπορεί να δουλέψει εξίσου καλά και η μη συζευγμένη (uncoupled) στην οποία βέβαια θα πρέπει να προηγηθεί η θερμική της μηχανικής.

Στην παρούσα εργασία το πακέτο των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί (MARC Mentat 2007r1) μας δίνει την δυνατότητα να προβούμε σε συζευγμένη θερμο – μηχανική ανάλυση έτσι ώστε να πάρουμε τα θερμοκρασιακά και τα τασιακά πεδία στην συγκόλληση. Στην συνέχεια παραθέτουμε το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία που θα γίνει στην συνέχεια.

Θερμική ανάλυση

Όταν ένας στοιχειώδης όγκος περικλείεται εντός αυθαίρετης επιφάνειας S , η σχέση ισορροπίας της ροής θερμότητας εκφράζεται από την σχέση:

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z, t) = \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (5.1)$$

όπου τα R_x, R_y, R_z είναι οι ρυθμοί της ροής θερμότητας ανά μονάδα όγκου στις τρεις διευθύνσεις, $Q(x, y, z, t)$ είναι ο ρυθμός της εσωτερικής παραγωγής θερμότητας, $T(x, y, z, t)$ είναι η τρέχουσα θερμοκρασία, ρ η πυκνότητα, C η ειδική θερμότητα και t η χρονική στιγμή. Το μοντέλο μπορεί να ολοκληρωθεί εισάγοντας στην παραπάνω εξίσωση την ροή θερμότητας κατά Fourier σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$R_x = -k_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.2.a)$$

$$R_y = -k_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (5.2.β)$$

$$R_z = -k_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.2.\gamma)$$

όπου k_x, k_y, k_z είναι οι θερμικές αγωγιμότητες κατά την x, y, z διεύθυνση αντίστοιχα.

Θεωρώντας πως η διαδικασία στο υλικό είναι μη γραμμική, προκύπτει ότι οι παράμετροι k_x, k_y, k_z, ρ, C κατά την διάρκεια της εξέλιξης της συγκόλλησης είναι μεγέθη σε συνάρτηση της θερμοκρασίας. Λαμβάνοντας υπόψη την διαπίστωση αυτή και εισάγοντας τελικά τις εξισώσεις (5.2.α), (5.2.β), (5.2.γ) στην εξίσωση (5.1) προκύπτει η μερική διαφορική εξίσωση μετάδοσης θερμότητας σε στερεό σώμα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q - \rho(T) \cdot C(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.3)$$

Η γενική λύση της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει θεωρώντας επιπλέον τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (\text{αρχική συνθήκη, 5.4})$$

$$k_x(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot N_x + k_y(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot N_y + k_z(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \cdot N_z + q_e = h_e \cdot (T - T_0) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_0^4)$$

(οριακή συνθήκη, 5.5)

όπου N_x, N_y, N_z τα συνημίτονα κατεύθυνσης σχεδιασμένα κάθετα στο σύνορο, h_e ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, q_e η συνοριακή ροή θερμότητας, T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος, σ η σταθερά Stefan – Boltzmann και ε συντελεστής ενεργού εκπομπής.

Η θερμότητα που διοχετεύεται στα τεμάχια κατά την συγκόλλησή τους μπορεί να διαχωριστεί σε δύο μέρη. Αυτό της θερμότητας που διοχετεύεται σε αυτά απευθείας από το ηλεκτρικό τόξο και αυτό της θερμότητας που μεταφέρεται σε αυτά μέσω του λουτρού του μετάλλου. Η θερμότητα από το ηλεκτρικό τόξο μπορεί να μοντελοποιηθεί με μία κατανομή Gauss, και αυτή από το τήγμα του μετάλλου με μία ογκομετρική πηγή θερμότητας. Η κατανομή της ροής θερμότητας στην επιφάνεια του τεμαχίου εντός της ακτίνας του ηλεκτρικού τόξου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q(r) = \frac{3 \cdot Q_1}{\pi \cdot r_0^2} \cdot e^{-(r/r_0)^2} \quad (5.6)$$

όπου r η ακτινική συντεταγμένη και Q_1 η θερμότητα προερχόμενη από το ηλεκτρικό τόξο, για την οποία είναι:

$$Q_1 = \eta \cdot A \cdot V - Q_2 \quad (5.7)$$

Στην εξίσωση 5.7, το η αναπαριστά τον βαθμό απόδοσης του ηλεκτρικού τόξου, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις λόγω ακτινοβολίας και άλλες απώλειες από το τόξο προς το περιβάλλον. Το A είναι το ρεύμα συγκόλλησης, το V είναι η τάση συγκόλλησης και το Q_2 η θερμότητα που μεταφέρεται μέσω του τήγατος και μοντελοποιείται σαν ογκομετρική πηγή θερμότητας με κατανεμημένη ροή (**Distributed heat FLUX, DFLUX**) που εισάγεται σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο στην περιοχή της ζώνης τήξης:

$$DFLUX = \frac{Q_2}{V_p} \quad (5.8)$$

όπου V_p θεωρείται ο όγκος της περιοχής της ζώνης τήξης και υπολογίζεται από τα γεωμετρικά στοιχεία της κόλλησης. Όπως θα δούμε και στην συνέχεια, η θερμότητα που προέρχεται από το ηλεκτρικό τόξο θεωρείται πως κυμαίνεται περίπου στο 60% του συνολικού ποσού θερμότητας και η θερμότητα που προέρχεται από το λουτρό του μετάλλου θεωρείται πως κυμαίνεται στο 40% του συνολικού ποσού θερμότητας. Ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού τόξου (η) διαφέρει κάθε φορά και εξαρτάται από την μέθοδο συγκόλλησης που θα χρησιμοποιηθεί.

Ιδιότητες υλικού

Από την στιγμή που στη διαδικασία της συγκόλλησης εμφανίζονται θερμοκρασιακοί κύκλοι που φτάνουν σε υψηλές θερμοκρασίες και οι ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από την θερμοκρασία, είναι προφανές πως στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων οι ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson) θα πρέπει να εισαχθούν σαν συναρτήσεις της θερμοκρασίας και όχι σαν μοναδικές τιμές.

Μηχανική ανάλυση

Το δεύτερο βήμα της ανάλυσης περιλαμβάνει την χρήση των δεδομένων που προέκυψαν από την θερμική ανάλυση που προηγήθηκε σαν δεδομένα εισόδου (θερμικό φορτίο) για την μηχανική ανάλυση. Όπως έχουμε προαναφέρει, λόγω του μετάλλου που χρησιμοποιήσαμε (μαλακός ανθρακοχάλυβας C45), κατά την διάρκεια της συγκόλλησης δεν λαμβάνουν χώρα φαινόμενα αλλαγής του όγκου τα οποία να οφείλονται σε μετασχηματισμό φάσεων του υλικού. Κατά συνέπεια τα όσα θα αναφερθούν στην συνέχεια μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων που εισάγονται λόγω της συγκόλλησης.

Σχέση μετατοπίσεων παραμορφώσεων

Η παραμόρφωση ενός πεπερασμένου στοιχείου μπορεί να γραφτεί ως ακολούθως:

$$\underline{\varepsilon} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_x \quad \gamma_y \quad \gamma_z]^T \quad (5.9.a)$$

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}_O + \underline{\varepsilon}_L \quad (5.9.b)$$

όπου $\underline{\varepsilon}_O$ και $\underline{\varepsilon}_L$ αναπαριστούν την μικρή και την μεγάλη παραμόρφωση αντίστοιχα και δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\underline{\varepsilon}_O = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_x \\ \gamma_y \\ \gamma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial w / \partial z \\ (\partial w / \partial y) + (\partial v / \partial z) \\ (\partial u / \partial z) + (\partial w / \partial x) \\ (\partial v / \partial x) + (\partial u / \partial y) \end{bmatrix} \quad (5.10.a)$$

$$\underline{\varepsilon}_L = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \\ 2 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \cdot \frac{\partial w}{\partial z}\right) \\ 2 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \cdot \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ 2 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y}\right) \end{bmatrix} \quad (5.10.\beta)$$

Είναι γνωστό πως η βηματική (incremental) μορφή της παραμόρφωσης $\underline{d\varepsilon}$ μπορεί να γραφτεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\underline{d\varepsilon} = [B] \cdot \underline{dw} \quad (5.11)$$

όπου $[B]$ είναι το μητρώο μετατοπίσεων – παραμορφώσεων.

Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων

Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\underline{d\sigma} = [D^{ep}] \cdot \underline{d\varepsilon} - [C^{th}] \cdot \underline{dT} \quad (5.12)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (5.13)$$

όπου $[D^e]$ είναι ο πίνακας της ελαστικής δυσκαμψίας, $[D^p]$ ο πίνακας της πλαστικής δυσκαμψίας και $[C^{th}]$ ο πίνακας «θερμικής ακαμψίας» ο οποίος δηλώνει την εξάρτηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού από την θερμοκρασία T .

Εξίσωση ισορροπίας

Εφαρμόζοντας το θεώρημα των δυνατών έργων (virtual work theorem) στην εξίσωση ισορροπίας μεταξύ κομβικών δυνάμεων και κομβικών μετατοπίσεων προκύπτει:

$$\underline{dF} + \underline{L} - \underline{dR} = [K] \cdot \underline{dw} \quad (5.14)$$

όπου $[K]$ το μητρώο δυσκαμψίας, \underline{dF} η στοιχειώδης ισοδύναμη κομβική φόρτιση λόγω εξωτερικών φορτίων, \underline{L} ο όρος διόρθωσης του φορτίου και \underline{dR} η ισοδύναμη κομβική φόρτιση λόγω της αλλαγής θερμοκρασίας.

Καταστρώνοντας της εξίσωση 5.14 για το σύνολο ενός μοντέλου και επιλύοντας τις γραμμικές ισοδύναμες εξισώσεις λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες, μπορούμε να πάρουμε τελικά την στοιχειώδη κομβική μετατόπιση \underline{dw} . Χρησιμοποιώντας αυτή και την σχέση μετατοπίσεων – παραμορφώσεων παίρνουμε την παραμόρ-

φωση και στην συνέχεια με τον καταστατικό νόμο (εξ. 5.12, σχέση τάσεων - παραμορφώσεων) να καταλήξουμε στις τάσεις. Το υλικό υποτίθεται πως ακολουθεί το κριτήριο von mises και τους σχετικούς νόμους ροής. Επίσης υποτίθεται πως ισχύει ο γραμμικός κινηματικός νόμος σκλήρυνσης.

5.4 Βασικές θεωρήσεις - παραδοχές

Όπως είναι προφανές η προσομοίωση της συγκόλλησης σε προγραμματιστικό περιβάλλον είναι αδύνατο να γίνει και να υπάρχει απόλυτη ταύτιση των συνθηκών και των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την συγκόλληση στο εργαστηριακό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό γίνονται κάποιες απλουστεύσεις – παραδοχές, οι οποίες μας επιτρέπουν να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο το πρωτογενές φαινόμενο (συγκόλληση στο εργαστήριο) καθώς επίσης και να έχουμε αποτελέσματα τα οποία να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Οι απλουστεύσεις – παραδοχές που θα υιοθετήσουμε είναι οι εξής:

- Η ροή μάζας (υλικού) από το ηλεκτρόδιο προς το τεμάχιο και από το ηλεκτρόδιο ή το τεμάχιο προς το περιβάλλον είναι μηδενική. Παρόλο που στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν ισχύει καθώς έχουμε προσθήκη υλικού στην περιοχή της ραφής και σίγουρα απώλεια κάποιου υλικού στο περιβάλλον, η παραδοχή αυτή θα γίνει διότι το πακέτο των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε για την μοντελοποίηση (αλλά και κανένα άλλο πακέτο της αγοράς) δεν προσφέρει την δυνατότητα να μοντελοποιηθεί η προσθήκη του υλικού στην ραφή. Εμείς λοιπόν, κατά την κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου, θα σχεδιάσουμε τα δύο τεμάχια μαζί με το υλικό της ραφής, σαν να ήταν δηλαδή ήδη ενωμένα και θα προσομοιώσουμε το κομμάτι εκείνο της συγκόλλησης που έχει να κάνει με την μετάδοση – μεταφορά θερμότητας στην περιοχή μέσω του ηλεκτροδίου το οποίο είναι και υπεύθυνο για την εμφάνιση των παραμενουσών τάσεων.
- Η ταχύτητα προώθησης του ηλεκτροδίου θεωρείται πρακτικά σταθερή, ίση με την ταχύτητα προώθησης του υλικού μέσω του καρουλιού που γίνει η μηχανή της συγκόλλησης.. Η τροχιά κίνησης του ηλεκτροδίου θεωρείται ευθύγραμμη και συμπίπτει με τον άξονα συμμετρίας της ραφής που είναι ίδιος με αυτόν του συνολικού μοντέλου. Να πούμε πως τα παραπάνω δεν συμπίπτουν πλήρως με την πραγματικότητα διότι ο χειριστής για να γεμίσει το αυλάκι της ραφής με υλικό κινεί το ηλεκτρόδιο ακολουθώντας πορεία κίνησης μη ευθύγραμμης μορφής (π.χ. σπειροειδούς, τεθλασμένης γραμμής ή άλλης μορφής).
- Η επαφή των δύο προς συγκόλληση ελασμάτων κάτω από την ραφή θεωρείται ιδανική, μηδενικής τραχύτητας και χωρίς την ενδιάμεση παρουσία ατμοσφαιρικού αέρα.
- Αγνοείται πιθανός μετασχηματισμός φάσεων του υλικού στην ζώνη της συγκόλλησης καθώς βάσει των δυνατοτήτων του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων είναι αδύνατο να μοντελοποιηθεί. Βέβαια να υπενθυμίσουμε σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα πως έχουμε φροντίσει να εξαλείψουμε την πιθανότητα εμφάνισης μετασχηματισμού φάσεων χρησιμοποιώντας υλικό (απλός χάλυβας) το οποίο σε αντίθεση με άλλα (π.χ. κραματωμένοι χάλυβες) δεν εμφανίζει μετασχηματισμούς φάσεων κατά την συγκόλλησή του. Άρα μπορούμε να πούμε πως η συγκεκριμένη παραδοχή ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

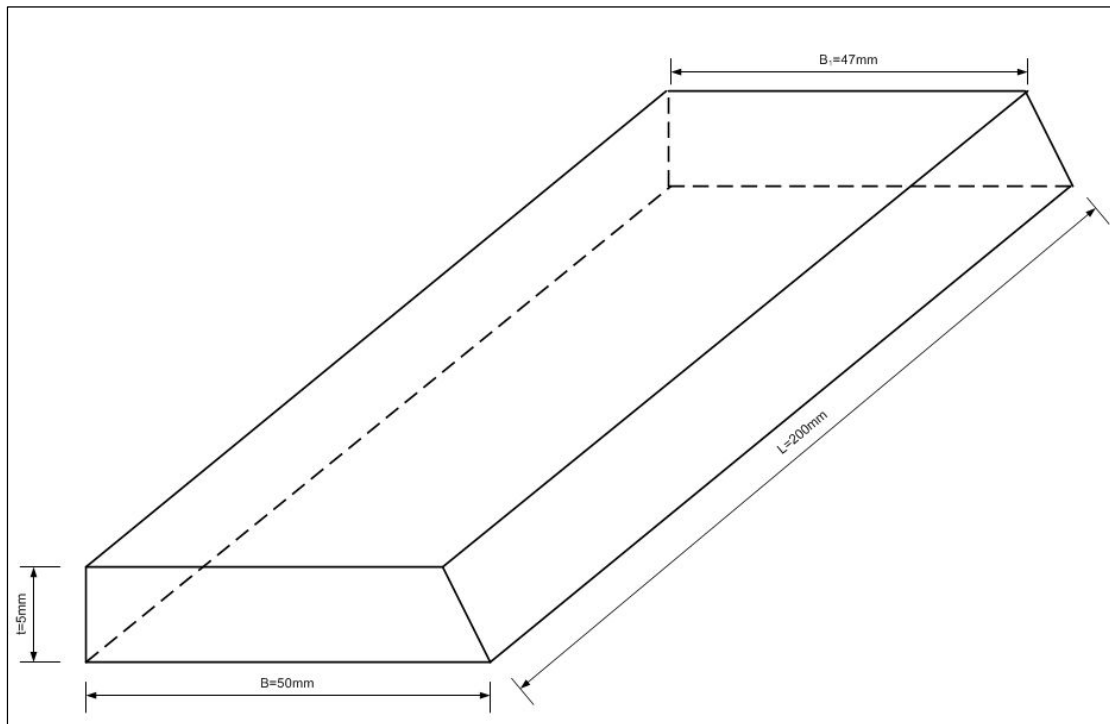
- Όλες οι επιφάνειες των συγκολλημένων ελασμάτων θεωρούνται λείες ενώ το ηλεκτρικό τόξο θεωρείται απολύτως σταθερό και ανεπηρέαστο από διαφόρων ειδών φαινόμενα όπως το μαγνητικό φύσημα.
- Όπως είδαμε στο πειραματικό κομμάτι, η συγκράτηση των τεμαχίων έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση έγινε με τρεις πολύ μικρές συγκολλήσεις – «τσιμπήματα» στον άγωνα επαφής μεταξύ των προς συγκόλλησης ελασμάτων. Στο στάδιο της μοντελοποίησης τα τρία «τσιμπήματα» θα μοντελοποιηθούν θεωρώντας τους κόμβους που βρίσκονται περίπου στην περιοχή που πραγματοποιήθηκαν αυτά πακτωμένους (δέσμευση μετατοπίσεων και ροπών και ως προς τις τρεις διευθύνσεις).
- Όπως είδαμε και κατά την ανάλυση της πρώτης παραδοχής, η μοντελοποίηση της συγκόλλησης σχετίζεται με την μοντελοποίηση των φαινομένων μεταφοράς – μετάδοσης θερμότητας η οποία προέρχεται από το ηλεκτρόδιο και διοχετεύεται στην περιοχή της ραφής μέσω του ηλεκτρικού τόξου. Πρέπει όμως να εξεταστεί μέσω ποιών διαδρομών η θερμότητα από το ηλεκτρόδιο καταλήγει στο τελικό τεμάχιο. Οι «διαδρομές» αυτές είναι τρεις. Η πρώτη είναι από το ηλεκτρόδιο στο υλικό της κόλλησης, η δεύτερη είναι από το ηλεκτρόδιο στο υλικό των ελασμάτων πλησίον της ραφής και η τρίτη από το υλικό της ραφής στο υλικό των ελασμάτων μέσω της επαφής τους. Για λόγους απλότητας και καλύτερης λειτουργίας του μοντέλου μας εμείς θα υποθέσουμε πως το σύνολο της θερμότητας από το ηλεκτρόδιο προσδίδεται στην ραφή αγνοώντας την θερμότητα που κατευθύνεται στην γειτονιά. Το συνολικό ποσό θερμότητας που παράγεται από το ηλεκτρόδιο θα διαμοιραστεί λοιπόν σε δύο τελικά κατευθύνσεις και στο πρόγραμμα θα εισαχθεί σαν ροή θερμότητας η ποσότητα της οποίας θα είναι προφανώς ένα ποσοστό της συνολικής. Όμως το ποσό της θερμότητας που θα εισαχθεί στην ροή κατά την τρίτη «διαδρομή» (υλικό ραφής προς υλικό ελάσματος) θα είναι μηδενικό καθώς η θερμότητα για την «διαδρομή» αυτή θα προέλθει από αυτή της πρώτης «διαδρομής» (δηλαδή από το ηλεκτρόδιο μέσω του υλικού της ραφής) και πραγματοποιείται αυτόματα από το ίδιο το πρόγραμμα.

5.5 Το *MARC Mentat*

Για την μοντελοποίηση, την ανάλυση και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το πακέτο μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων *MARC Mentat* της εταιρίας *MSC Software*. Πρόκειται για πακέτο που έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί φαινόμενα εντόνως μη γραμμικά όπως αυτά που λαμβάνουν χώρα κατά την διαδικασία της συγκόλλησης ενώ επιπλέον μας παρέχει την δυνατότητα συνδυασμένης ανάλυσης (coupled analysis) για τις δύο συνιστώσες του προβλήματος που είναι το θερμικό πρόβλημα (ροή θερμότητας λόγω της συγκόλλησης) και το μηχανικό πρόβλημα (γέννεση τάσεων λόγω ανισοκατανομών θερμοκρασίας και συστολών – διαστολών). Σε περίπτωση χρήσης κάποιου άλλου πακέτου θα ήμασταν υποχρεωμένοι να επιλύσουμε τα δύο προβλήματα ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του πρώτου (θερμικό πρόβλημα) ως δεδομένα αρχικών συνθηκών για το δεύτερο (μηχανικό πρόβλημα).

5.5.1 Κατασκευή γεωμετρίας & πλεγματοποίηση

Το πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης συνίσταται στην κατασκευή της γεωμετρίας και στην πλεγματοποίηση του τεμαχίου στο οποίο και θα μοντελοποιήσουμε την συγκόλληση. Η γεωμετρία του τεμαχίου που δημιουργήσαμε στο περιβάλλον του *MARC Mentat* βασίστηκε στην μορφή και το «εξιδανικευμένο» σχέδιο (το οποίο παραθέτουμε στην συνέχεια) των τεμαχίων που συγκολλήθηκαν στο πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Να σημειώσουμε πως χαρακτηρίζουμε το σχέδιο εξιδανικευμένο καθώς η λοξοτομή που έγινε στα τεμάχια πραγματοποιήθηκε με χειροκίνητο τροχό και κατά συνέπεια δεν μπορούμε να ισχυριστούμε πως έχει την ίδια και μάλιστα σταθερή κλίση τόσο κατά μήκος του ίδιου τεμαχίου όσο και ως προς το ζεύγος των τεμαχίων που συγκολλήθηκαν.



Εικόνα 5.1: «Εξιδανικευμένο» σχέδιο των προς συγκόλληση τεμαχίων στο οποίο βασίστηκε η κατασκευή της γεωμετρίας

Κατά την κατασκευή της γεωμετρίας στο περιβάλλον του *MARC Mentat* είχαμε να αντιμετωπίσουμε ένα μικρό πρόβλημα με την αδειοδότηση του προγράμματος το οποίο δεν μας επέτρεπε να κατασκευάσουμε απευθείας στερεό. Αυτό τροποποίησε την διαδικασία κατασκευής του μοντέλου μας. Αρχικά λοιπόν, τοποθετώντας σημεία και παρεμβάλλοντας ευθείες ανάμεσα σε αυτά, κατασκευάσαμε την διατομή του ενός τεμαχίου και χρησιμοποιώντας εντολή συμμετρίας κατασκευάσαμε και την διατομή του άλλου. Εισάγοντας μία επιπλέον καμπύλη σχηματίζουμε τελικά την διατομή του τεμαχίου μετά την συγκόλληση που περιλαμβάνει τα δύο ελάσματα και την ραφή. Η σειρά εντολών καθώς και τα σχήματα που αποτυπώνουν τον σταδιακό σχηματισμό της γεωμετρίας παρατίθενται στην συνέχεια (όπως άλλωστε θα γίνεται και μετά από τη παρουσίαση του κάθε βήματος της μοντελοποίησης).

MESH GENERATION

POINTS_ADD (εισάγουμε τις συντεταγμένες των σημείων που «οριοθετούν» την διατομή στη μονάδα που εμείς θέλουμε, εδώ σε mm)

Point No1: X_0 Y_0 Z_0

Point No2: X_50 Y_0 Z_0

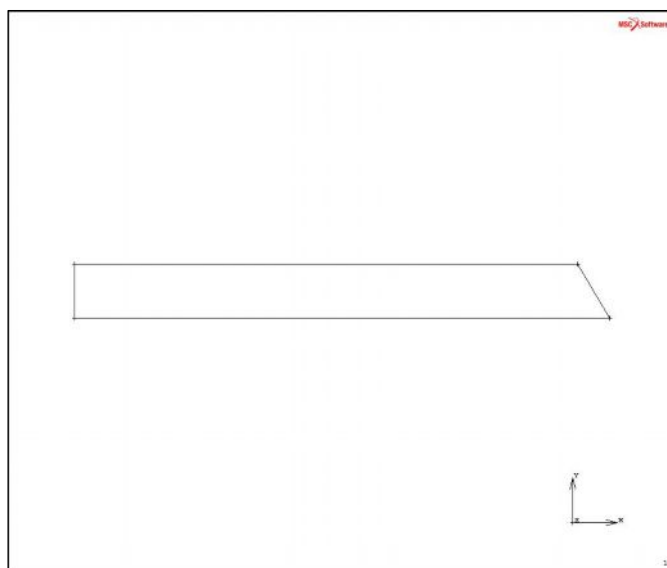
Point No3: X_0 Y_5 Z_0

Point No4: X_47 Y_5 Z_0

CURVE_TYPE_LINE (επιλέγουμε τον τύπο τις καμπύλης που θα παρεμβάλουμε στα σημεία και με την οποία θα σχηματίσουμε την διατομή)

CURVES_ADD (εισάγουμε τις ευθείες επιλέγοντας με το ποντίκι κάθε φορά τα δύο ακραία σημεία για κάθε περίπτωση)

Έτσι κατασκευάζουμε τελικά την διατομή του ενός τεμαχίου



Εικόνα 5.2: Η διατομή του προς συγκόλληση τεμαχίου

Βρισκόμενοι ακόμα στο μενού MESH GENERATION με χρήση της επιλογής συμμετρίας θα δημιουργήσουμε και το συμμετρικό τεμάχιο (είναι προφανές πως ο άξονας συμμετρίας είναι ο διαμήκης άξονας της ραφής). Κατόπιν, με την προσθήκη μίας επιπλέον καμπύλης, θα δημιουργήσουμε την διατομή όλου του συνόλου, το οποίο περιλαμβάνει τα δύο τεμάχια και την ραφή.

MESH GENERATION

SYMMETRY

SYMMETRY_PLANE_POINT (επιλέγουμε με το ποντίκι το σημείο με συντεταγμένες X_50 Y_0 Z_0)

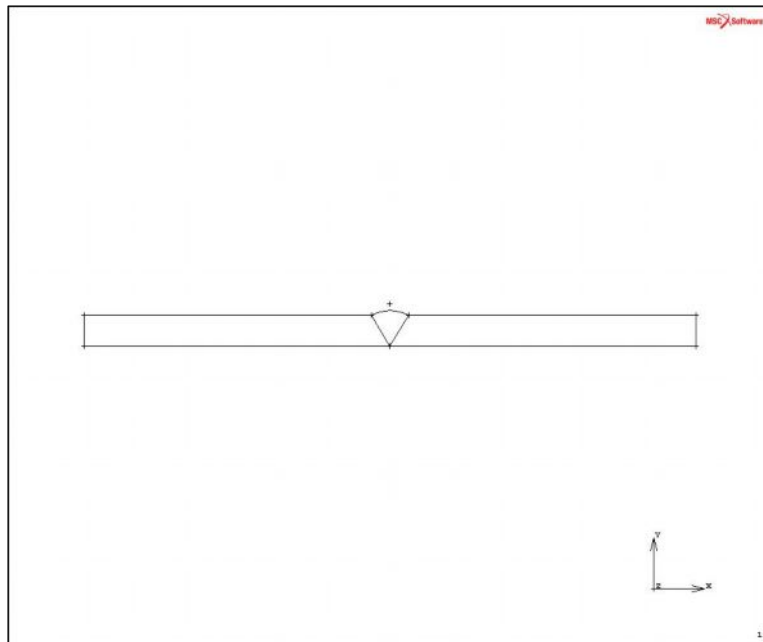
SYMMETRY_ALL:EXISTING (δίνουμε εντολή να σχηματιστεί η συμμετρική γεωμετρία επιλέγοντας να γίνει αυτό με ό,τι υπάρχει στην οθόνη)

RETURN

CURVE_TYPE_arcs: CENTER/POINT/POINT (τοποθετώντας μία καμπύλη τύπου τόξο κύκλου ανάμεσα στα δύο τεμάχια θα σχηματίσουμε την διατομή της ραφής στην θεωρητική της μορφή. Το τόξο αυτό λοιπόν, βάσει της επιλογής μας, σχεδιάζεται δίνοντας στο πρόγραμμα το κέντρο του κύκλου στον οποίο ανήκει το τόξο καθώς και την αρχή και το πέρας αυτού)

CURVES_ADD (επιλέγουμε το σημείο X_50 Y_0 Z_0 ως κέντρο του κύκλου, το σημείο X_53 Y_5 Z_0 ως αρχή και το σημείο X_47 Y_5 Z_0 ως πέρασ του τόξου)

Έτσι κατασκευάζουμε τελικά την διατομή του συνόλου (τεμάχιο 1, τεμάχιο 2, ραφή)



Εικόνα 5.3: Η διατομή του συνόλου, αποτελούμενου από τα δύο τεμάχια και την ραφή μετά την συγκόλληση

Η κατασκευή της γεωμετρίας της διατομής και όχι κατευθείαν ολόκληρου του συνόλου υπό μορφή στερεού σχετίζεται με το πρόβλημα που προαναφέραμε σχετικά με την αδειοδότηση του πακέτου που δεν μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε γεωμετρία στερεού. Βέβαια όπως είναι προφανές, για την μοντελοποίηση του προβλήματός μας, απαιτείται η δημιουργία τέτοιας γεωμετρίας. Αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, θα επιτευχθεί μέσω της διατομής που κατασκευάσαμε, την οποία αφού πλεγματοποιήσουμε, θα «επεκτείνουμε» προς μία διεύθυνση χρησιμοποιώντας κατάλληλη εντολή του MARC Mentat (expand) κατασκευάζοντας τελικά το στερεό που θέλουμε έχοντας το ταυτόχρονα πλεγματοποιημένο. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε πως η διαδικασία που περιγράψαμε για την κατασκευή της τελικής πλεγματοποιημένης γεωμετρίας στερεού ακολουθείται και στο παράδειγμα για συγκόλληση (Arc welding process simulation) που παρουσιάζεται στον οδηγό χρήσης (user's guide) του MARC Mentat το οποίο και απετέλεσε τον βασικό μας οδηγό για την μοντελοποίηση του προβλήματός μας Για την πλεγματοποίηση της διατομής εργαζόμαστε ως εξής:

MESH GENERATION AUTOMESH

preliminary: CURVE DIVISIONS (για να γίνει η πλεγματοποίηση ενός διδιάστατου χωρίου όπως είναι αυτό της διατομής θα πρέπει πρώτα να διακριτοποιηθούν οι γεωμετρικές οντότητες που το οριοθετούν. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να διαμερίσουμε τις ευθείες που σχηματίζουν την διατομή του συνόλου μας)

type: FIXED # DIVISIONS

DIVISIONS_ (στο σημείο αυτό εισάγουμε τον αριθμό των διαμερίσεων που επιθυμούμε. Γενικά θα επιλέξουμε τέτοιο πλήθος διαμερίσεων έτσι ώστε κάθε διαμέριση να έχει μήκος ίσο με 1mm)

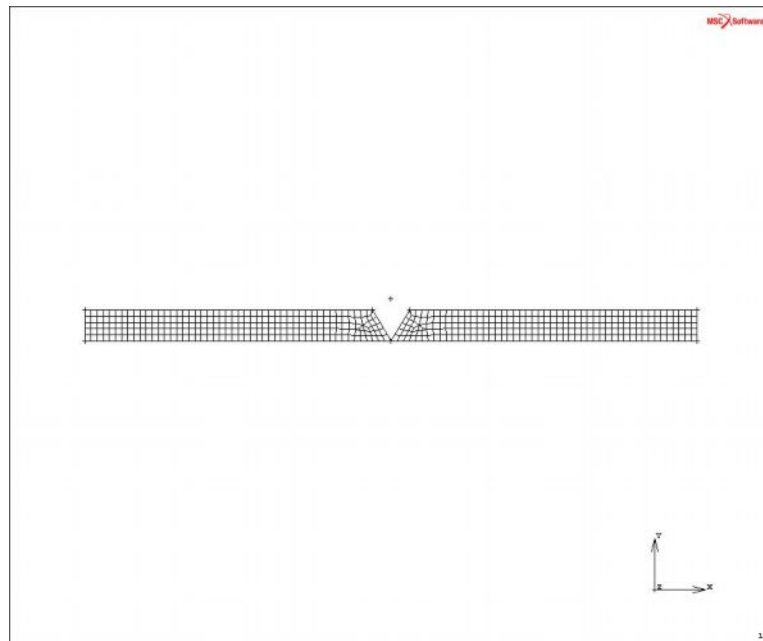
APPLY CURVE DIVISIONS (επιλέγουμε με τον ποντίκι της ευθείες τις οποίες θέλουμε να διαμερίσουμε βάσει του αριθμού των διαμερίσεων που επιλέξαμε παραπάνω)

RETURN

choose: 2D PLANAR MESHING

quadrilaterals (adv frnt): QUAD MESH! (κατόπιν επιλέγουμε με το ποντίκι τις καμπύλες που οριοθετούν το χωρίο που θέλουμε να πλεγματοποιήσουμε και προηγουμένως έχουμε διαμερίσει. Την διαδικασία αυτή εκτελούμε δύο φορές μία για την διατομή του κάθε τεμαχίου)

Έτσι παίρνουμε το παρακάτω σχήμα με πλεγματοποιημένες τις δύο διατομές των συγκολλημένων τεμαχίων. Να σημειώσουμε εδώ πως η επιλογή της πλεγματοποίησης με τετραπλευρικά στοιχεία επιλέχθηκε σε συμφωνία με ότι ακολουθείται στο παράδειγμα του marc user's guide για την κατασκευή της solid γεωμετρίας, ενώ η πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή ο αριθμός των διαμερίσεων κάθε καμπύλης, αποφασίστηκε από εμάς.



Εικόνα 5.4: Οι διατομές των δύο τεμαχίων πλεγματοποιημένες

Η πλεγματοποίηση της διατομής της ραφής απαιτεί λίγη περισσότερη προσοχή καθώς έχουμε δύο δυνατότητες. Η μία είναι να ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με την οποία πλεγματοποιήσαμε τα υπόλοιπα χωρία της συνολικής διατομής μας, δηλαδή να διαμερίσουμε τα σύνορα της διατομής της ραφής και κατόπιν να προβούμε σε αυτόματη πλεγματοποίηση αυτής. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής:

MESH GENERATION

AUTOMESH

preliminary: CURVE DIVISIONS

type: FIXED # DIVISIONS

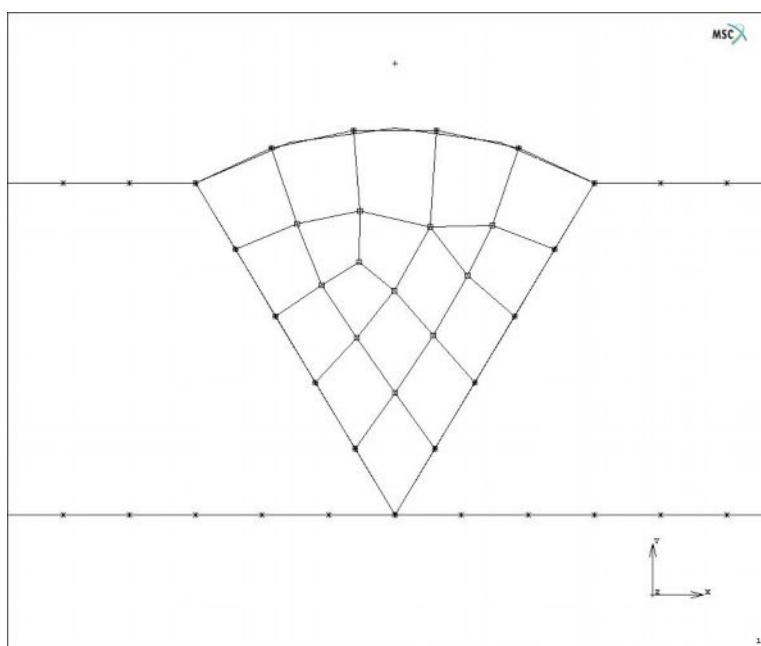
DIVISIONS_ (στο σημείο αυτό εισάγουμε τον αριθμό των διαμερίσεων που επιθυμούμε)

APPLY CURVE DIVISIONS (επιλέγουμε με τον ποντίκι την τρίτη γεωμετρική οντότητα που οριοθετεί την διατομή της ραφής, δηλαδή το τόξο κύκλου το οποίο προηγουμένως δεν διαμερίστηκε)

RETURN

choose: 2D PLANAR MESHING

quadrilaterals (adv frnt): QUAD MESH! (επιλέγουμε τις δύο ευθείες και την καμπύλη που ορίζουν την διατομή της γεωμετρικής οντότητας)



Εικόνα 5.5: Πρώτη δυνατότητα πλεγματοποίησης της διατομής της ραφής

Όπως βλέπουμε, παίρνουμε ένα αρκετά καλό πλέγμα το οποίο μπορεί να αποτελέσει μία επιλογή για την μοντελοποίηση.

Η δεύτερη δυνατότητα που έχουμε είναι να ακολουθήσουμε την διαδικασία του παραδείγματος του marc user's guide στο οποίο η διατομή της ραφής κατασκευάζεται «χειροκίνητα» τοποθετώντας τους κόμβους στο εσωτερικό του χωρίου με αντιγραφή των κόμβων των συνόρων και κατόπιν τοποθετώντας «χειροκίνητα» τα πεπερασμένα στοιχεία με επιλογή των αντίστοιχων κόμβων. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής:

MESH GENERATION

DUPLICATE

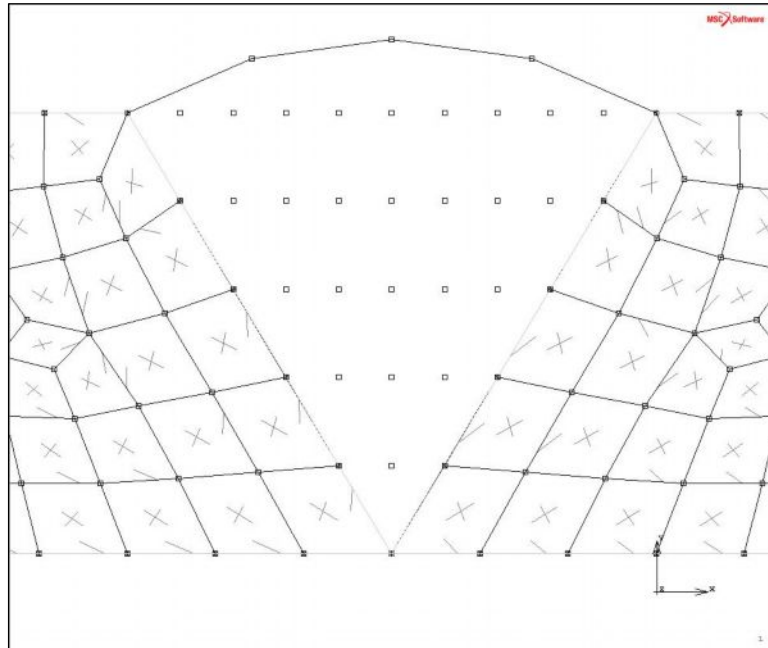
TRANSLATIONS: X, Y and Z: 0_1_0 (επιλέγουμε την νέα θέση του κόμβου που θα τοποθετήσουμε σε σχέση με την θέση του κόμβου που επιλέγουμε για αντιγραφή. Η επιλογή Y=1 έχει να κάνει με την πυκνότητα της πλεγματοποίησης που θα ακολουθήσουμε)

DUPLICATE (επιλέγουμε με το ποντίκι τους κόμβους που κάθε φορά θα αντιγράψουμε δημιουργώντας σταδιακά το πλέγμα των κόμβων στην περιοχή της ραφής)

RETURN

NODES_ADD (τοποθετούνται με το ποντίκι οι κόμβοι στο τρίτο σύνορο της διατομής της ραφής το οποίο σε αυτή την διαδικασία δεν έχει διαμεριστεί)

Προκύπτει λοιπόν η ακόλουθη κατανομή των κόμβων στο εσωτερικό της διατομής της ραφής:



Εικόνα 5.6: Κατανομή των κόμβων στο εσωτερικό της διατομής της ραφής με την δεύτερη δυνατότητα μοντελοποίησής της

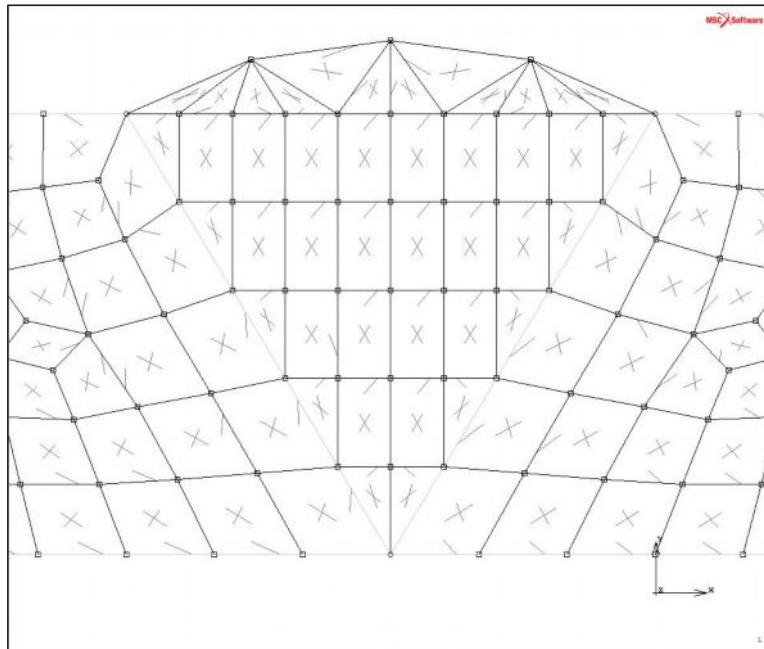
Στην συνέχεια, η τοποθέτηση των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται ως εξής (να σημειωθεί ότι λόγω της μορφής της διατομής απαιτείται η τοποθέτηση τόσο τριγωνικών όσο και τετραπλευρικών πεπερασμένων στοιχείων):

MESH GENERATION

ELEMENT CLASS

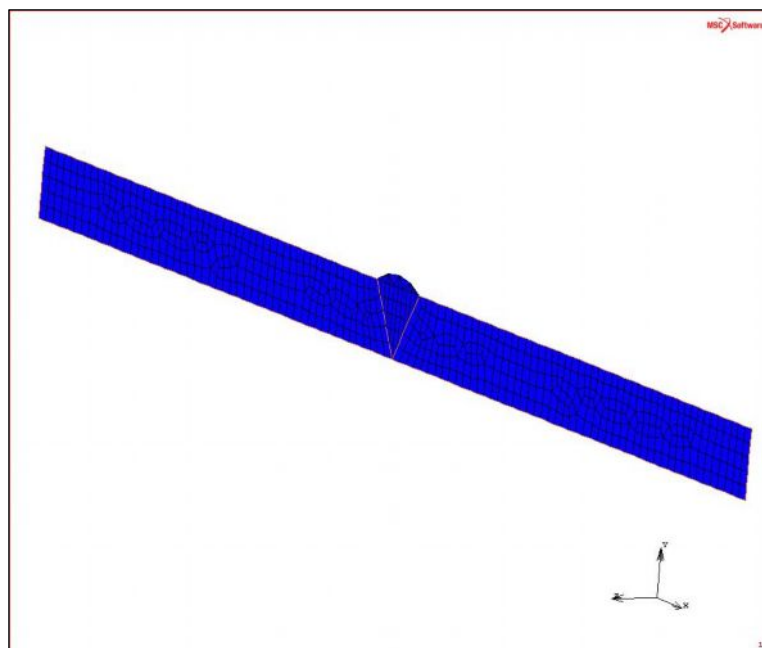
classes: TRIA(3) / QUAD(4) (επιλέγω το είδος του πεπερασμένου στοιχείου ανάλογα με την θέση όπου το τοποθετώ)

ELEMENTS_ADD (επιλέγω με το ποντίκι τους κόμβους στους οποίους κάθε φορά εισάγω το πεπερασμένο στοιχείο προσέχοντας να γίνει αυτό με φορά αριστερόστροφη)

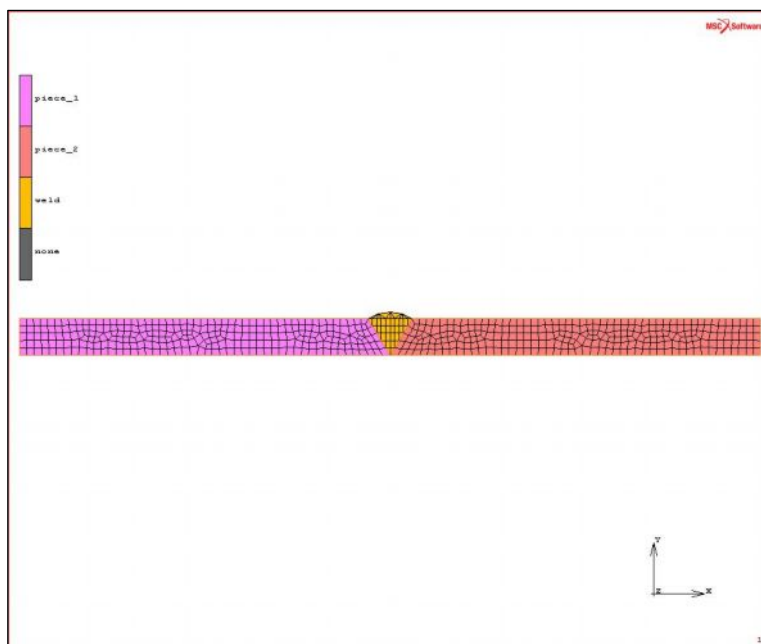


Εικόνα 5.6: Δεύτερη δυνατότητα μοντελοποίησης της διατομής της ραφής

Τώρα λοιπόν έχουμε πλεγματοποιήσει την διατομή του συνόλου (τεμάχια 1 & 2 και ραφή) και είμαστε έτοιμοι να δημιουργήσουμε την solid δομή του συγκολλημένου συνόλου «επεκτείνοντας» την πλεγματοποιημένη διατομή κατά την τρίτη διεύθυνση. Προτού το κάνουμε αυτό παραθέτουμε μία πιο αντιπροσωπευτική - κατανοητή εικόνα της πλεγματοποιημένης διατομής, ενώ πρέπει να επισημάνουμε ακόμη πως μετά από κάθε πλεγματοποίηση (διατομής τεμαχίων 1 & 2 και ραφής) τα αντίστοιχα πεπερασμένα στοιχεία καταχωρούνταν σε ομάδες (piece_1, piece_2, weld) έτσι ώστε στη συνέχεια της μοντελοποίησης να μπορούμε να τα χειριστούμε ευκολότερα.



Εικόνα 5.7: Η πλεγματοποιημένη διατομή του συγκολλημένου συνόλου



Εικόνα 5.8: Η ομαδοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων (χρωματικός διαχωρισμός)

Εκτός από την γενική ομαδοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων που φαίνεται στην εικόνα 5.8 κάνουμε μία επιπλέον ομαδοποίηση στα στοιχεία της κόλλησης (weld) διαχωρίζοντας τα σε δύο ομάδες, μία αυτή των τετραγώνων (squares) και μία αυτή των τριγώνων (triangles). Αυτό γίνεται έτσι ώστε στο τέλος της ανάλυσης και πριν την επίλυση του μοντέλου να γίνει εύκολα η καταχώρηση των πεπερασμένων στοιχείων (element types) στην γεωμετρία μας.

Για την δημιουργία της solid γεωμετρίας του συγκολλημένου συνόλου ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

MESH GENERATION

EXPAND

TRANSLATION: X=_, Y=_, Z=_ (δίνουμε την διεύθυνση της μετατόπισης – επέκτασης καθώς και πόσο θα μετατοπιστούν τα στοιχεία που θα επιλέξουμε)

REPETITIONS (δίνουμε τον αριθμό των επαναλήψεων που θα γίνει η μετατόπιση που δηλώσαμε παραπάνω)

mode: SHIFT

EXPAND: ELEMENTS: all: EXISTING

PLOT

elements: τσεκάρουμε την επιλογή SOLID

REGEN

Μετά από αυτή την διαδικασία παίρνουμε τελικά την solid γεωμετρία του συγκολλημένου συνόλου η οποία φαίνεται στο επόμενο σχήμα σε συνδυασμό με την ομαδοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων. Να σημειώσουμε πως με κατάλληλη ρύθμιση των επιλογών μας στο τελευταίο αυτό στάδιο (EXPAND) καθορίζουμε ποια θα είναι η πυκνότητα του πλέγματος κατά την τρίτη διάσταση (διεύθυνση z) στην solid γεωμετρία. Προτού προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια της μοντελοποίησης θα πρέπει να προβούμε σε κάποιες ενέργειες που έχουν να κάνουν με διαγραφή των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της γεωμετρίας και τώρα δεν

χρειάζονται (points & curves), συγχώνευση και διαγραφή περιττών στοιχείων και κόμβων οι οποίοι δημιουργήθηκαν κατά την «επέκταση» (EXPAND) του μοντέλου μας καθώς επίσης και με εκ νέου αρίθμηση των διαφόρων στοιχείων (κόμβοι, πεπερασμένα στοιχεία). Εφόσον μετά την επέκταση (expand) του μοντέλου μας έχουμε περάσει σε 3-D γεωμετρία θα πρέπει να διαγραφούν τα πεπερασμένα στοιχεία κλάσης TRIA(3) & QUAD(4) τα οποία δημιουργήθηκαν κατά την πλεγματοποίηση της διατομής και παρέμειναν μετά την επέκταση (expand). Τα στοιχεία αυτά εάν παραμείνουν θα δημιουργήσουν πρόβλημα καθώς πρόκειται για 2-D στοιχεία τα οποία θα λάβουν μέρος σε 3-D ανάλυση. Για την διαγραφή τους θα τα ομαδοποιήσουμε και κατόπιν θα τα διαγράψουμε ως ένα set. Η διαδικασία έχει ως εξής:

MESH GENERATION

SELECT

SELECT BY: elements: BY CLASS: TRIA(3) & QUAD(4)

elements: STORE: not_needed

all: SELECTED

RETURN

elements: REMOVE: SET: not_needed

Η διαγραφή των σημείων (points) και των γραμμών (lines) γίνεται από το αρχικό μενού του mesh generation ως εξής:

MESH GENERATION

points: REMOVE: all: EXISTING

curves: REMOVE: all: EXISTING

Η διαγραφή και συγχώνευση διπλών και περιττών κόμβων, καθώς και η εκ νέου αρίθμηση των στοιχείων που τελικά παραμένουν για να αποτελέσουν το μοντέλο μας, γίνεται ως εξής:

MESH GENERATION

SWEEP

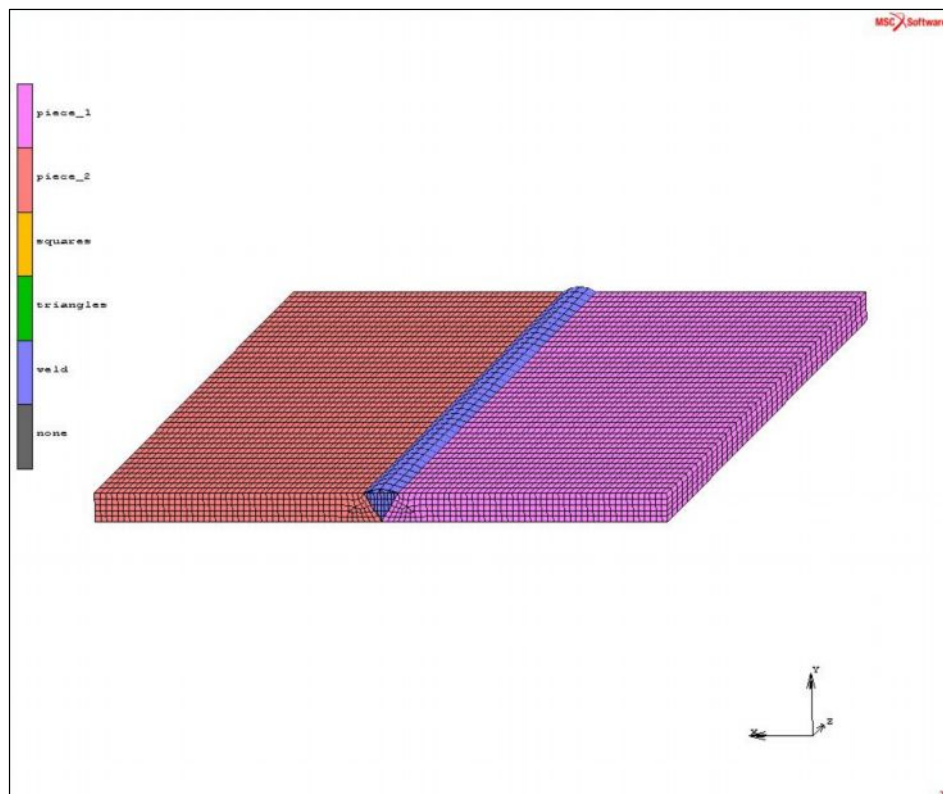
sweep: ALL (αφήνουμε το tolerance στην default τιμή του)

remove unused: POINTS, NODES

RETURN

RENUMBER

renumber: ALL



Εικόνα 5.9: Το τελικό πλέγμα για την solid γεωμετρία με την ομαδοποίηση

5.5.2 Καταχώρηση γεωμετρικών ιδιοτήτων για τα solid στοιχεία (geometric properties)

Ακολουθώντας πιστά την διαδικασία του παραδείγματος του marc user's guide θα καταχωρήσουμε γεωμετρική ιδιότητα σταθερής θερμοκρασίας (constant temperature) στα solid στοιχεία. Η διαδικασία έχει ως εξής:

GEOMETRIC PROPERTIES

mechanical elements: 3-D

name: solid_geom_prop

geometric property type: SOLID

element technology: CONSTANT TEMPERATURE

elements: ADD: ALL EXISTING (μέσω του IDENTIFY μπορούμε να ελέγξουμε για τυπικούς λόγους εάν η geometric property καταχωρήθηκε στο μοντέλο μας)

5.5.3 Καταχώρηση υλικού στο μοντέλο (material properties)

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα τεμάχια που συγκολλήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία είναι κατασκευασμένα μαλακό ανθρακοχάλυβα C45 κατά DIN 17200. Το υλικό αυτό θα εισαχθεί στο μοντέλο μας από την έτοιμη βιβλιοθήκη υλικών που μας παρέχει το πρόγραμμα. Επίσης θα πρέπει να καταχωρήσουμε και τύπο υλικού για την ραφή. Η διαδικασία καταχώρησης των υλικών έχει ως εξής:

MATERIAL PROPERTIES

MATERIAL PROPERTIES

READ

C45 (επιλέγω το υλικό που θέλω για τα ελάσματα)

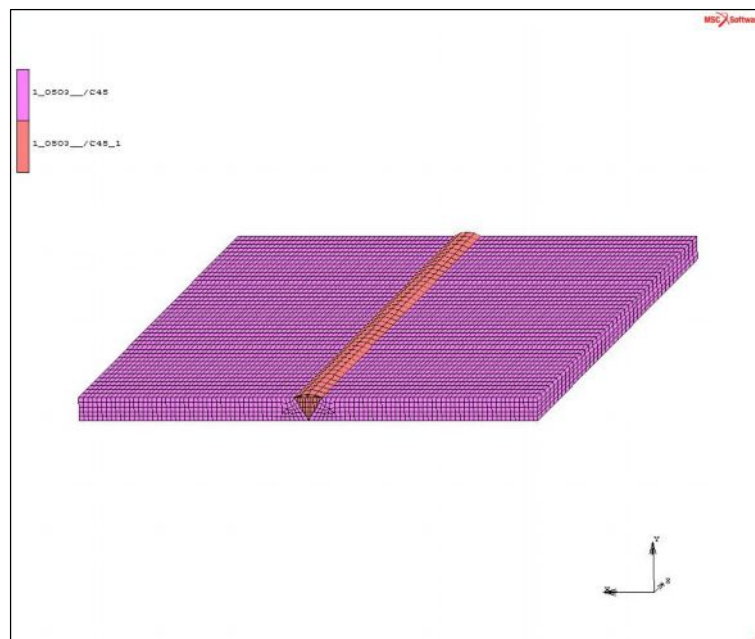
elements: ADD: SET: piece1, piece2

NEW

READ

C45 (επιλέγω το υλικό που θέλω για την ραφή)

elements: ADD: SET: weld (και πάλι μπορώ να ελέγξω εάν τα υλικά αντιστοιχηθήκαν στα πεπερασμένα στοιχεία που θέλω μέσω του IDENTIFY όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα)



Εικόνα 5.10: Αντιστοίχιση υλικών στο μοντέλο

5.5.4 Εισαγωγή των αρχικών συνθηκών (*initial & boundary conditions*)

Στο σημείο αυτό θα εισάγουμε στο μοντέλο μας τις απαραίτητες αρχικές συνθήκες που επικρατούν προτού αρχίσει να γίνεται η συγκόλληση. Οι συνθήκες αυτές έχουν να κάνουν τόσο με το θερμικό πρόβλημα (αρχική θερμοκρασία τεμαχίου η οποία θα εισαχθεί σε κόμβους και επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας – εισαγωγή συντελεστή μετάδοσης θερμότητας) όσο και με το μηχανικό (περιορισμοί κίνησης – συγκράτηση τεμαχίου που εισάγονται σαν οριακές – boundary συνθήκες). Να υπενθυμίσουμε πως η συγκράτηση που έχουμε κάνει στο τεμάχιο είναι τα τρία «τσιμπήματα» που έγιναν στα τεμάχια πριν πραγματοποιηθεί η συγκόλληση (δες κεφάλαιο 4 εικόνα). Η συγκράτηση αυτή θα μοντελοποιηθεί με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας των κόμβων που βρίσκονται στις περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις συγκράτησης. Αρχικά θα εισάγουμε τις αρχικές θερμικές συνθήκες και κατόπιν τις μηχανικές ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

INITIAL CONDITIONS

THERMAL

Initial condition type: TEMPERATURE
TEMPERATURE (TOP): (εισάγουμε την τιμή της θερμοκρασίας που επικρατεί πριν την συγκόλληση και την οποία θεωρούμε πως έχουν και τα τεμάχια)
nodes: ADD: ALL EXISTING
RETURN

RETURN

BOUNDARY CONDITIONS

NEW

NAME: (δίνουμε το όνομα που επιθυμούμε)

MECHANICAL

FIXED DISPLACEMENT

DISPLACEMENT X: 0

DISPLACEMENT Y: 0

DISPLACEMENT Z: 0

nodes: ADD (με την βοήθεια του ποντικιού ή σχεδιάζοντας το μοντέλο μας σε μορφή wireframe επιλέγουμε με όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση τους κόμβους που βρίσκονται στην περιοχή όπου έγιναν τα «τσιμπήματα»)

RETURN

THERMAL

NEW

NAME: (δίνουμε το όνομα που επιθυμούμε)

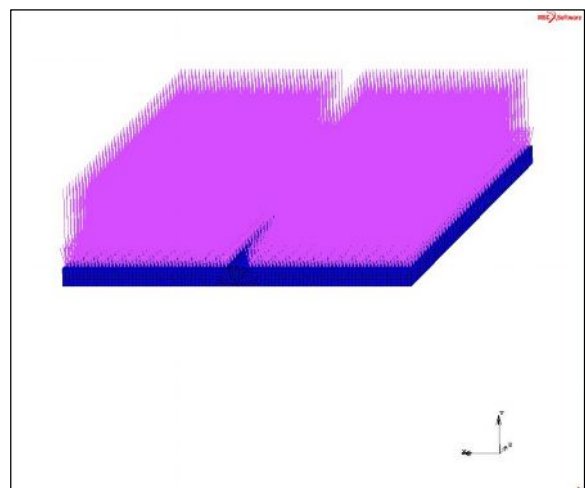
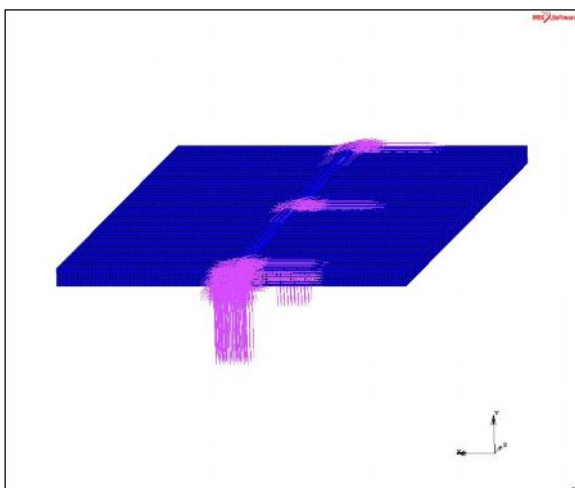
FACE FILM

FILM

AMBIENT TEMPERATURE: (εισάγουμε την θερμοκρασία περιβάλλοντος, ίδια τιμή με αυτή που επιλέξαμε στην initial thermal conditions)

FILM COEFFICIENT: (εισάγουμε τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας)

Εφόσον τοποθετήσουμε όλες τις οριακές συνθήκες (boundary conditions) μπορούμε να τις δούμε επαληθεύοντας μέσω του IDENTIFY.



Εικόνες 5.11 & 5.12: Οι οριακές συνθήκες συγκράτησης και απώλειας θερμότητας

5.5.5 Εισαγωγή των φορτίσεων

Η φόρτιση που θα μοντελοποιήσουμε στο σημείο αυτό είναι η ροή θερμότητας μέσω του ηλεκτροδίου προς το συγκολλημένο σύνολο που αποτελείται από τα δύο τεμάχια και την ραφή. Όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές παραπάνω η θερμότητα που διοχετεύεται από το ηλεκτρόδιο χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα το οποίο κατευθύνεται απευθείας στην ραφή και ένα που κατευθύνεται απευθείας στα τεμάχια στην περιοχή που βρίσκεται στην γειτονία της ραφής. Για λόγους απλότητας και καλύτερης λειτουργίας του μοντέλου μας θα υποθέσουμε πως το σύνολο της προσδιδόμενης από το ηλεκτρόδιο θερμότητας αποδίδεται απευθείας στην ραφή μέσω της επιφάνειάς της. Η ροή της θερμότητας υλοποιείται σαν μία πηγή θερμότητας μέτρου που θα υπολογιστεί από τα πειραματικά δεδομένα τάσης και έντασης ρεύματος της συγκόλλησης η οποία μετακινείται κατά μήκος της ραφής σύμφωνα με την ταχύτητα που μετρήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Στο περιβάλλον του προγράμματος θα ορίσουμε μία συνάρτηση χρόνου η οποία θα πολλαπλασιάζεται με την τιμή της θερμότητας και θα είναι ενεργή την χρονική στιγμή που θέλουμε και ανενεργή τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές. Η συνάρτηση αυτή θα προβλέπει και ένα χρονικό διάστημα ικανό για την απόψυξη του τεμαχίου και πολλαπλασιασμένη με την τιμή της θερμότητας θα αποτελεί την ροή θερμότητας την οποία θα εισάγουμε στην επιφάνεια των πεπερασμένων στοιχείων που αντιστοιχεί κάθε φορά. Σύμφωνα με τα όσα έχουμε καταγράψει κατά την πειραματική διαδικασία είναι για το ρεύμα συγκόλλησης $I_{\Sigma\Gamma\text{K}} = 166\text{A}$, για την τάση συγκόλλησης $V_{\Sigma\Gamma\text{K}} = 21.1\text{V}$, και η διάμετρος του ηλεκτροδίου 1mm ενώ με δική μας χρονομέτρηση είχαμε $t_{\Sigma\Gamma\text{K}} \cong 40\text{sec}$. Από τα παραπάνω μπορούμε να έχουμε μία αρκετά καλή προσέγγιση της «εξιδανικευμένης» γραμμικής ταχύτητας του ηλεκτροδίου της διαδικασίας διαιρώντας την τιμή της διαδρομής που ακολουθεί το ηλεκτρόδιο (πρακτικά ίση με το μήκος των τεμαχίων) με τον χρόνο συγκόλλησης. Έτσι για $t_{\Sigma\Gamma\text{K}} \cong 40\text{sec}$ και για διαδρομή ηλεκτροδίου 200mm παίρνουμε τελικά την μέση ταχύτητα συγκόλλησης $u_{\Sigma\Gamma\text{K}} \cong 5\text{mm}/\text{sec}$ την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε για την μοντελοποίηση. Η ταχύτητα αυτή, μου δίνει πρακτικά ανά πόσα χιλιοστά θα επιλέγω τις επιφάνειες όπου θα εισάγω την ροή θερμότητας στο τεμάχιο στην μονάδα του χρόνο και τελικά ποια θα πρέπει να είναι η διακριτοποίηση της solid γεωμετρίας που θα επιλέξω κατά το expanding έτσι ώστε να έχω «βολικό» αριθμό στοιχειωδών τμημάτων του στερεού και άρα «βολικό» αριθμό επιφανειών της ραφής στις οποίες θα εισάγω την ροή θερμότητας σε κάθε χρονική στιγμή. Το ποσό θερμότητας βάσει των παραπάνω στοιχείων υπολογίζεται από την σχέση $Q = \eta \cdot V \cdot I$ όπου V η τάση συγκόλλησης σε volts, I το ρεύμα συγκόλλησης σε amperes και η ένας βαθμός απόδοσης που σχετίζεται με την μέθοδο με την οποία υλοποιείται η κόλληση (συνιστώμενη τιμή για MIG $\eta = 0.9$). Η παραπάνω σχέση μας δίνει το ποσό θερμότητας σε watts δηλαδή τελικά σε $\text{N} \cdot \text{m}/\text{sec}$ το οποίο προκύπτει

$$Q = \eta \cdot V \cdot I = 0.9 \cdot 21.1 \cdot 166 = 3152.34 \text{watts} = 3152.34 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{sec}}$$

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στην επιλογή για την πηγή θερμότητας κατά την επίλυση του μοντέλου μας να εργαστούμε σε «πραγματικό» χρόνο. Αυτό σημαίνει πως 1sec στην επίλυση του προγράμματος αντιστοιχεί σε 1sec που διήλθε κατά την συγκόλληση στο πειραματικό στάδιο. Έτσι βάσει και της μέσης ταχύτητας συγκόλλησης που υπολογίσαμε παραπάνω γνωρίζουμε πως η πηγή θερμότητας που θα κατασκευάσουμε θα πρέπει να «στέκεται» για 1sec πάνω σε επιφάνεια που αντιστοιχεί σε μήκος 5mm . Έτσι σε συνδυασμό με το συνολικό μήκος των 200mm του τεμα-

χίου κατά την επέκταση (expand) του μοντέλου θα επιλέξουμε 40 διαμερίσεις (repetitions) των 5mm μήκους η κάθε μία. Κατόπιν επειδή το πρόγραμμα δέχεται σαν input ποσό θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (σύμφωνα με την επιλογή της μοντελοποίησης που κάναμε να προσδώσουμε το σύνολο της θερμότητας μέσω της επιφάνειας της ραφής) θα πρέπει η τιμή του ποσού θερμότητας να διαιρεθεί με την επιφάνεια μέσω της οποίας μεταδίδεται η θερμότητα στην επιφάνεια της ραφής στην μονάδα του χρόνου. Στην πραγματικότητα το ποσό θερμότητας στην μονάδα του χρόνου (που υπολογίστηκε παραπάνω) θα έπρεπε να εισαχθεί στον όγκο (και όχι στην επιφάνεια) του μοντέλου τον οποίο θα διανύσει η θερμική πηγή στην μονάδα του χρόνου και είναι λογικό διότι το υλικό στην περιοχή της ραφής τήκεται ολόκληρο. Όμως στο περιβάλλον του προγράμματος αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο να γίνει (εισαγωγή ροής θερμότητας σε στοιχείο όγκου το οποίο μάλιστα είναι εσωτερικό στην γεωμετρία που προτείνεται) και έτσι επιλέγουμε να εισάγουμε την ροή αυτή επάνω στην επιφάνεια των στοιχείων της ραφής. Για να υπολογίσουμε το εμβαδό της επιφάνειας με την οποία θα πρέπει να διαιρέσουμε το ποσό θερμότητας που υπολογίστηκε παραπάνω σκεφτόμαστε ως εξής. Η θεωρητική επιφάνεια μέσω της οποίας συναλλάσσεται η θερμότητα είναι η διατομή του ηλεκτροδίου (διάμετρος 1mm). Όμως κατά την έναυση και αποκατάσταση του ηλεκτρικού τόξου η επιφάνεια αυτή σίγουρα διευρύνεται. Επίσης πρέπει να συνυπολογίσουμε το γεγονός πως η πηγή θερμότητας, βάσει της ταχύτητας συγκόλλησης (5mm/sec) διανύει μήκος πενταπλάσιο της διαμέτρου του ηλεκτροδίου. Τελικά υποθέτουμε πως στην μονάδα του χρόνου (δηλαδή στο 1 sec) η θερμότητα μεταδίδεται μέσω επιφάνειας πενταπλάσιας (περίπου) της διατομής του ηλεκτροδίου η οποία όμως, όπως είπαμε, πρέπει να προσαυξηθεί κατά έναν αριθμό τέτοιο που να προσεγγίζει την πραγματική επιφάνεια συναλλαγής μετά την αποκατάσταση του ηλεκτρικού τόξου. Εμείς υποθέτουμε πως μπορούμε να προσαυξήσουμε την ακτίνα του ηλεκτροδίου (και κατά συνέπεια της διατομής του) κατά περίπου 4 φορές. Έτσι η τελική επιφάνεια συναλλαγής με την οποία θα πρέπει να διαιρεθεί το παραπάνω ποσό θερμότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$(\text{επιφάνεια συναλλαγής}) = 5(\text{προσαύξηση λόγω ταχύτητας συγκόλλησης}) \times \frac{\pi(4 \cdot D)^2}{4} (\text{διατομή ηλεκτροδίου με προσαυξημένη την διάμετρό του κατά 4 φορές})$$

Τελικά προκύπτει:

$$(\text{επιφάνεια συναλλαγής}) = 5 \cdot \frac{\pi \cdot (4 \cdot 1)^2}{4} = 62.8 \text{ mm}^2$$

και το ποσό θερμότητας που θα εισαχθεί στο πρόγραμμα είναι:

$$q = \frac{3152.34 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{sec}}{62.8 \text{ mm}^2} = \frac{3152340 \text{ N} \cdot \text{mm} / \text{sec}}{62.8 \text{ mm}^2} \approx 50000 \text{ N} \cdot \text{mm} / \text{sec} / \text{mm}^2$$

(στην μονάδα χρόνου & επιφάνειας)

Τέλος επισημαίνεται πως το πρόγραμμα για τα βασικά μεγέθη της δύναμης, του χρόνου και του μήκους δέχεται εισαγωγή δεδομένων σε N, sec και mm αντίστοιχα, πράγμα που σημαίνει πως πρέπει να γίνουν οι αναγκαίες μετατροπές μονάδων και τελικά θα πάρουμε αποτελέσματα θερμοκρασιών σε °C και τάσεων σε MPa.

Η κατασκευή της συνάρτησης και η εισαγωγή της ροής θερμότητας γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία:

BOUNDARY CONDITIONS THERMAL

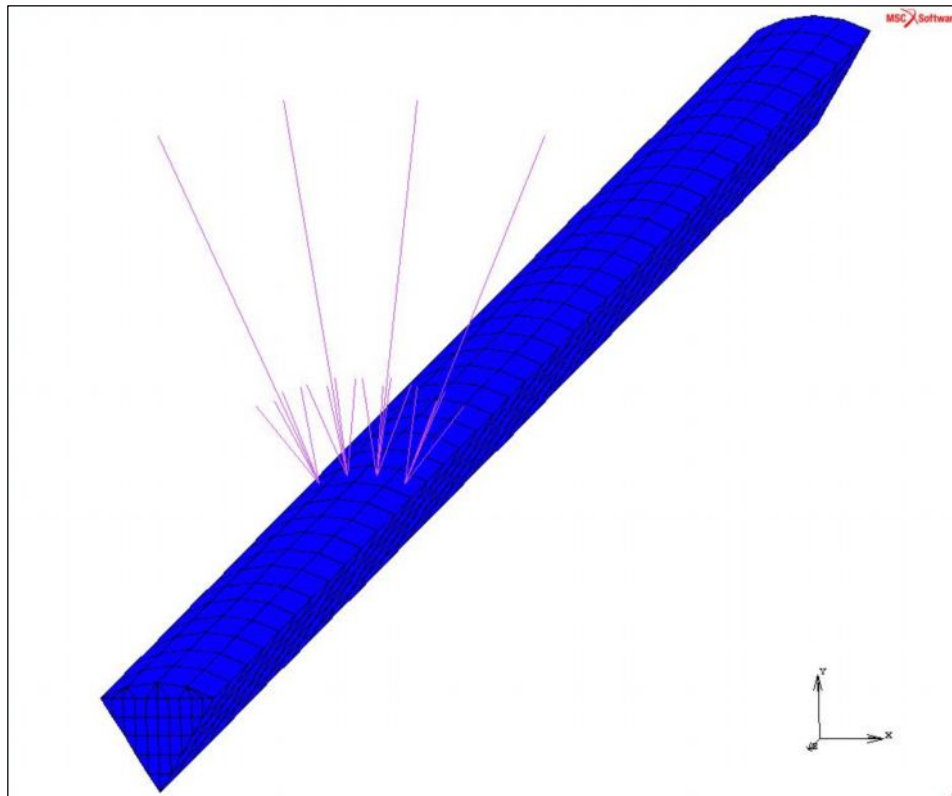
```

TABLES
NEW TABLE (δημιουργούμε έναν πίνακα – συνάρτηση μορ-
φής)
    INDEPENDENT VARIABLE
NAME: t1 (ή όποιο όνομα επιθυμώ)
TYPE
    TIME (ανεξάρτητη μεταβλητή ο χρόνος)
DATA POINTS
ADD
0 (τη χρονική στιγμή 0)
0 (η συνάρτηση έχει τιμή 0)
1 (τη χρονική στιγμή 1)
1 (η συνάρτηση έχει τιμή 1)
400 (τη χρονική στιγμή 400 – τέλος της συγκόλλησης συν τον
προβλεπόμενο χρόνο απόψυξης)
0 (η συνάρτηση έχει τιμή 0)
END LIST
FIT
RETURN
FACE FLUX
    FLUX
    MAGNITUDE: (εισάγω την τιμή του ποσού θερμότητας q)
    TABLE: t1 (πολλαπλασιάζω με τον πίνακα table0)
    OK
faces: ADD (επιλέγω με το ποντίκι της επιφάνειες στις οποίες θα το-
ποθετήσουμε την ροή)
END LIST
RETURN
RETURN

```

Είναι προφανές πως η παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί για όλες τις χρονικές στιγμές στις οποίες θερμότητα προσδίδεται στο τεμάχιο (δηλαδή 40 φορές) και όλες τις «στιγμιαίες» επιφάνειες της ραφής.

Ο πίνακας [t1] που κατασκευάσαμε με τον οποίο πολλαπλασιάστηκε η τιμή του ποσού θερμότητας της ροής είναι ουσιαστικά μία συνάρτηση μορφής όπως τα πολυώνυμα Lagrange, η οποία έχει τιμή μονάδα στην χρονική στιγμή που θέλουμε να επιδρά η πηγή στην συγκεκριμένη περιοχή της ραφής και της γειτονιάς της βάσει των υπολογισμών που έγιναν παραπάνω και τιμή μηδέν σε οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή. Το ηλεκτρόδιο δηλαδή θα «στέκεται» επάνω από κάθε χωρίο για μία χρονική στιγμή και στην συνέχεια θα προχωρά στο επόμενο. Μετά την τοποθέτηση του φορτίου στην ραφή και την γειτονιά της μπορώ να ελέγξω τα boundary conditions που τοποθέτησα πάλι μέσω του identify.



Εικόνα 5.13: Η τοποθέτηση της ροής θερμότητας στο μοντέλο (σαν οριακή συνθήκη)

5.5.6 Καταχώρηση jobs & load cases

Το μοντέλο μας είναι έτοιμο από πλευράς pre – processing και το μόνο που απομένει είναι να επιλυθούν οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας και να πάρουμε τα αποτελέσματα που επιθυμούμε σε οπτικοποιημένη μορφή.

Για να γίνει όμως αυτό θα πρέπει πρώτα να κατασκευάσουμε ένα loadcase για το μοντέλο μας το οποίο ουσιαστικά αποτελεί μια ρύθμιση των τελευταίων παραμέτρων που απαιτούνται για καταλάβει το πρόγραμμα ποιες εξισώσεις καλείται να επιλύσει και με ποιες αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Τέλος θα πρέπει να κατασκευάσουμε και ένα Job, δηλαδή να προσδιορίσουμε πώς θέλουμε να λυθεί το πρόβλημα και ποια αποτελέσματα θέλουμε να πάρουμε στο τέλος. Η διαδικασία έχει ως εξής:

MAIN

LOADCASES

COUPLED LOADCASES

QUASI – STATIC

TOTAL LOAD CASE TIME: 400 (εργαζόμαστε στον «πραγματικό» χρόνο των 40 sec προσαυξημένο δέκα φορές για την ικανοποιητική απόψυξη του τεμαχίου)

STRUCTURAL->THERMAL

CONVERGE TESTING

MAX ERROR IN TEMPERATURE: 30

OK

Stepping procedure: fixed: CONSTANT TIME STEP
PARAMETERS

```

# steps: 400 (έτσι ώστε 1 sec που περνά στον «πραγμα-
# τικό» χρόνο να αντιστοιχεί σε 1 sec στο χρόνο της επί-
# λυσης του μοντέλου)
OK
RETURN
RETURN
RETURN
JOBS
COUPLED
από τα διαθέσιμα (available) loadcases επιλέγουμε αυτό που έχουμε
δημιουργήσει έτσι ώστε να μεταφερθεί στα επιλεγμένα (selected).
INITIAL LOADS: αποσεκάρουμε όλα τα weld torch flux καθώς είναι
εξαρτώμενα από τον χρόνο και όχι σταθερά, αφήνοντας ενεργοποιημέ-
νες μόνο τις οριακές συνθήκες για την απώλειας θερμότητας και τον
περιορισμό κίνησης.
ANALYSIS OPTIONS: ενεργοποιούμε τις επιλογές LARGE STRAIN
και LUMPED MASS & CAPACITY
JOB RESULTS: available element scalars: επιλέγουμε TEMPERA-
TURE (integration point), EQUIVALENT VON MISES STRESS &
MEAN NORMAL STRESS
Analysis dimension: 3 – D
OK
ELEMENTS
COUPLED
3 – D SOLID
3 – D solid element types: full integration 136 (penta)
SET: triangles
3 – D solid element types: full integration 7 (hex)
SET: piece_1, piece_2, squares
OK
RETURN
RETURN
CHECK (πραγματοποίηση ελέγχου για τυχόν σφάλματα στον κώδικα)
RUN (επίλυση του μοντέλου)

```

Αφού λοιπόν ο υπολογιστής τρέξει τον κώδικα για το παραπάνω μοντέλο πα-
ράγει ξεχωριστό αρχείο αποτελεσμάτων με ίδιο όνομα και διαφορετική κατάληξη
(*t16) το οποίο αποθηκεύεται στο ίδιο directory με το μοντέλο (*.mud).

5.5.7 Παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

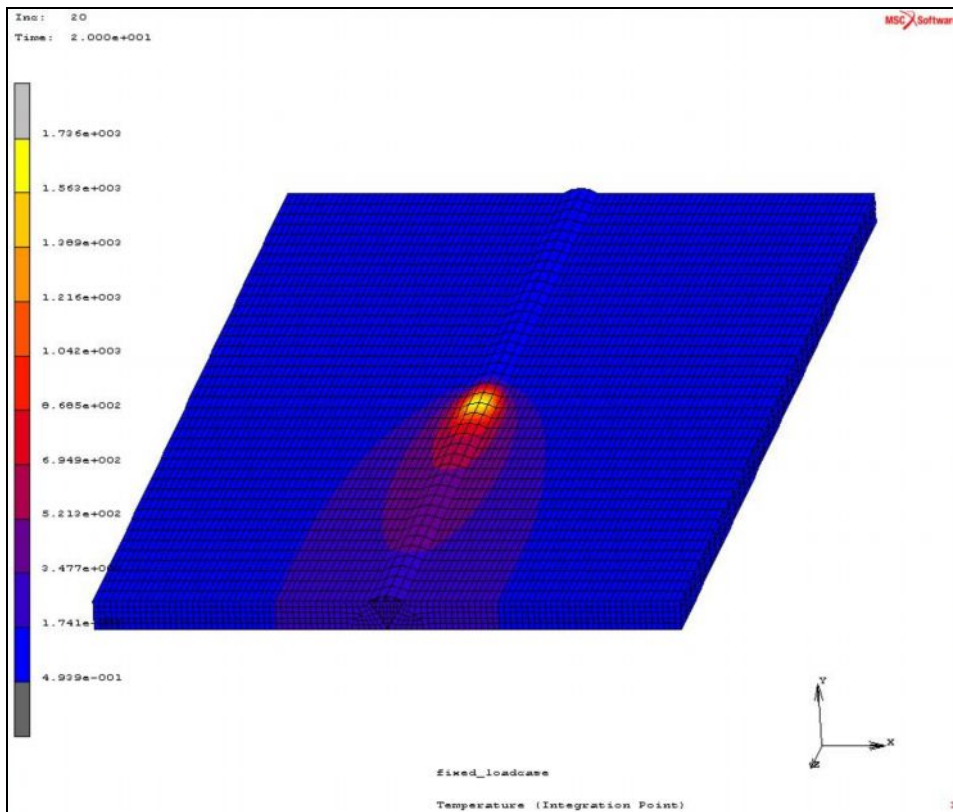
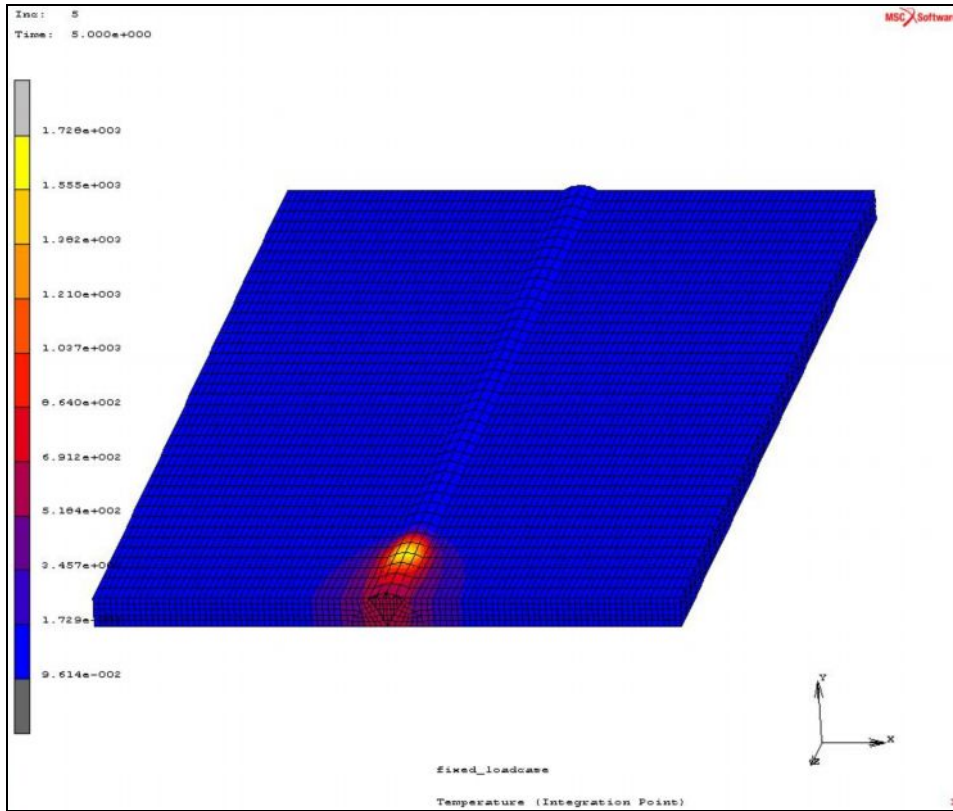
Το MARC μας παρέχει την δυνατότητα πολλών επιλογών που έχουν να κά-
νουν με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσής του. Γενικά εάν επιθυ-
μούμε απλή και κυρίως ποιοτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων έχουμε την δυνα-
τότητα δημιουργίας γραφημάτων με χρωματικές ζώνες (color contour bands), ενώ
μέσω των επιλογών του history και path plot μπορούμε να πάρουμε αναλυτικά (τόσο
ποιοτικά όσο και ποσοτικά) τα αποτελέσματα που έχουμε ζητήσει. Η παρουσίαση
των αποτελεσμάτων του προβλήματος που επιλύθηκε παραπάνω θα γίνει σε δύο με-
γάλες ενότητες που κατ' ουσία αντιπροσωπεύουν τις δύο συνιστώσες του συνολικού

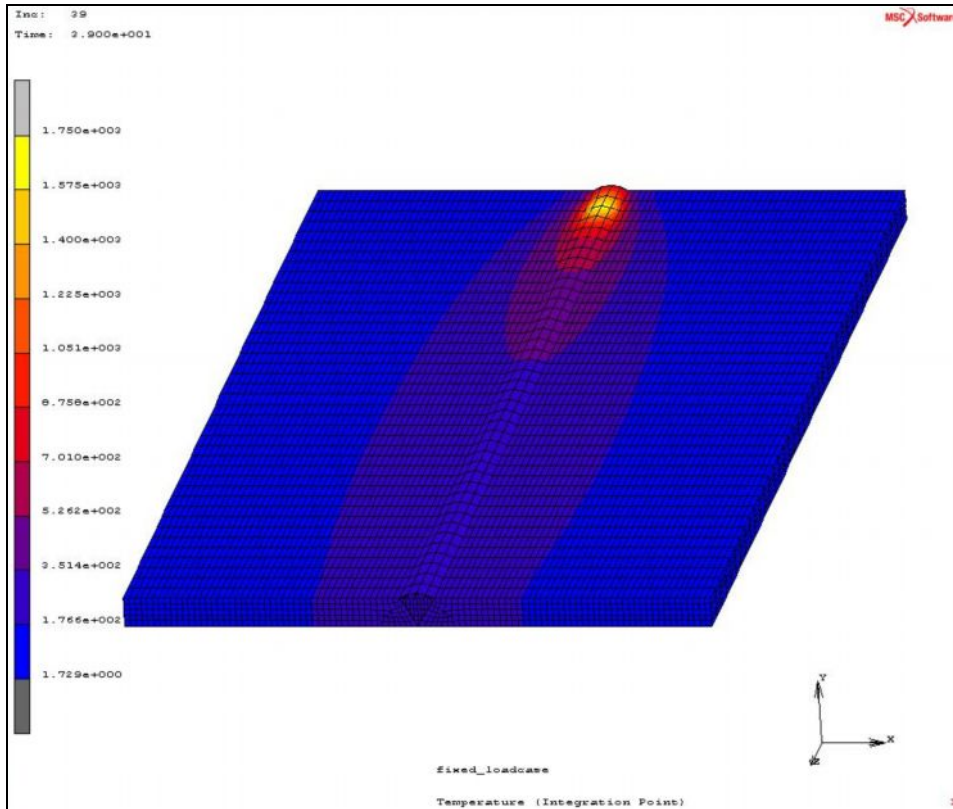
προβλήματος της συνδυσασμένης (coupled) ανάλυσης. Αυτές είναι το *θερμικό πρόβλημα* και το *μηχανικό πρόβλημα*.

5.5.7.1 Το θερμικό πρόβλημα

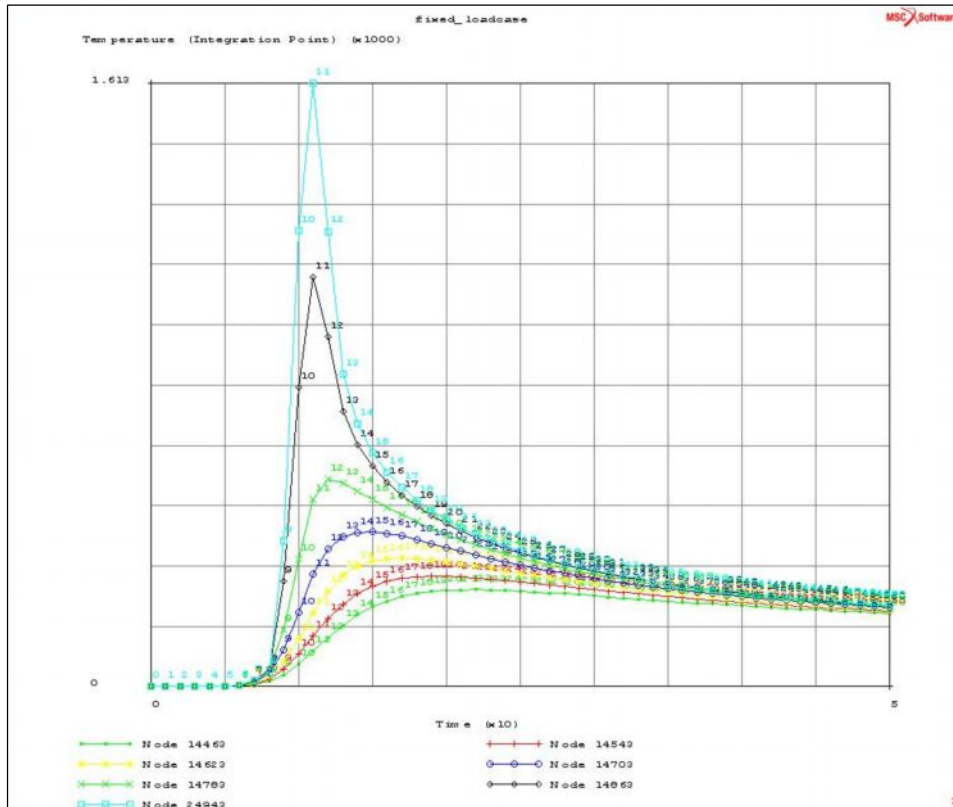
Το θερμικό πρόβλημα όπως είναι αναμενόμενο είναι αρκετά πιο απλό και «εύκολο» (όσον αφορά στην υπολογιστική ισχύ που απαιτεί) σε σχέση με το μηχανικό καθώς πραγματεύεται μόνο έναν βαθμό ελευθερίας, την θερμοκρασία που προκύπτει στο μοντέλο μας λόγω της εισαγωγής της θερμικής πηγής (ηλεκτρόδιο συγκόλλησης). Όπως είναι λοιπόν φυσικό τα αποτελέσματά του μπορούν να παρουσιαστούν σχετικά σύντομα.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αυτό που μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε από τα αποτελέσματα της επίλυσης του θερμικού προβλήματος είναι εάν η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο μοντέλο μας προσεγγίζει αυτή της πραγματικότητας καθώς επίσης και αν ο ρυθμός με τον οποίο η θερμοκρασία μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου συμφωνεί με τα θεωρητικώς αναμενόμενα. Για να κατανοήσουμε λοιπόν όσα μας ενδιαφέρουν σχετικά με το θερμικό πρόβλημα, με την βοήθεια του history plot (γράφημα ενός μεγέθους στην πορεία του χρόνου της ανάλυσης) παραθέτουμε τα ακόλουθα τρία γραφήματα με τα ανάλογα σχόλια σε κάθε περίπτωση ενώ πριν από αυτά θα παραθέσουμε ένα γράφημα χρωματικών ζωνών σε διάφορες χρονικές στιγμές για την ποιοτική παρακολούθηση της μοντελοποιημένης συγκόλλησης και της πορείας της θερμικής πηγής πάνω στο τεμάχιο με την συνακόλουθη αύξηση της θερμοκρασίας..





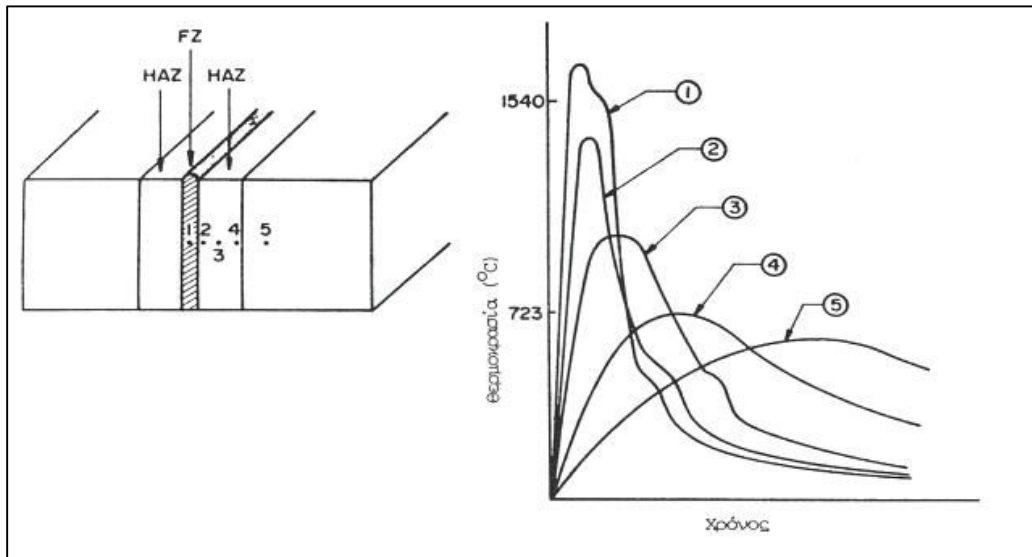
Εικόνες 5.14, 5.15 & 5.16: Η αύξηση της θερμοκρασίας του τεμαχίου καθώς η πηγή θερμότητας προχωρά επάνω στην ραφή (αρχή, μέση & τέλος της συγκόλλησης)



Εικόνα 5.17: Καμπύλες απόψυξης κόμβων που βρίσκονται στην ίδια διατομή καθώς απομακρυνόμαστε από την ραφή

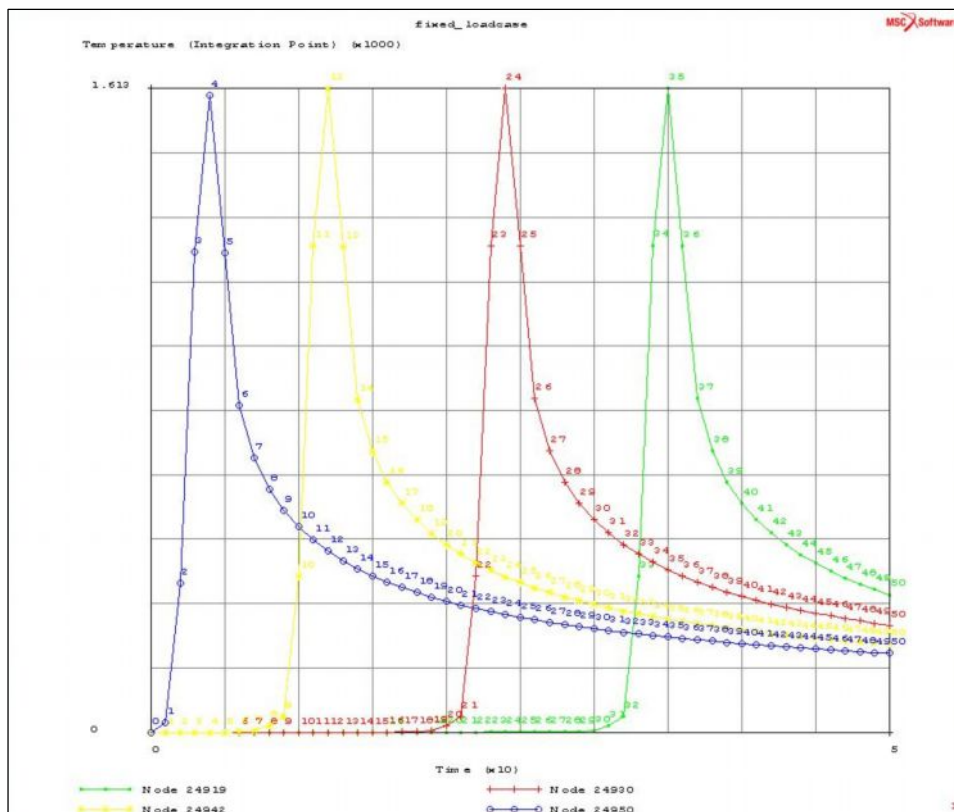
Στο γράφημα της εικόνας 5.17 μπορούμε να δούμε την πορεία της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου της ανάλυσης (ο οποίος υπενθυμίζουμε πως συμπίπτει με τον πραγματικό) σε πέντε κόμβους που έχουν επιλεγθεί να βρίσκονται στην ίδια διατομή και έχουν επιλεγθεί έτσι ώστε ο πρώτος να βρίσκεται επάνω στον άξονα της ραφής και οι υπόλοιποι να απομακρύνονται σταδιακά από αυτόν. Εφόσον έχουμε την πορεία της θερμοκρασίας στον χρόνο πρόκειται ουσιαστικά για τις καμπύλες απόψυξης των κόμβων αυτών (εδώ επιλέξαμε κόμβους από την πρώτη διατομή που δέχεται την θερμότητα του ηλεκτροδίου έτσι ώστε να έχουμε την πιο πλήρη εικόνα της απόψυξης σε σχέση με τον χρόνο). Στο γράφημα αυτό μπορούν να γίνουν σημαντικές παρατηρήσεις με πρώτη το γεγονός ότι ο κόμβος που βρίσκεται ακριβώς πάνω στον άξονα της ραφής φτάνει στην μεγαλύτερη θερμοκρασία, πράγμα αναμενόμενο καθώς βρίσκεται στο κέντρο της θερμικής ροής, η οποία μάλιστα υπερβαίνει οριακά τους 1540°C (θερμοκρασία τήξης χάλυβα) γεγονός που επιβεβαιώνει τα θεωρητικώς αναμενόμενα καθώς πράγματι στην περιοχή αυτή το υλικό έχει λιώσει. Επίσης παρατηρούμε πως όσο απομακρυνόμαστε από την ραφή η θερμοκρασία πέφτει, όπως άλλωστε αναμενόταν καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή της θερμότητας ενώ η κορυφή της κάθε καμπύλης (μέγιστη θερμοκρασία κόμβου) παρουσιάζει μία μικρή χρονική υστέρηση σε σχέση με την προηγούμενη κάθε φορά, πράγμα που επίσης είναι λογικό καθώς η μεταδιδόμενη από το ηλεκτρόδιο θερμότητα μετακινείται από το κέντρο προς τα άκρα του τεμαχίου με αποτέλεσμα να φτάνει στον κάθε κόμβο διαφορετική χρονική στιγμή. Οι παραπάνω καμπύλες έχουν τεράστια σημασία για την μελέτη μίας συγκόλλησης. Ουσιαστικά αυτές είναι που καθορίζουν μέχρι που το υλικό έχει τακεί και μέχρι ποια περιοχή το υλικό έχει υποστεί μετασχηματισμό της κρυσταλλικής του δομής, στην συγκεκριμένη περίπτωση (επειδή τα υλικά είναι χάλυβες) μέχρι που έχει υποστεί ωστενιτοποίηση (βέβαια αυτό είναι κάτι που δεν μπορούμε να το μοντελοποιήσουμε, μπορούμε όμως από τα αποτελέσματα των καμπύλων απόψυξης, να αποφανθούμε κατά πόσο πραγματικά συμβαίνει εφόσον γνωρίζουμε σε ποιες θερμοκρασίες το υλικό μας υφίσταται μετασχηματισμό φάσεων και συγκρίνοντάς τις με αυτές που δίνουν τα γραφήματα). Κατά συνέπεια γνωρίζοντας αυτές τις καμπύλες γνωρίζουμε επακριβώς τα όρια των ζωνών FZ (ζώνη τήξης) και HAZ (θερμικά επηρεασμένη ζώνη). Επίσης σε περίπτωση που εξετάζαμε ετερογενή συγκόλληση με την βοήθεια των καμπύλων αυτών θα μπορούσαμε να διαπιστώσουμε σε τι ποσοστό έχουν μετατοπιστεί οι παραπάνω ζώνες προς το υλικό με την μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα.

Τις παραπάνω καμπύλες απόψυξης μπορούμε να τις συγκρίνουμε με τις θεωρητικά αναμενόμενες τις οποίες μας παρέχει η βιβλιογραφία και φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



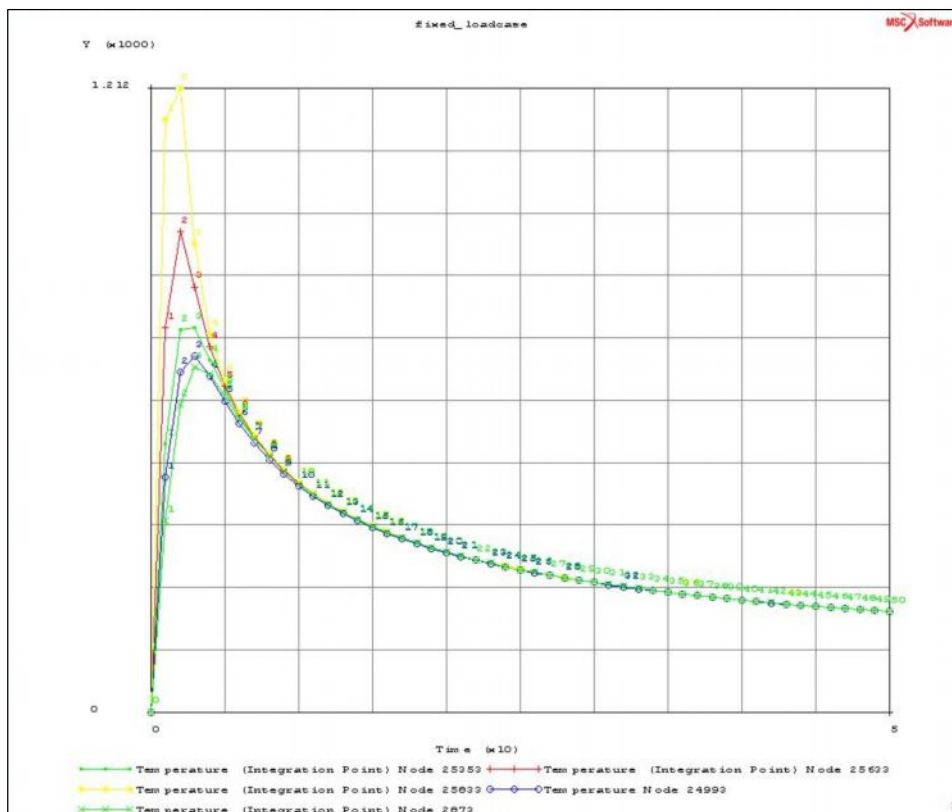
Εικόνα 5.18: Θεωρητικές καμπύλες απόψυξης σημείων στην περιοχή της ραφής σε συγκόλληση χάλυβα

Όπως μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας βρίσκονται σε ικανοποιητική σύγκλιση με τα θεωρητικώς αναμενόμενα. Αυτό είναι και μία σημαντική ένδειξη για την επιλογή από μέρους μας του σωστού χρόνου απόψυξης του τεμαχίου μας (υπενθυμίζεται πως είχαμε επιλέξει τετραπλάσιο χρόνο από αυτόν που διήρκεσε η συγκόλληση) καθώς επίσης και την σωστή μοντελοποίηση της οριακής συνθήκης που έχει να κάνει με την απώλεια θερμότητας του τεμαχίου προς το περιβάλλον.



Εικόνα 5.19: Καμπύλες απόψυξης κόμβων που βρίσκονται επάνω στον άξονα της κόλλησης

Παρατηρώντας τις καμπύλες απόψυξης τεσσάρων κόμβων που βρίσκονται πάνω στον άξονα συμμετρίας της ραφής (εικόνα 5.19) μπορούμε να έχουμε μία ποιοτική επισκόπηση της προόδου της συγκόλλησης βλέποντας πώς, καθώς η πηγή θερμότητας προωθείται επάνω στο τεμάχιο, οι κόμβοι ανεβάζουν την θερμοκρασία τους και κατόπιν αποψύχονται. Το γεγονός ότι οι καμπύλες είναι μετατοπισμένες σχετίζεται προφανώς με την διαφορετική θέση του κάθε κόμβου πάνω στον άξονα της ραφής. Έτσι αυτός που προηγείται έρχεται πρώτος σε επαφή με την ροή θερμότητας θερμαίνεται και κατόπιν ψύχεται με μία χρονική διαφορά φάσης σε σχέση με τον επόμενο η οποία οφείλεται στην μεταξύ τους απόσταση. Τέλος, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η θερμοκρασία του πρώτου (από τους τέσσερις) κόμβου φθάνει σε ελαφρώς χαμηλότερο επίπεδο σε σχέση με τους τρεις επόμενους. Το γεγονός αυτό είναι φυσιολογικό στην αρχή της συγκόλλησης και οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς προχωρά το ηλεκτρόδιο, το θερμικό φορτίο που δέχεται το τεμάχιο αυξάνεται έως ότου φτάσει στην μόνιμη κατάσταση. Από την στιγμή και μετά οι κόμβοι που ακολουθούν θα φθάσουν στα ίδια επίπεδα θερμοκρασίας.



Εικόνα 5.20: Καμπύλες απόψυξης κόμβων ευρισκόμενων στην ίδια διατομή (επάνω στην ραφή) σε αυξανόμενα διαστήματα βάθους

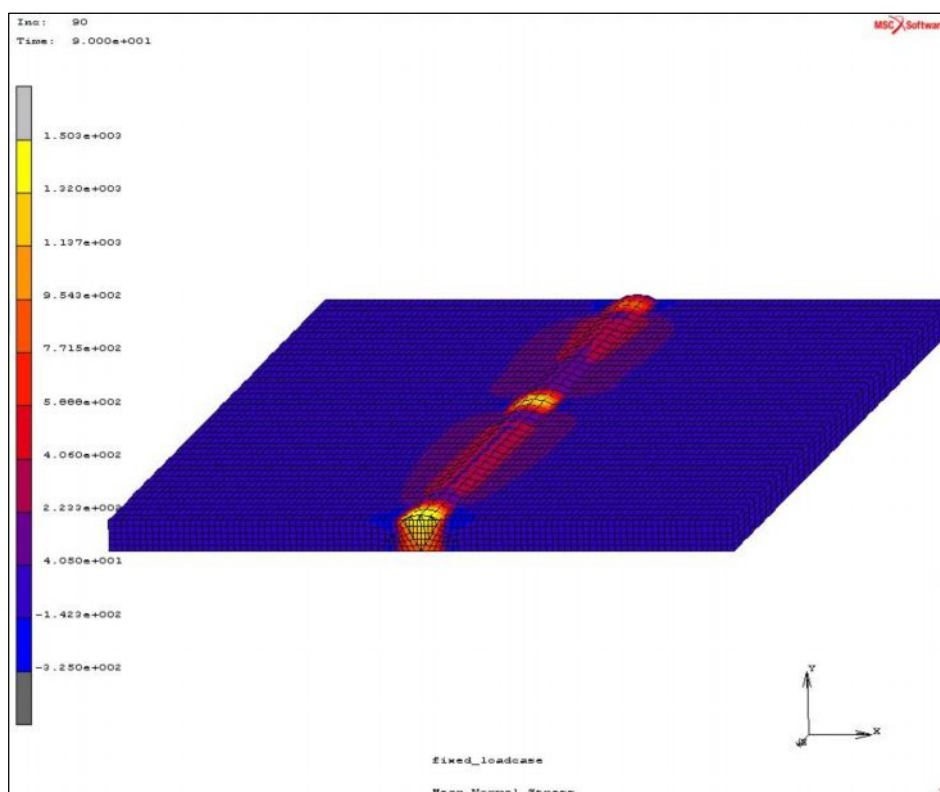
Στην εικόνα 5.19 φαίνεται η θερμοκρασία που έχουν φτάσει οι κόμβοι που βρίσκονται εντός της ραφής κάτω από τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Από το γράφημα αυτό μπορούμε να δούμε σε ποιους κόμβους μέσα στην ραφή η θερμοκρασία υπερέβη την θερμοκρασία τήξης του χάλυβα και άρα το υλικό έλιωσε. Μπορούμε δηλαδή να διαπιστώσουμε τον «βαθμό διείδσδυσης» του ποσού θερμότητας που επιλέξαμε για την πηγή (ηλεκτρόδιο) και άρα να κρίνουμε κατά πόσο υπήρξε «επιτυχημένη» ή και «αξιόπιστη» η μοντελοποίησή μας σε αυτό το κομμάτι. Όπως φαίνεται κα-

νένος κόμβος κάτω από τα επιφανειακά στοιχεία δεν έχει φτάσει πάνω από την θερμοκρασία τήξης του γεγονός που οφείλεται στο ότι ήταν δύσκολο να γίνει η εισαγωγή του ποσού θερμότητας σε όλα τα στοιχεία όγκου της ραφής και τελικά έγινε μέσω της επιφάνειας. Γενικά είναι μία συνέπεια που απορρέει από την μοντελοποίηση ενός πολύπλοκου φαινομένου στην οποία είναι αδύνατο να υπάρξει πλήρης σύγκλιση με την πραγματική διαδικασία. Επίσης η ποιοτική ερμηνεία σχετικά με την επιτυχία της μοντελοποίησης από το γράφημα αυτό θα μας βοηθήσει και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μηχανικού προβλήματος στην συνέχεια.

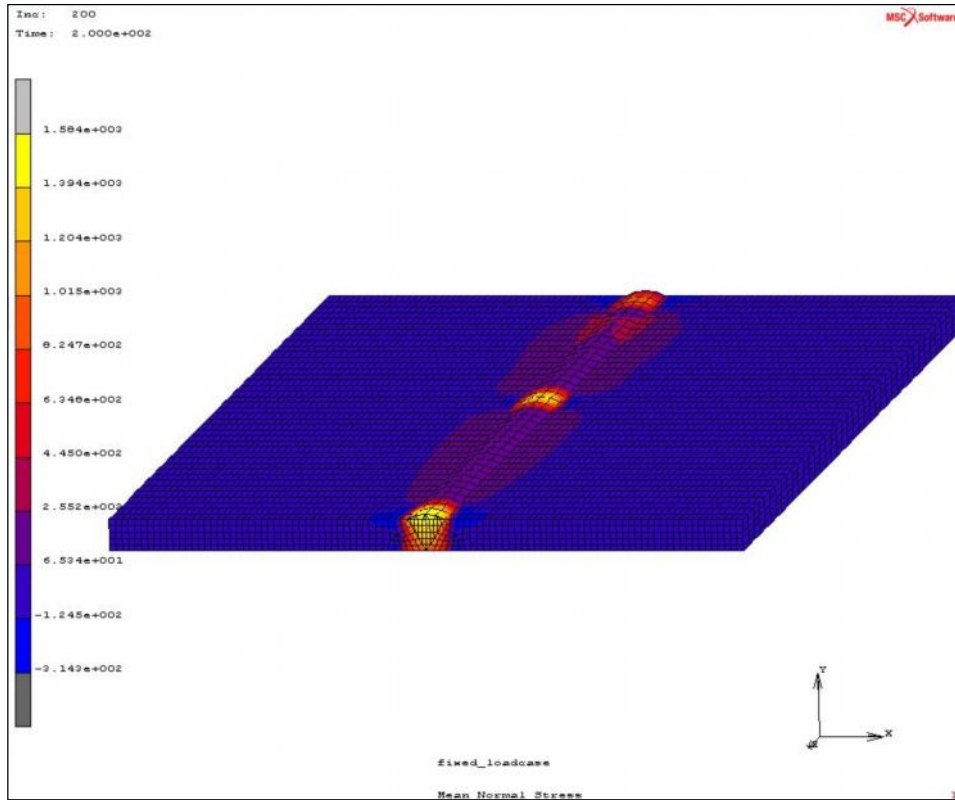
5.5.7.2 Μηχανικό πρόβλημα

Το μηχανικό πρόβλημα αφορά τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων στο τεμάχιό μας μετά το πέρας της συγκόλλησης καθώς και ικανού χρόνου απόψυξης ο οποίος ήταν και ο εξαρχής στόχος της ανάλυσης μας. Όπως και στο θερμικό πρόβλημα, έτσι και εδώ χρησιμοποιώντας τα εργαλεία του μετα – επεξεργαστή του MARC θα έχουμε την δυνατότητα ποιοτικής και ποσοτικής παρατήρησης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και κατόπιν ερμηνείας τους καθώς και σύγκρισής τους τόσο με τα θεωρητικώς αναμενόμενα όσο και με αυτά του πειράματος που προηγήθηκε της μοντελοποίησης με σκοπό να εξετάσουμε κατά πόσο αυτά συγκλίνουν.

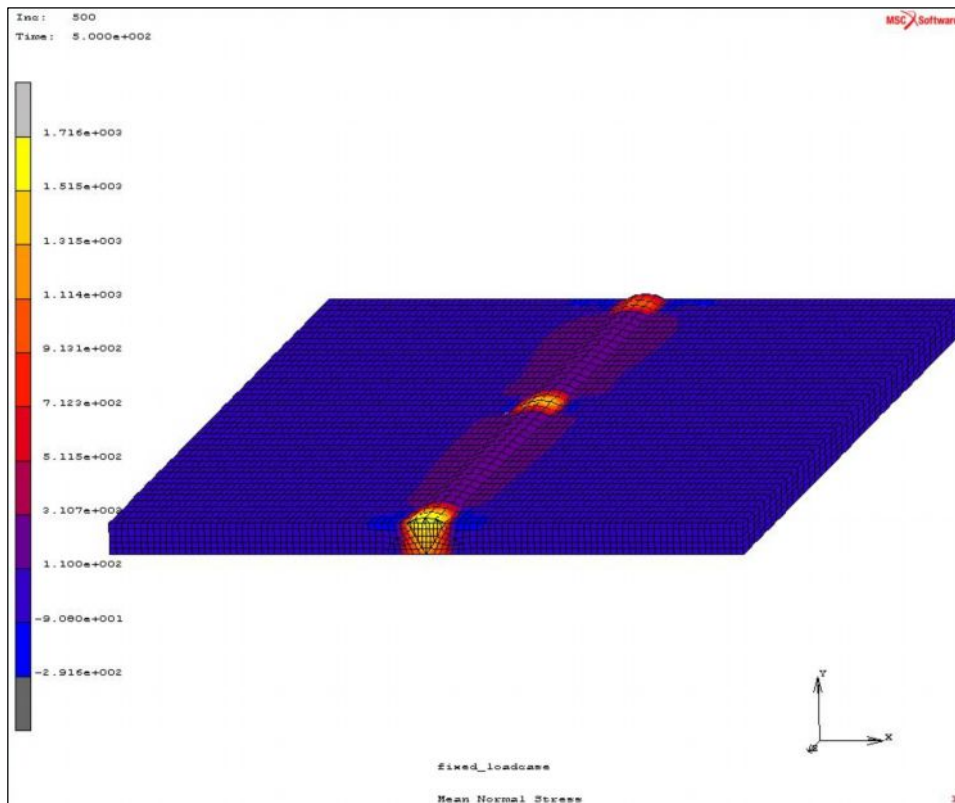
Αρχικά θα παραθέσουμε κάποια χρωματικά γραφήματα τα οποία παρουσιάζουν την εξέλιξη των τάσεων κατά την διάρκεια της συγκόλλησης έως την τελευταία χρονική στιγμή μετά το πέρας της απόψυξης στα οποία θα εξετάσουμε ποιοτικά τις παραμένουσες τάσεις και κατόπιν θα δούμε τις αναλυτικές κατανομές των τάσεων.



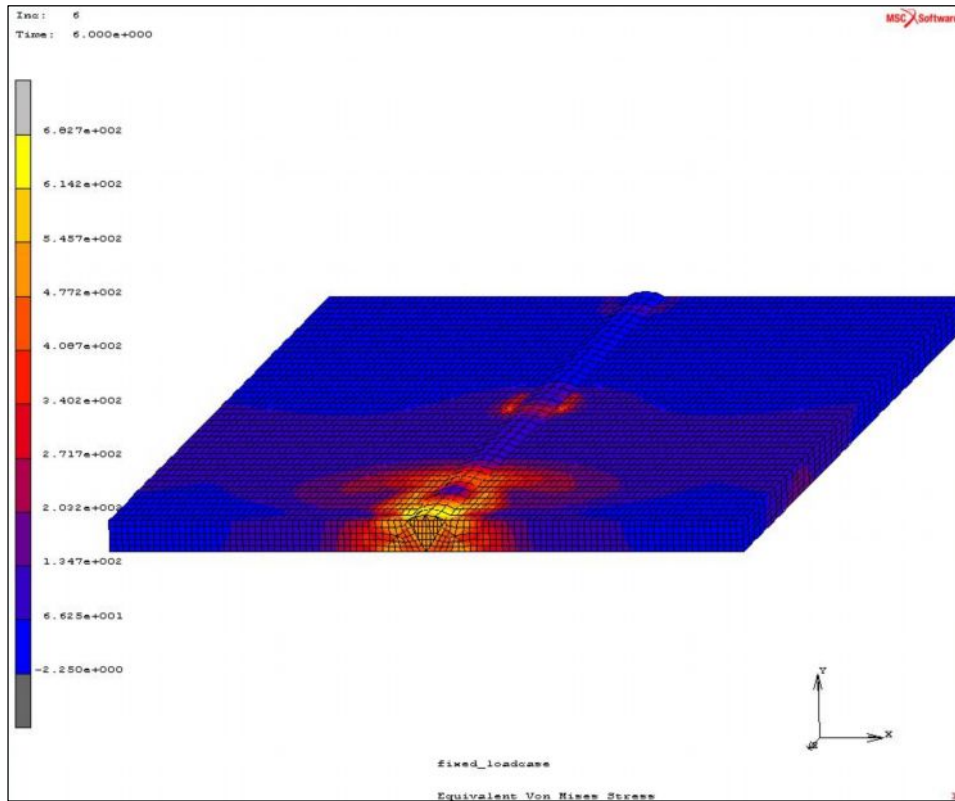
Εικόνα 5.21: Χρωματικό γράφημα των ορθών παραμενουσών τάσεων λίγο μετά το πέρας της συγκόλλησης ($t=90\text{sec}$)



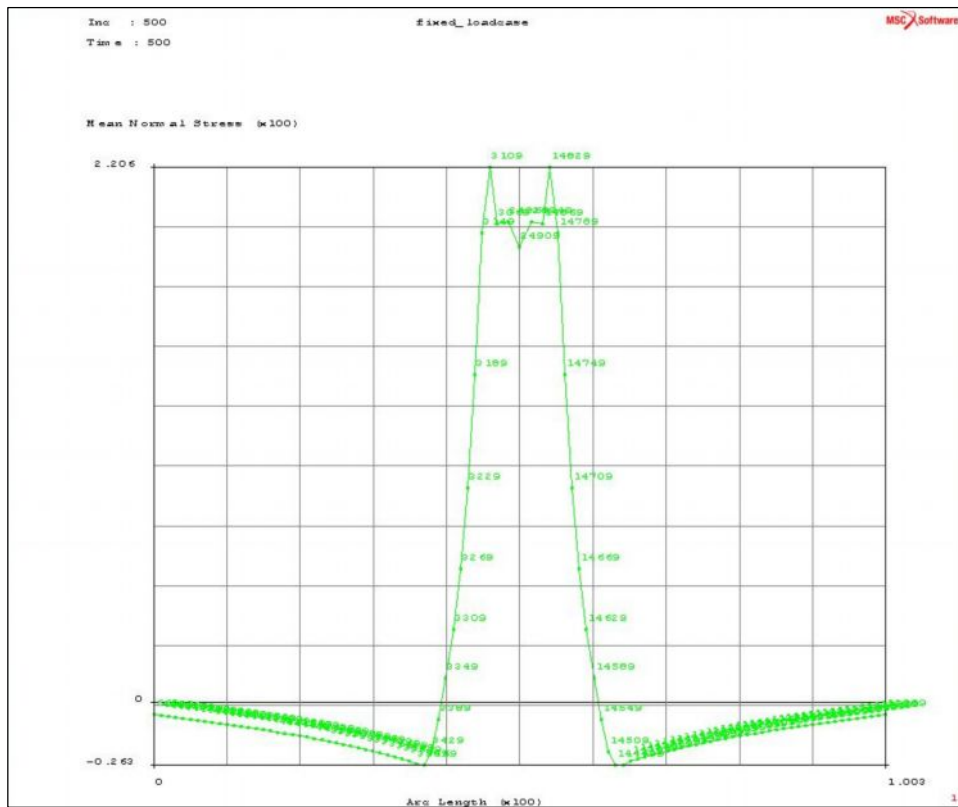
Εικόνα 5.22: Χρωματικό γράφημα των ορθών παραμενουσών τάσεων κατά την πρόοδο της απόψυξης ($t=200\text{sec}$)



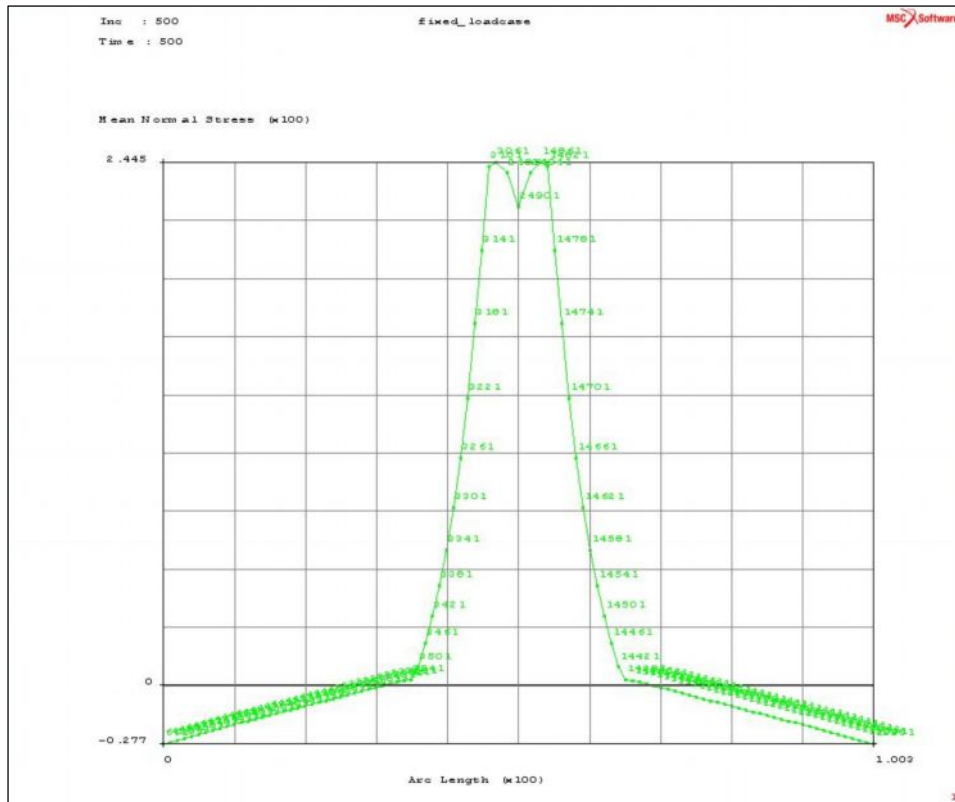
Εικόνα 5.23: Χρωματικό γράφημα των ορθών παραμενουσών τάσεων μετά το πέρας της απόψυξης ($t=500\text{sec}$)



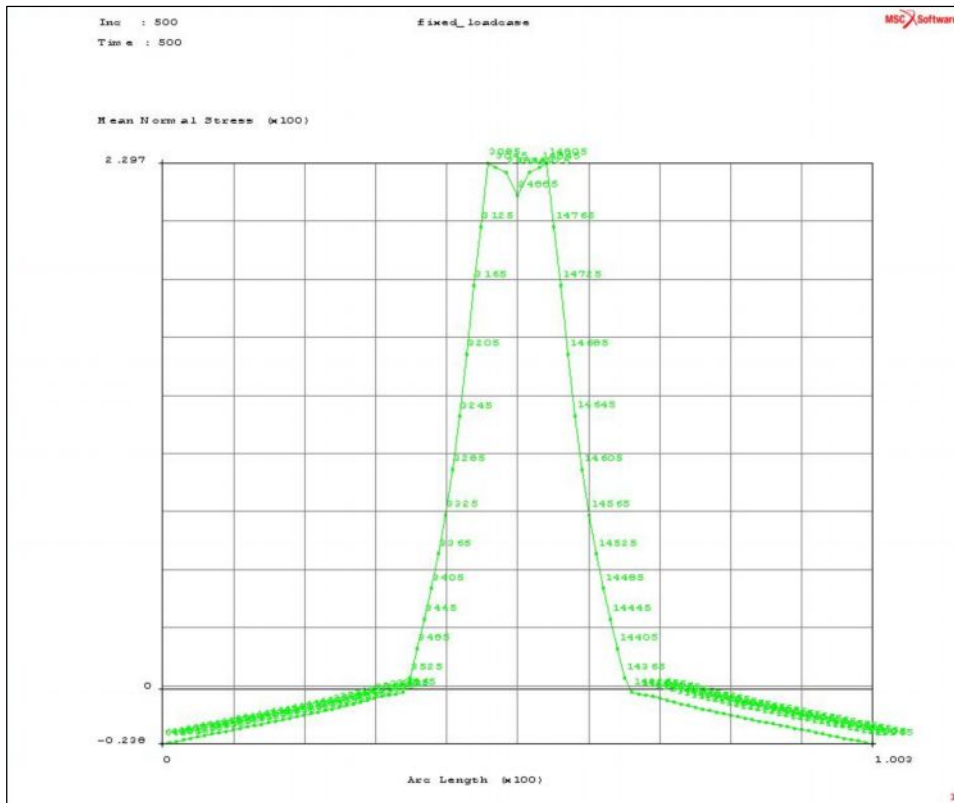
Εικόνα 5.24: Χρωματικό γράφημα ισοδύναμων παραμενουσών τάσεων κατά von mises σε μία στιγμή της συγκόλλησης ($t=5\text{sec}$)



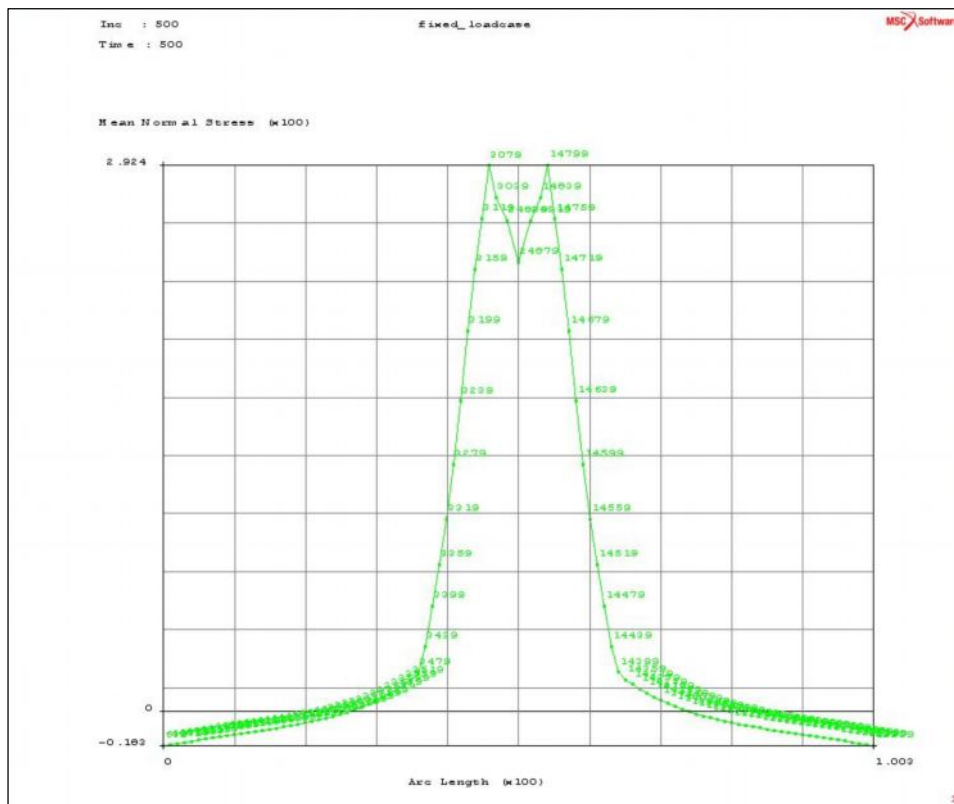
Εικόνα 5.25: Κατανομή ορθών παραμενουσών τάσεων σ_x στην διατομή της ροζέτας 7



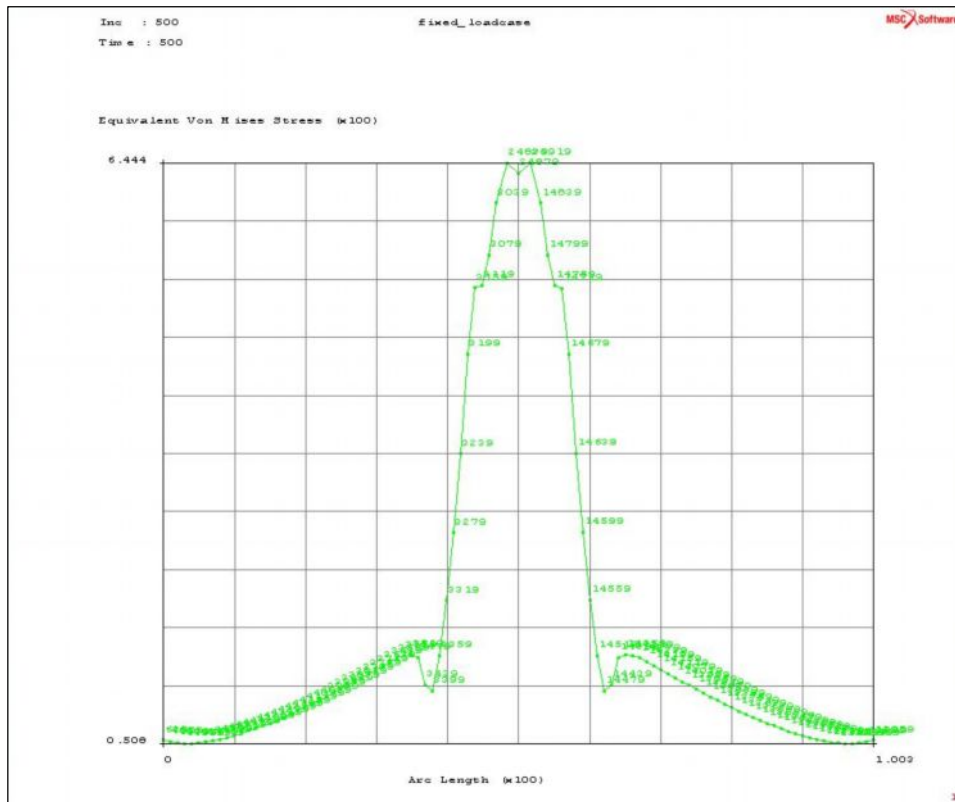
Εικόνα 5.26: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σ_x στην διατομή των ροζετών 4, 5 & 6



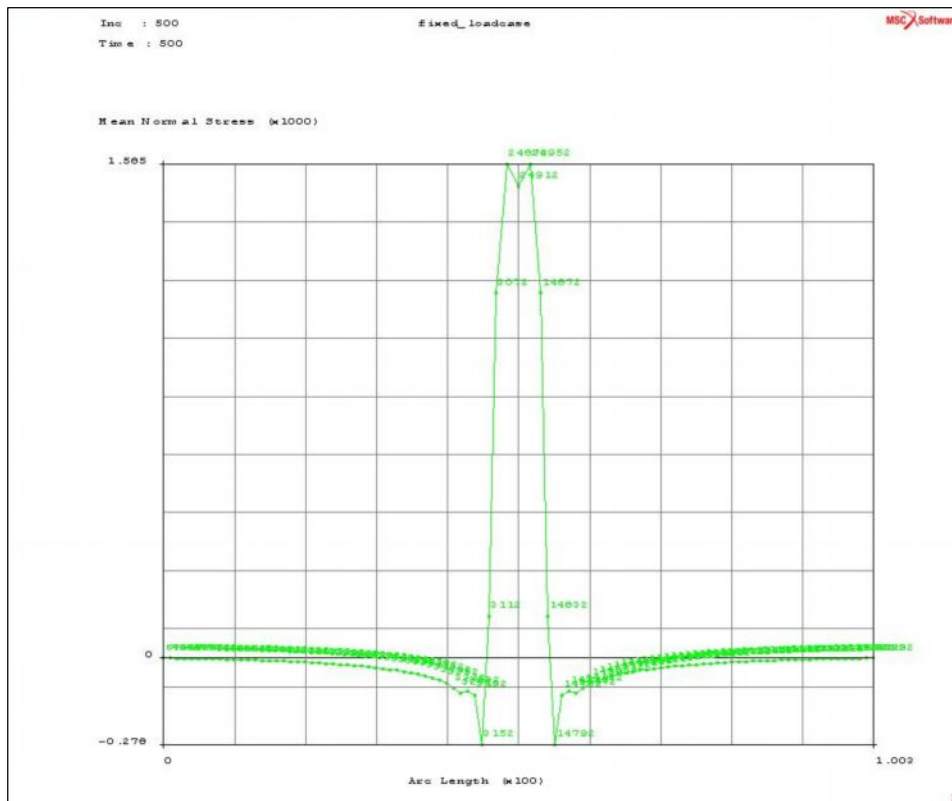
Εικόνα 5.27: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σ_x στην διατομή της ροζέτας 2



Εικόνα 5.28: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σ_x στην διατομή της ροζέτας 1



Εικόνα 5.29: Κατανομή των ισοδύναμων κατά von mises παραμενουσών τάσεων σε τυχαία θέση του τεμαχίου



Εικόνα 5.30: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σ_x σε θέση συγκράτησης (τσίμπημα)

Στις παραπάνω εικόνες (εικόνα 5.21 έως και εικόνα 5.30) συμπυκνώνεται η επίλυση του μηχανικού προβλήματος της μοντελοποίησης που πραγματοποιήσαμε. Αρχικά έχουμε παραθέσει τα χρωματικά γραφήματα έτσι ώστε να έχουμε μία πρώτη ποιοτική επισκόπηση των αποτελεσμάτων και κατόπιν μέσω των αναλυτικών κατανομών μπορούμε να εξάγουμε πιο συγκεκριμένα συμπεράσματα και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτά του πειράματος.

Αρχικά, στις εικόνες 5.21 έως και 5.23 μπορούμε να δούμε την σταδιακή διαμόρφωση του πεδίου των παραμενουσών τάσεων μετά την χρονική στιγμή της ολοκλήρωσης της συγκόλλησης ($t=40\text{sec}$). Παρατηρούμε πως σταδιακά οι τάσεις προσεγγίζουν τα αναμενόμενα επίπεδα τιμών (της τάξης του 10^2 MPa, όπως και το όριο διαρροής) ενώ μέσω τις χρωματικής εναλλαγής (κίτρινο – κόκκινο – σκούρο μοβ – σκούρο μπλε) σε συνδυασμό με την χρωματική κλίμακα βλέπουμε ότι οι τάσεις καθώς κινούμαστε από το κέντρο του τεμαχίου (ραφή) προς τα άκρα μεταβάλλονται από εφελκυστικές σε θλιπτικές με τις τελευταίες σχεδόν να μηδενίζονται. Η μεταβολή αυτή, εάν ανατρέξουμε σε όσα είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο (εικόνα 4.57) θα δούμε ότι συμπίπτει με την θεωρητική. Μία ιδιαίτερα σημαντική παρατήρηση που θα μας χρησιμεύσει και στην συνέχεια είναι ότι γύρω από τις περιοχές της συγκράτησης του τεμαχίου εμφανίζεται το εφελκυστικό πεδίο να είναι ιδιαίτερα έντονο με σημαντικά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές του τεμαχίου γεγονός που μας δείχνει πως αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης της συγκράτησης δεν είναι ιδιαίτερα επιτυχημένος.

Στην εικόνα 5.24 φαίνεται η κατανομή των ισοδύναμων τάσεων κατά von mises κατά την διάρκεια της συγκόλλησης (η θερμική πηγή βρίσκεται πάνω στο τεμάχιο). Οι δύο μοναδικές παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι πως οι τάσεις είναι πάντα θετικές (δες χρωματική κλίμακα) γεγονός που είναι αναμενόμενο λόγω

του ορισμού της ισοδύναμης κατά von mises τάσης και πως στην θέση πάνω από την οποία βρίσκεται το ηλεκτρόδιο (θερμική πηγή) η ισοδύναμη τάση είναι σημαντικά μεγάλη, πράγμα που μας δείχνει πως το υλικό στην περιοχή αυτή έχει λιώσει.

Προχωρώντας στα επόμενα σχήματα (εικόνες 5.25 έως και 5.28) παίρνουμε την αναλυτική εικόνα της κατανομής των τάσεων στις διατομές όπου και τοποθετήσαμε μία ή περισσότερες ροζέτες με την σειρά που αυτές έρχονται σε «επαφή» με το ηλεκτρόδιο (η φορά κίνησης του είναι από την ροζέτα 7 προς την ροζέτα 1). Πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως οι κατανομές προσεγγίζουν σημαντικά τις θεωρητικές προβλεπόμενες (κεφάλαιο 4, εικόνα 4.57) όχι όμως και τις θεωρητικά προβλεπόμενες για τους μαλακούς ανθρακοχαλύβες (κεφάλαιο 4, εικόνα 4.59). Επίσης βλέπουμε πως το πλάτος της εφελκυστικής ζώνης κυμαίνεται αρχικά στα 20mm (θέση ροζέτας 7) ενώ όσο προχωρά το ηλεκτρόδιο (προς την ροζέτα 1) η ζώνη αυτή σταδιακά διευρύνεται ενώ αυξάνεται και η μέγιστη τιμή της οι οποία κινείται προς το όριο διαρροής. Η διεύρυνση της εφελκυστικής ζώνης με την προώθηση του ηλεκτροδίου είναι αναμενόμενη λόγω του υψηλότερου θερμικού φορτίου που δέχεται το τεμάχιο καθώς το ηλεκτρόδιο παραμένει όλο και περισσότερη ώρα επάνω στο τεμάχιο με αποτέλεσμα στις τελευταίες διατομές το θερμικά επηρεαζόμενο υλικό να είναι περισσότερο. Σε σύγκριση τώρα με τα πειραματικά αποτελέσματα, αρχικά μπορούμε να πούμε πως το γεγονός ότι η εφελκυστική ζώνη έχει πάχος περί τα 20mm εξηγεί το γιατί στο πείραμα δεν εμφανίστηκε πουθενά εφελκυστική τάση. Εάν παρατηρήσουμε το τελικό σχήμα της κατανομής των τάσεων του πειράματος (κεφάλαιο 4) θα δούμε πως οι ροζέτες είναι τοποθετημένες στα όρια της περιοχής πλάτους εντός 20mm στον άξονα της ραφής με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να «πιάσουμε» την εφελκυστική ζώνη παρά μόνο στην ροζέτα 1 (όπου και εμφανίζεται εφελκυστική ορθή τάση) πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι στις τελευταίες διατομές του τεμαχίου η εφελκυστική ζώνη έχει διευρυνθεί (μεγάλο θερμικό φορτίο). Για να μπορούσαμε να δούμε εφελκυστικές τάσεις στα αποτελέσματα του πειράματος μόνο ένα τοποθετούσαμε ροζέτα επάνω στην ραφή πράγμα που είναι αδύνατο λόγω της ανωμαλίας της επιφάνειάς. Επίσης εκτός του ότι οι κατανομές συμφωνούν με τις θεωρητικές όχι όμως με αυτές των μαλακών ανθρακοχαλύβων, βλέπουμε πως και τα νούμερα των τάσεων που προκύπτουν να είναι στην ίδια τάξη μεγέθους, απέχουν όμως σημαντικά από αυτές που προέκυψαν από το πείραμα ή αναμενόταν θεωρητικά. Πιο συγκεκριμένα ενώ στην κορυφή της εφελκυστικής ζώνης αναμένουμε μία τιμή κοντά στο όριο διαρροής του υλικού (360MPa) παίρνουμε τάσεις που κινούνται στα 220 – 290 MPa. Επίσης στην θλιπτική ζώνη οι τιμές που εμφανίζονται στην έναρξη αυτής (30 – 50 MPa) προσεγγίζουν σημαντικά αυτές του πειράματος σε τέτοια βαθμό που να μπορούμε να πούμε πως είναι ικανοποιητικές. Όμως καθώς κινούμαστε προς τα άκρα του τεμαχίου η σύμπτωση των αποτελεσμάτων δεν είναι ικανοποιητική.

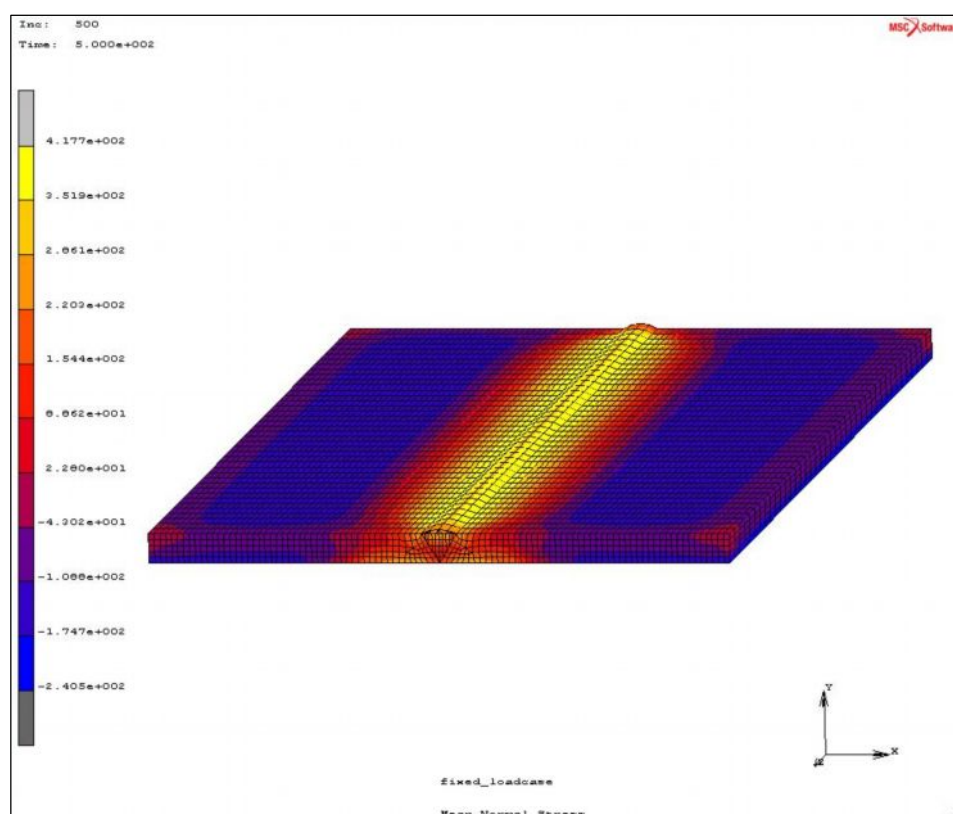
Προχωρώντας τον σχολιασμό μας, όσον αφορά στην κατανομή των ισοδύναμων κατά von Mises τάσεων (εικόνα 5.29) η μόνη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι το γεγονός ότι ποτέ δεν έχουμε αρνητικές τιμές, γεγονός που αναμενόταν από την θεωρία και ισχύει σε οποιαδήποτε κατανομή και αν σχεδιάσουμε την κατανομή.

Συνεχίζοντας τις παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω σχετικά με τις μηχανικές οριακές συνθήκες (συγκράτηση τεμαχίου), από την εικόνα 5.30 βλέπουμε πως οι τάσεις λαμβάνουν πολύ μεγάλες τιμές στις περιοχές της συγκράτησης, τιμές που δεν ανταποκρίνονται σε καμία περίπτωση στην πραγματικότητα καθώς υπερβαίνουν κατά πολύ το όριο διαρροής του υλικού μας που είναι και η μέγιστη τιμή που μπορεί να εμφανιστεί σύμφωνα με την θεωρία. Να σημειωθεί ότι οι υψηλές αυτές τιμές θα μπορούσαν να γίνουν δεκτές μόνο σε περίπτωση που εμφανίζονταν για μικρό χρονικό διάστημα τις στιγμές που η θερμική πηγή θα βρισκόταν πάνω από τα σημεία αυτά

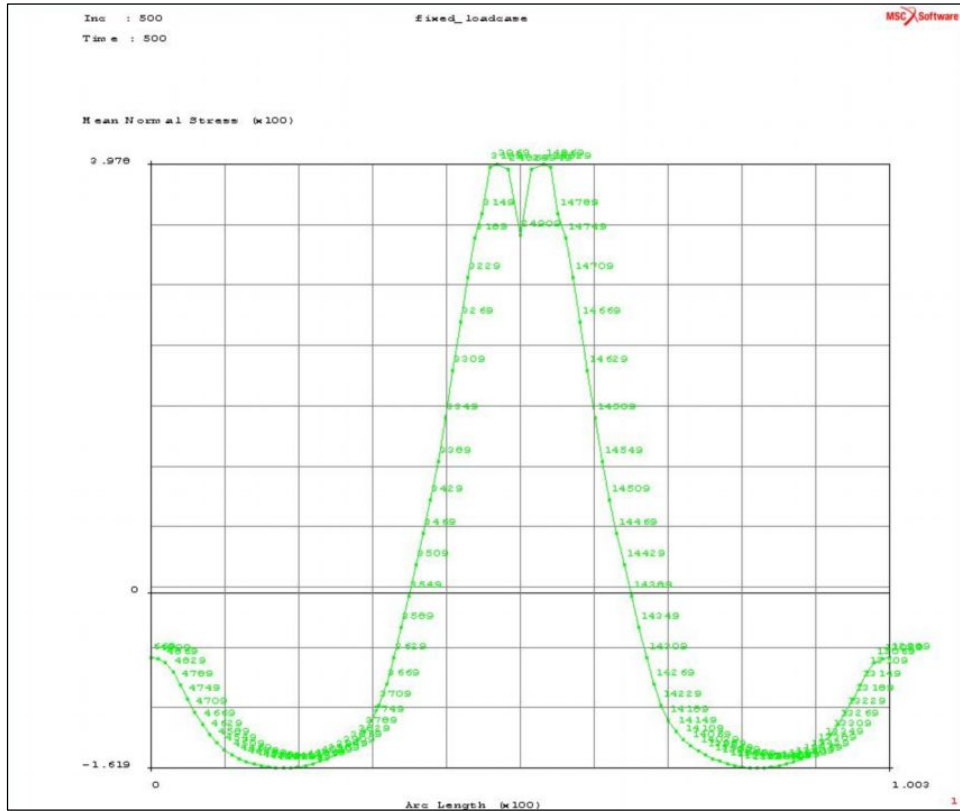
(τήξη & διαρροή του υλικού), στην συνέχεια όμως και με την απόψυξη του υλικού θα έπρεπε οι τιμές να κυμαίνονται στα επίπεδα του ορίου διαρροής. Βέβαια όταν απομακρυνόμαστε από τις περιοχές αυτές βλέπουμε πως οι αριθμητικές τιμές επανέρχονται στα κανονικά (σε σχέση με την θεωρία) επίπεδα. Το γεγονός αυτό, μαζί με όσα παρατηρήσαμε παραπάνω σχετικά με τις τιμές των ορθών τάσεων, μας επιτρέπει να πούμε πως δεν υπήρξε αρκετά επιτυχημένος σαν τρόπος μοντελοποίησης η επιλογή αυτών των οριακών μηχανικών συνθηκών και επηρέασε δυσμενώς όλες τις περιοχές του τεμαχίου αλλοιώνοντας τα αποτελέσματά μας σε σχέση με αυτά που αναμέναμε τόσο από το πείραμα όσο και από την θεωρία (κατανομές τάσεων σε μαλακούς ανθρακοχάλυβες). Για τον λόγο αυτό στην συνέχεια έγινε εκ νέου επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιώντας διαφορετική οριακή συνθήκη στήριξης των τεμαχίων.

5.5.7.3 Εκ νέου επίλυση του μοντέλου με νέες οριακές συνθήκες συγκράτησης

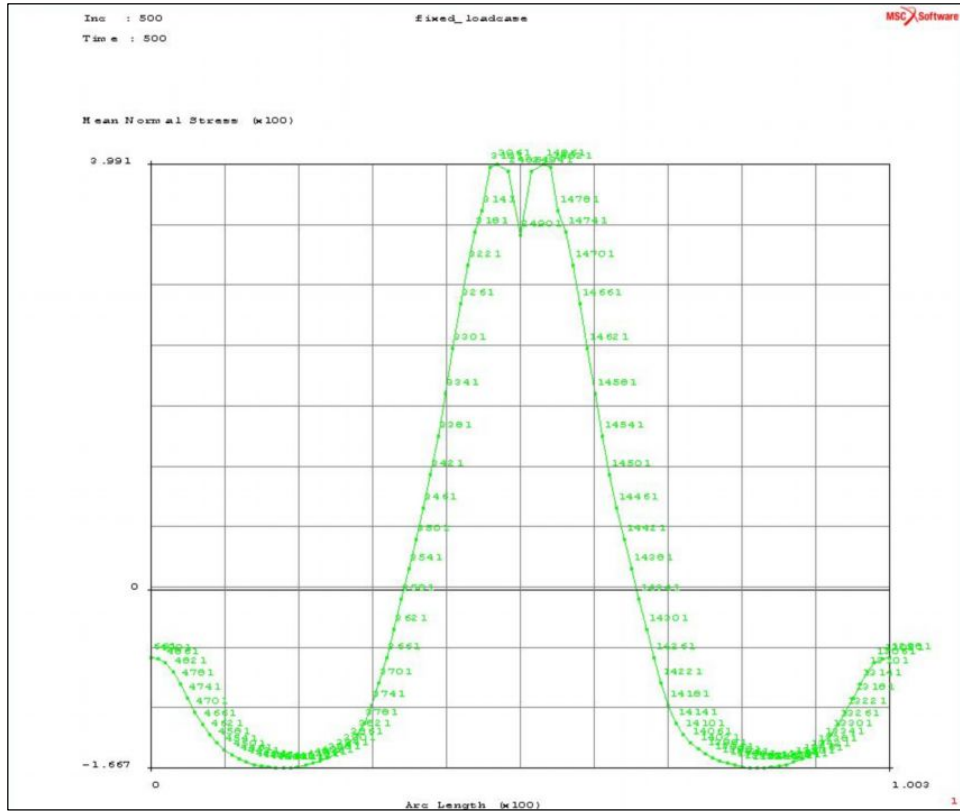
Στην νέα αυτή επίλυση του μοντέλου μας επιλέξαμε σαν μηχανική οριακή συνθήκη συγκράτησης του τεμαχίου τον περιορισμό κίνησης των κόμβων σε ολόκληρη την κάτω πλευρά αυτό. Να σημειωθεί πως η επιλογή αυτή έγινε σε συμφωνία με τα όσα ακολουθούνται στο παράδειγμα του εγχειριδίου χρήσης του MARC. Όπως είναι προφανές, ότι έχει να κάνει με το θερμικό κομμάτι του προβλήματος δεν μεταβλήθηκε τίποτα. Στην συνέχεια παραθέτουμε όλα εκείνα τα γραφήματα που δείχνουν την μεταβολή στις κατανομές των τάσεων σε σχέση με την προηγούμενη επιλογή συγκράτησης. Όπως θα δούμε και στην συνέχεια οι μεταβολές υπήρξαν εντυπωσιακά θετικές σε όλα τα αποτελέσματα.



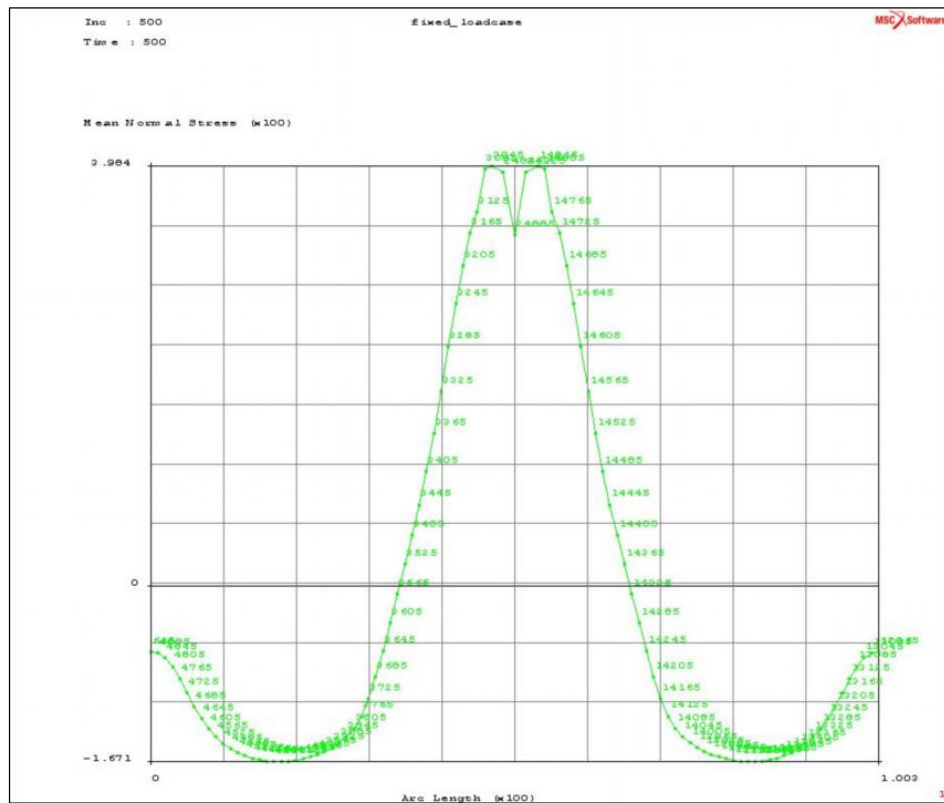
Εικόνα 5.31: Χρωματικό γράφημα των ορθών παραμενουσών τάσεων (τέλος απόψυξης) με την πάκτωση της κάτω πλευράς



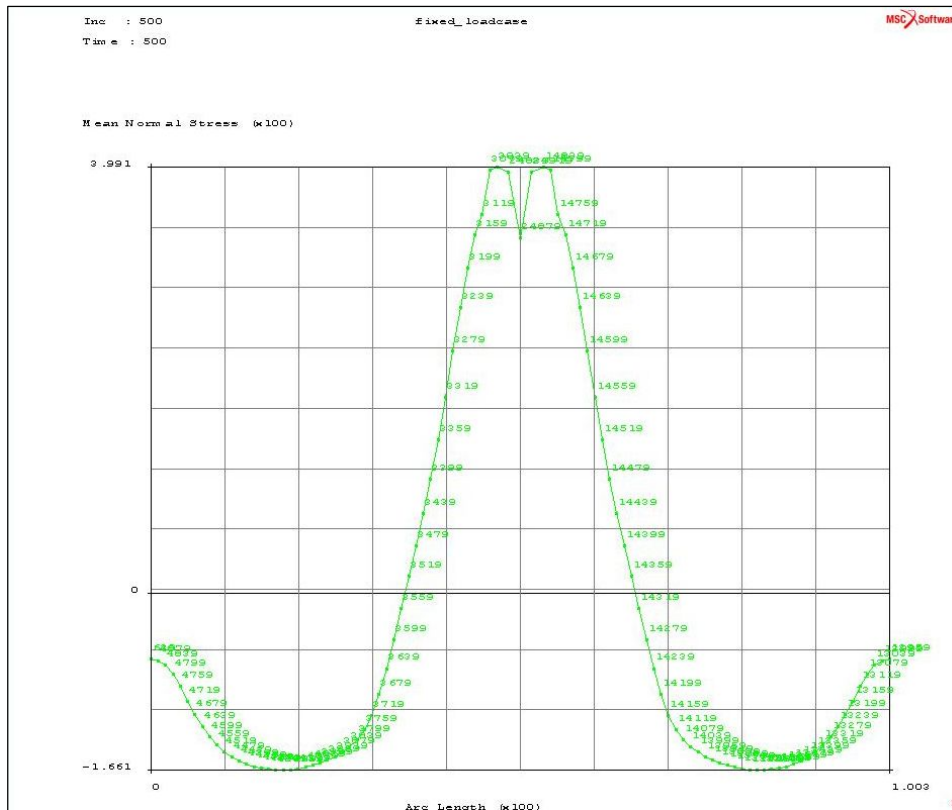
Εικόνα 5.32: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σx στην θέση της ροζέτας 7 μετά την πάκτωση της κάτω πλευράς



Εικόνα 5.33: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σx στην θέση των ροζετών 4, 5 & 6 μετά την πάκτωση της κάτω πλευράς



Εικόνα 5.34: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σx στην θέση της ροζέτας 2 μετά την πάκτωση της κάτω πλευράς

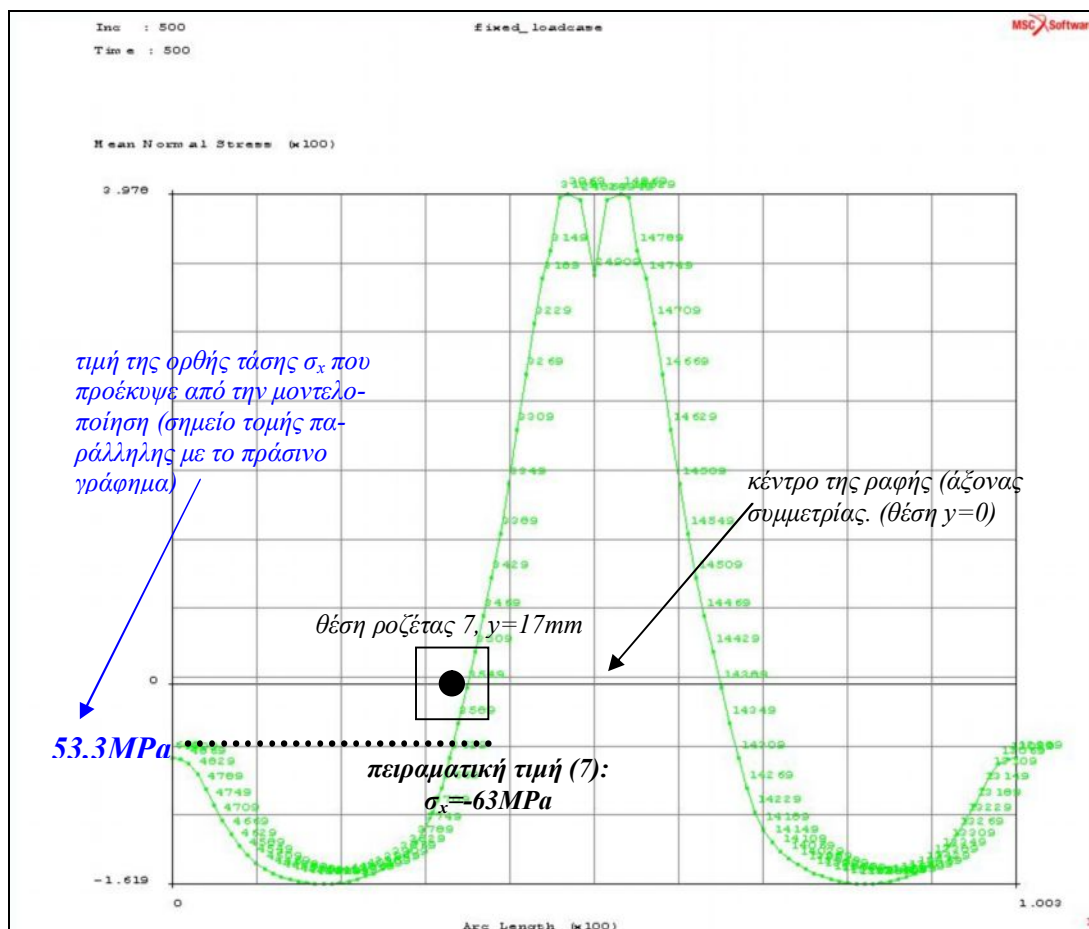


Εικόνα 5.35: Κατανομή των ορθών παραμενουσών τάσεων σx στην θέση της ροζέτας 1 μετά την πάκτωση της κάτω πλευράς

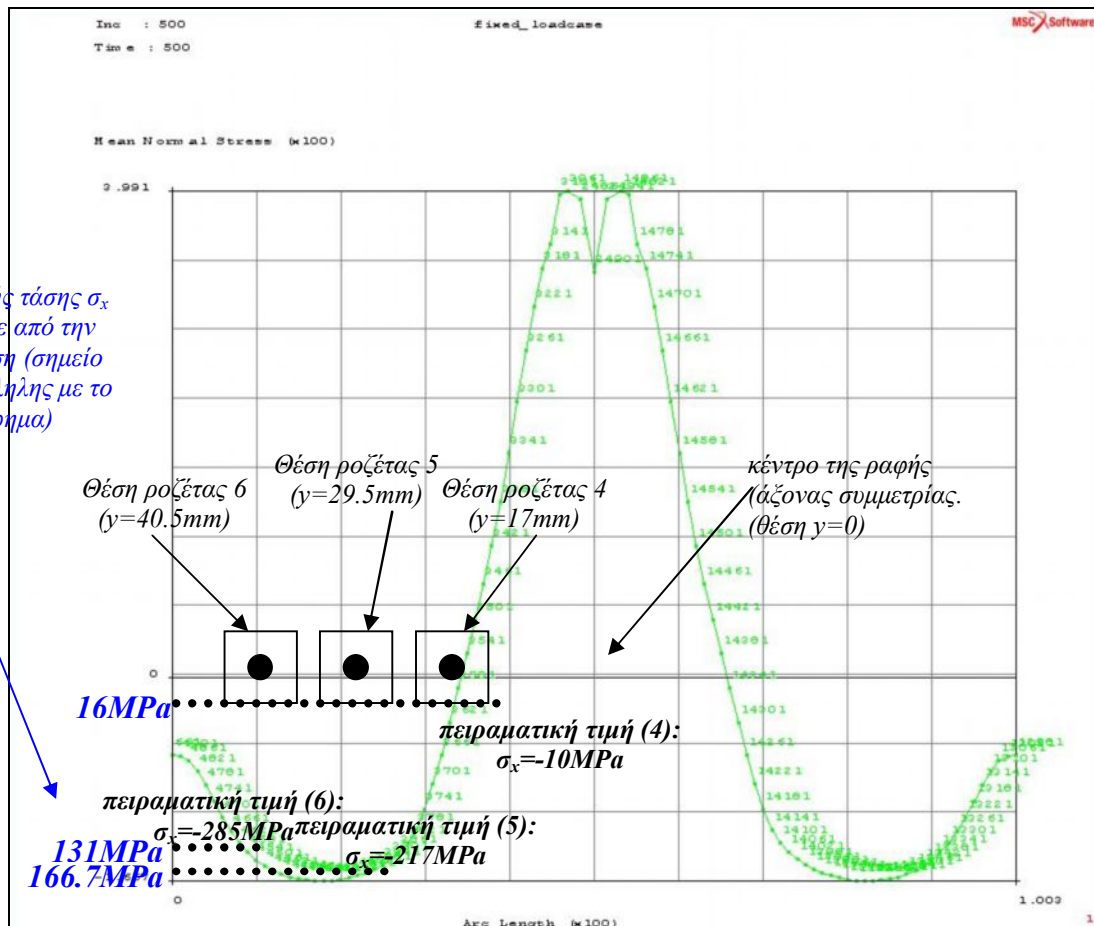
Παρατηρώντας το ποιοτικό γράφημα των παραμενουσών τάσεων στην νέα επίλυση του μοντέλου (εικόνα 5.31) μπορούμε να δούμε πολύ καθαρά την εναλλαγή των τάσεων (εφελκυστική – εφελκυστική – θλιπτική – θλιπτική) η οποία είναι σύμφωνη με την θεωρία αλλά επιπλέον σύμφωνη και με την πορεία των τάσεων στους μαλακούς ανθρακοχάλυβες όπου και η θλιπτική τάση παρουσιάζει μία μικρή μείωση στα άκρα του τεμαχίου.

Τέλος, παρατηρώντας τις κατανομές των παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν κατά την πορεία του ηλεκτροδίου στις διάφορες θέσεις που έχουμε τοποθετήσει τις ροζέτες, βλέπουμε εντυπωσιακή σύγκλιση τόσο με τα πειραματικά όσο και με τα θεωρητικώς αναμενόμενα αποτελέσματα πάντα λαμβάνοντας υπόψη πως πρόκειται για μοντελοποίηση ενός φαινομένου πράγμα που σημαίνει πως δεν είναι δυνατόν να υπάρξει 100% σύγκλιση. Ξεκινώντας από την κατανομή που προκύπτει, συγκρίνοντας την με την θεωρητική για τους μαλακούς ανθρακοχάλυβες (κεφάλαιο 4, εικόνα 4.59), μπορούμε να πούμε πως πρόκειται για την ίδια μορφή και άρα αναμενόταν αφού το υλικό που χρησιμοποιήσαμε ήταν χάλυβας C45 που ανήκει στην κατηγορία των μαλακών ανθρακοχαλύβων. Επίσης παρατηρούμε όπως και στην προηγούμενη επίλυση πως το εύρος της εφελκυστικής ζώνης είναι περίπου 20mm και με την κίνηση του ηλεκτροδίου διευρύνεται, άρα όσα προαναφέραμε σχετικά με το θέμα αυτό εξακολουθούν να ισχύουν. Επιπλέον οι αριθμητικές τιμές που προκύπτουν βρίσκονται αρκετά κοντά με τις πειραματικές και τις θεωρητικές τόσο που η διαφορά τους να δικαιολογείται από το γεγονός ότι πρόκειται για μοντελοποίηση και είναι αδύνατη η ακριβής σύμπτωση των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, οι μέγιστες τιμές στην εφελκυστική ζώνη κυμαίνονται στα 390MPa με όριο διαρροής στα 360MPa, δηλαδή τιμές πολύ κοντινές εάν σκεφθούμε πως ο προσδιορισμός του ορίου διαρροής δεν έγινε ακολουθώντας τις πρότυπες διαδικασίες. Ειδικότερα για τις πειραματικές τιμές,

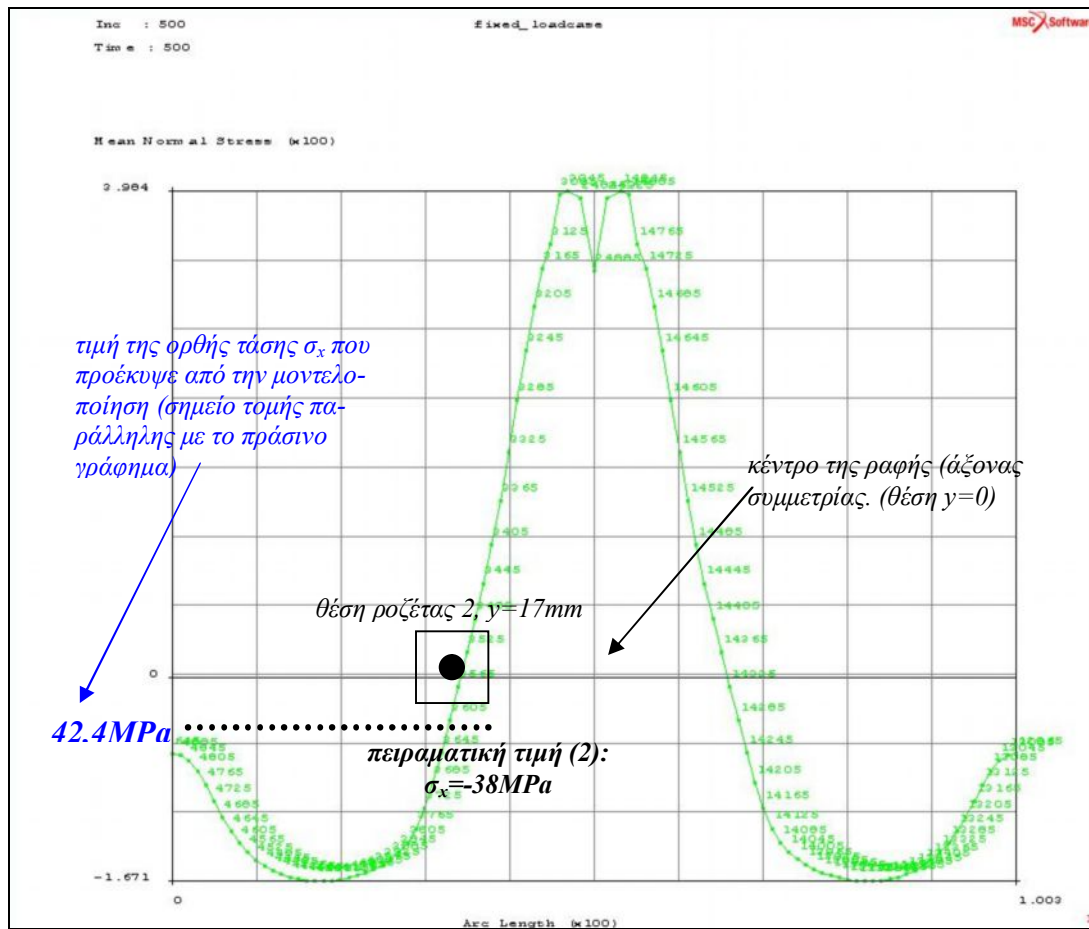
θα ήθελα να αναφερθώ στην προτελευταία μέτρηση (ροζέτα 6) στην οποία εμφανίζεται σημαντικά μεγάλη τιμή της θλιπτικής τάσης γεγονός που δεν δικαιολογείται ούτε από την θεωρία ούτε από την μοντελοποίηση καθώς στην θέση αυτή οι τάσεις θα έπρεπε να παρουσιάζουν μία ελαφρώς φθίνουσα πορεία. Κατά την πραγματοποίηση της διάτρησης στην θέση αυτή εμφανίστηκαν προβλήματα στον εξοπλισμό διάτρησης και πιο συγκεκριμένα έσπασε ένα δόντι από το κονδύλι που πραγματοποιούσε την οπή γεγονός που αλλοίωσε την μέτρηση και πιθανώς για αυτό παρουσιάστηκε δυσαρμονία των αποτελεσμάτων στην θέση αυτή. Τελειώνοντας το κεφάλαιο, αξίζει να παραθέσουμε εκ νέου τα τέσσερα τελευταία σχήματα στα οποία όμως θα έχει σημειωθεί η θέση που βρίσκεται η αντίστοιχη ροζέτα και το διάνυσμα της τάσης που μετρήθηκε. Με τον τόπο αυτό θα φανεί ακόμη πιο καθαρά η πολύ ικανοποιητική σύγκλιση των τιμών των τάσεων ανάμεσα στο πείραμα, την θεωρία και την μοντελοποίηση.



Εικόνα 5.36: Η κατανομή των ορθών τάσεων σ_x στην διατομή της ροζέτας 7. Επάνω στο γράφημα σημειώνεται η ακριβής θέση της ροζέτας στον εγκάρσιο άξονα y , η πειραματική τιμή της τάσης και η τιμή που δίνει η μοντελοποίηση. Παρατηρούμε σημαντική σύγκλιση με διαφορά ως προς την πειραματική τιμή της τάσης του 15%

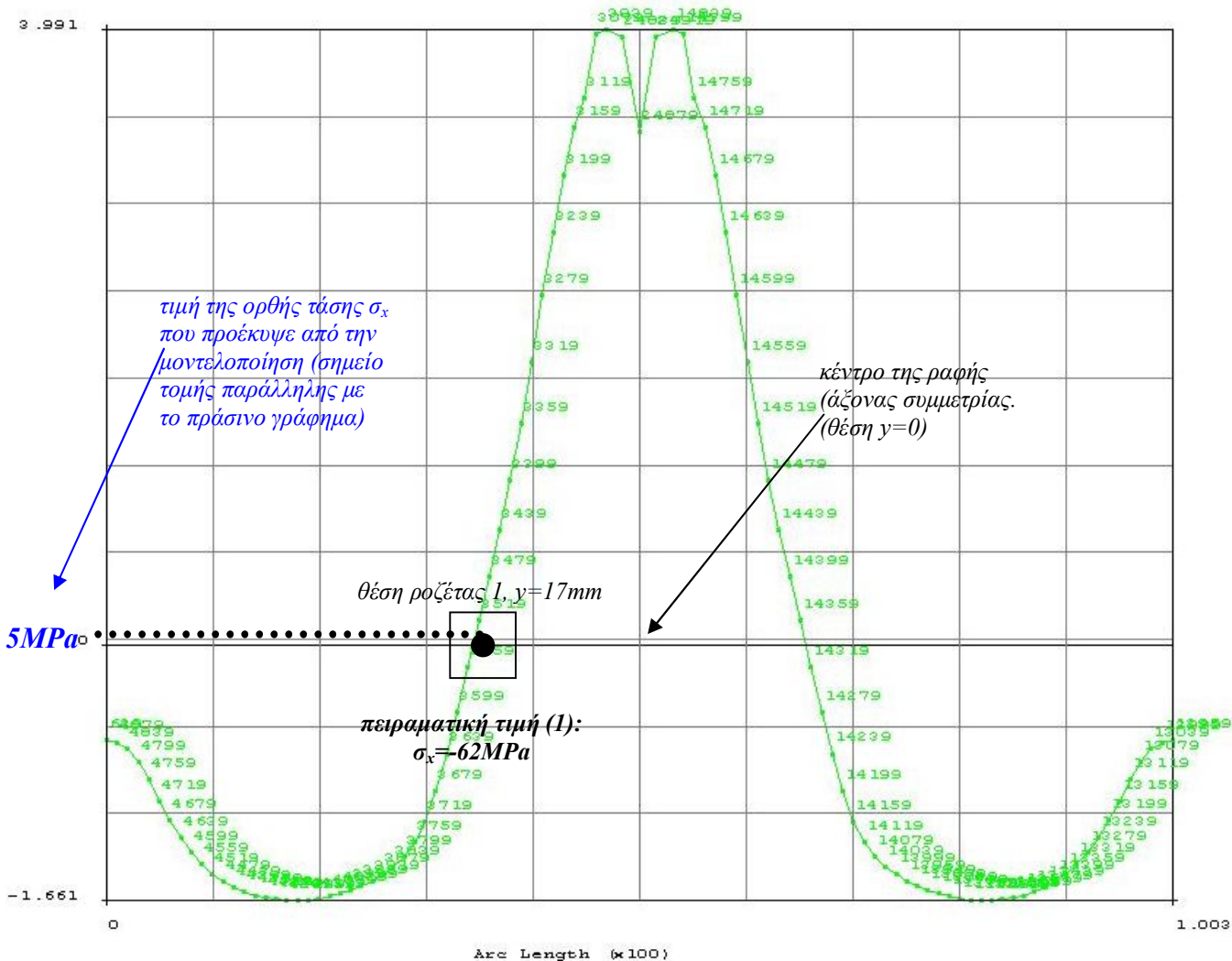


Εικόνα 5.37: Η κατανομή των ορθών τάσεων σ_x στην διατομή των ροζετών 4, 5 και 6. Επάνω στο γράφημα σημειώνεται η ακριβής θέση της ροζέτας στον εγκάρσιο άξονα y , η πειραματική τιμή της τάσης και η τιμή που δίνει η μοντελοποίηση. Παρατηρούμε σημαντική σύγκλιση με διαφορά ως προς την πειραματική τιμή της τάσης του 37.5% για την ροζέτα 4 (αλλά πολύ κοντινά νούμερα), 23% για την ροζέτα 5 σημαντική απόκλιση για την ροζέτα 6 όπου όπως προαναφέραμε η μέτρηση ήταν προβληματική



Εικόνα 5.39: Η κατανομή των ορθών τάσεων σ_x στην διατομή της ροζέτας 7. Επάνω στο γράφημα σημειώνεται η ακριβής θέση της ροζέτας στον εγκάρσιο άξονα y , η πειραματική τιμή της τάσης και η τιμή που δίνει η μοντελοποίησης. Παρατηρούμε σημαντική σύγκλιση με διαφορά ως προς την πειραματική τιμή της τάσης του 10%

Mean Normal Stress (x100)



Εικόνα 540: Η κατανομή των ορθών τάσεων σ_x στην διατομή της ροζέτας 1. Επάνω στο γράφημα σημειώνεται η ακριβής θέση της ροζέτας στον εγκάρσιο άξονα y , η πειραματική τιμή της τάσης και η τιμή που δίνει η μοντελοποίηση. Παρατηρούμε να υπάρχει απόκλιση των τιμών, είναι σημαντικό όμως πως φαίνεται να έχουμε περάσει, έστω και πολύ οριακά στο εφελκυστικό πεδίο γεγονός που επιβεβαιώνει ποιοτικά το πείραμά μας.

Κεφάλαιο 6^ο: **ΣΥΝΟΨΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στο κεφάλαιο αυτό, το τελευταίο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και πριν παραθέσουμε την βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε θα γίνει μία συνολική και συνάμα συνοπτική ανασκόπηση όσων έλαβαν χώρα στα πλαίσια της εκπόνησης της εργασίας αυτής καθώς επίσης και των συμπερασμάτων και των εμπειριών που προέκυψαν. Στόχος της ανασκόπησης αυτής είναι να μπορεί ο αναγνώστης, διαβάζοντας το κεφάλαιο αυτό, να έχει μία συνολική εικόνα για το περιεχόμενο και τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής.

Στα πλαίσια, λοιπόν, της διπλωματικής εργασίας αποφασίστηκε να μελετηθεί το φαινόμενο της ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων κατά την συγκόλληση χάλυβα. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει όλες εκείνες τις συνιστώσες που θεωρήθηκαν απαραίτητες έτσι ώστε να δοθεί μία πλήρης και κατανοητή εικόνα γύρω από τις παραμένουσες τάσεις, οι οποίες είναι η θεωρητική αναζήτηση, το πείραμα και αριθμητική μοντελοποίηση. Τελικός στόχος ήταν να συγκεραστούν τα αποτελέσματα των τριών αυτών συνιστωσών στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό έτσι ώστε να προκύψει τελικά το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, το οποίο σε αυτή την περίπτωση θα υποδήλωνε την επιτυχία του όλου εγχειρήματος.

Αρχικά διεξήχθη η, απαραίτητη σε κάθε περίπτωση, θεωρητική διερεύνηση του θέματος που αφορούσε και στους τρεις από του τέσσερις βασικούς άξονες που υποδηλώνει ο τίτλος της εργασίας: τις συγκολλήσεις, τις παραμένουσες τάσεις και την πειραματική μέθοδο για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων.

Στην θεωρητική ενότητα που αφορά στις συγκολλήσεις γίνεται μία σύντομη αναφορά στην σημασία αυτών για την μηχανολογία, παρουσιάζεται συνοπτικά η τοπολογία μίας συγκολλητής σύνδεσης και τέλος γίνεται μία όσο το δυνατόν συντομότερη αναφορά στις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας (χειρωνακτική συγκόλληση τόξου και συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο σε ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων) καθώς και στις βασικές παραμέτρους αυτών.

Στην θεωρητική ενότητα που αφορά στις παραμένουσες τάσεις, αρχικά επισημαίνεται η σημασία τους για κάθε συγκολλητή σύνδεση καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα (με κυριότερο αυτών την στρέβλωση) και τελικά την αστοχία αυτής. Αυτό τις καθιστά ιδιαίτερα σημαντικές για τον Μηχανολόγο Μηχανικό ο οποίος καλείται να τις μελετήσει για να μπορέσει είτε να τις αποφύγει δρώντας προληπτικά είτε να τις εξαλείψει είτε να τις χρησιμοποιήσει έξυπνα. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να έχει κατανοήσει τον μηχανισμό ανάπτυξής τους ο οποίος βασίζεται στην παρεμπόδιση της συστολής του τετηγμένου μετάλλου (κατά τη συγκόλληση) από το υπόλοιπο υλικό λόγω της σχετικής ακαμψίας του. Η παρεμπόδιση της συστολής εκφράζεται μέσω ανάπτυξης εφελκυστικού τασικού πεδίου στην ζώνη τήξης το οποίο εξισορροπείται μέσω θλιπτικού πεδίου το οποίο αναπτύσσεται στην υπόλοιπη περιοχή του βασικού μετάλλου. Η κατανομή αυτή είναι η βασική που προβλέπει η θεωρία και παρουσιάζεται σχηματικά στα πλαίσια της θεωρητικής ενότητας για της παραμένουσες τάσεις. Τέλος στην ενότητα αυτή, συμπεριλαμβάνονται επίσης και οι βασικές κατηγοριοποιήσεις των παραμενουσών τάσεων καθώς και οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνισή τους όπως το είδος του μετάλλου, το είδος της συγκόλλησης, οι συνθήκες συγκόλλησης και οι συνθήκες συγκράτησης, με τους οποίους θα έλθουμε σε «πρακτική» επαφή στο πειραματικό σκέλος.

Στην θεωρητική ενότητα που αφορά στις μεθόδους μέτρησης (πειραματικού προσδιορισμού) των παραμενουσών τάσεων γίνεται μία συνοπτική αναφορά στις κύριες μεθόδους που χρησιμοποιούνται και στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος της διάνοιξης οπής (hole drilling method) η οποία θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό σκέλος για τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων. Στα πλαίσια της μεθόδου αυτής παρουσιάζεται τόσο το θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο αυτής όσο και τα κωδικοποιημένα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν έτσι ώστε μέσω της μεθόδου να ληφθούν οι τελικές τιμές των τάσεων. Ο μηχανισμός για την υλοποίηση της μεθόδου έγκειται στην πραγματοποίηση οπών στο υλικό που συγκολλήθηκε, στο οποίο προηγουμένως έχουν προσαρμοστεί πολύ ευαίσθητα επιμηκυνσιόμετρα. Μέσω των οπών αυτών, οι τάσεις «ανακουφίζονται» και μέσω των επιμηκυνσιόμετρων δίνουν κάποιες παραμορφώσεις οι οποίες μετρούνται με την βοήθεια ειδικών οργάνων και μέσω της μαθηματικής διαδικασίας που προβλέπει η μέθοδος, καταλήγοντας τελικά στην τιμή της παραμένουσας τάσης.

Μετά το τέλος της θεωρητικής προσέγγισης των τριών βασικών αξόνων της εργασίας όπως αυτοί προαναφέρθηκαν, ακολούθησε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του πειράματος. Στα πλαίσια του πειράματος πραγματοποιήθηκε συγκόλληση σε χάλυβα τύπου C45 (μαλακός ανθρακοχάλυβας DIN 17200) καθώς πρόκειται για ένα υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον σε μηχανολογικές εφαρμογές και άρα παρουσιάζει ενδιαφέρον. Η επιλογή των διαστάσεων των τεμαχίων που συγκολλήθηκαν ήταν τέτοια ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άνετης προσαρμογή των επιμηκυνσιόμετρων που απαιτεί η μέθοδος που επελέγει, το ικανό πλήθος και η σωστή διάταξη των οποίων παρέχει τις τιμές των τάσεων σε διευθύνσεις παράλληλα και κάθετα ως προς την κόλληση. Κατά την πραγματοποίηση της κόλλησης σημειώθηκαν τα χαρακτηριστικά αυτής (τάση και ένταση ρεύματος, διάμετρος ηλεκτροδίου, ταχύτητα συγκόλλησης) τα οποία έχουν ιδιαίτερη σημασία τόσο για το ίδιο το πείραμα όσο και για την μοντελοποίηση αυτού στην συνέχεια. Εξίσου σημαντική αποδείχθηκε (αρχικά ίσως να υποτιμήθηκε ελαφρώς) η συγκράτηση των τεμαχίων για την επιτυχημένη κόλλησή τους η οποία υλοποιήθηκε με τρία μικρά πονταρίσματα κατά μήκος του αυλακιού κόλλησης έτσι ώστε τα τεμάχια να κρατηθούν σταθερά και ακίνητα το ένα ως προς το άλλο. Μετά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης κολλήθηκαν τα επιμηκυνσιόμετρα και πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη των οπών μέσω τις οποίας λήφθηκαν οι τιμές των παραμενουσών τάσεων σε εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση ως προς την ραφή, αγνοώντας την τρίτη διεύθυνση (κατά το βάθος) οι τιμές στην οποία θεωρούνται αμελητέες λόγω του μικρού πάχους ελάσματος που συγκολλήθηκε (5mm). Τα αποτελέσματα αυτά συμπυκνώθηκαν σε ένα συγκεντρωτικό σχήμα στο οποίο επάνω στο σχέδιο του τεμαχίου (άνοψη) τοποθετήθηκαν οι ροζέτες και τα διανύσματα των τάσεων που προέκυψαν σε κάθε μία. Μέσω του σχήματος αυτού, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικώς προβλεπόμενα (τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικότερα σε αυτή τη φάση) και διαπιστώθηκε ικανοποιητική σύγκλιση η οποία ήταν κυρίως ποιοτική καθώς οι θεωρητικές κατανομές δεν προβλέπουν αναλυτικές τιμές και ισχύουν γενικότερα για τα υλικά. Βασικές θεωρήσεις που επαληθεύτηκαν είναι πως η εφελκυστική περιοχή αποτελεί μικρό ποσοστό της συνολικής και περιορίζεται στην στενή γειτονιά της ραφής πράγμα που καθιστά δύσκολη της εύρεσή της μέσω της μεθόδου διάνοιξης οπής. Αυτό συμβαίνει διότι για να εντοπιστεί η εφελκυστική περιοχή (δηλαδή να μετρηθούν εφελκυστικές τάσεις) θα πρέπει να προσαρμοστούν επιμηκυνσιόμετρα πάρα πολύ κοντά ή / και πάνω στην ραφή πράγμα το οποίο γενικά παρουσιάζει δυσκολίες. Γενικά στις ληφθείσες πειραματικές τιμές, φαίνεται ολοκάθαρα η θλιπτική περιοχή ενώ στις περιοχές όπου έχει εφαρμοστεί μεγαλύτερο θερμικό φορτίο εμφανίστηκε εφελκυστική τιμή γεγονός που είναι

ιδιαίτερα σημαντικό καθώς προβλέπεται από την θεωρία. Στις περιοχές αυτές το υλικό που έχει επηρεαστεί θερμικά είναι περισσότερο και η εφελκυστική ζώνη ανοίγει σε πλάτος με αποτέλεσμα να είναι «εντοπίσιμη» μέσω του πειράματος. Γενικά ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να αντιστοιχιστούν οι πειραματικές τιμές με αυτές των θεωρητικών διαγραμμάτων (πάντα για τις αντίστοιχες θέσεις πάνω στο τεμάχιο) θεωρώντας τελικά πως οι τιμές του πειράματος είναι αποδεκτές.

Το τελευταίο κομμάτι της εργασίας αυτής σχετίζεται με τον τέταρτο βασικό άξονα του θέματος που έχει να κάνει με τον αριθμητικό υπολογισμό των τάσεων μέσω προσομοίωσης της συγκόλλησης που πραγματοποιήθηκε στο πείραμα στο περιβάλλον ενός πακέτου πεπερασμένων στοιχείων (συγκεκριμένα το MARC Mentat) και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν από το πείραμα και με αυτά που προβλέπονται θεωρητικά. Για την επίτευξη του τελικού στόχου της σύγκλισης των αποτελεσμάτων σημαντικό ρόλο έπαιξε η επιλογή του τρόπου «μεταφοράς» της συγκόλλησης του πειράματος στο περιβάλλον του προγράμματος, δηλαδή η μοντελοποίηση. Οι βασικοί άξονες πάνω στους οποίους κινηθήκαμε για να προσεγγίσουμε την συγκόλληση στο περιβάλλον του προγράμματος ήταν η κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου βάσει των διαστάσεων των τεμαχίων που συγκολλήθηκαν στην πραγματικότητα και η θεώρηση πως η διαδικασία της συγκόλλησης μπορεί να προσεγγισθεί ικανοποιητικά από μία πηγή θερμότητας η οποία κινείται επάνω στην προτεινόμενη γεωμετρία και διοχετεύει θερμότητα σε αυτή (μόνο την περιοχή της ραφής) το ποσό της οποίας θα προκύψει από τα δεδομένα του πειράματος (τάση και ένταση ρεύματος συγκόλλησης και βαθμός απόδοσης μεθόδου) καθώς επίσης και από την έκταση της επιφάνειας μέσω της οποίας θεωρείται ότι γίνεται η συναλλαγή. Τα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά του μοντέλου που πρέπει να ρυθμιστούν είναι η μοντελοποίηση του τρόπου συγκράτησης του τεμαχίου καθώς και η αλληλεπίδραση αυτού με το περιβάλλον (φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας). Η επιλογή του τρόπου συγκράτησης του τεμαχίου στο περιβάλλον του προγράμματος έγινε με τον περιορισμό κίνησης των κόμβων στις περιοχές όπου πραγματοποιήθηκαν τα πονταρίσματα, ενώ η συναλλαγή θερμότητας υλοποιήθηκε με την κατασκευή επιφανειακής οριακής συνθήκης μέσω της οποίας ορίστηκε ποιο ποσοστό της θερμότητας που λαμβάνεται από το τεμάχιο θα αποβάλλεται έτσι ώστε να προσομοιωθούν οι απώλειες θερμότητας. Μετά την επίλυση του μοντέλου διαπιστώθηκε αρχικά ικανοποιητική σύγκλιση με την θεωρία ως προς το θερμικό σκέλος του προβλήματος (θερμοκρασιακά πεδία και απόψυξη του τεμαχίου) γεγονός που δείχνει επιτυχημένη μοντελοποίηση της συγκόλλησης ως προς αυτό (το ποσό θερμότητας, η επιφάνεια συναλλαγής αυτής και οι οριακές συνθήκες συναλλαγής θερμότητας τεμαχίου – περιβάλλοντος ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα). Στο μηχανικό σκέλος του προβλήματος (παραμένουσες τάσεις) παρατηρήθηκε ικανοποιητική σύγκλιση με την θεωρία στο ποιοτικό επίπεδο (οι κατανομές των τάσεων και η εναλλαγή τους επάνω στο τεμάχιο προσεγγίζουν τις θεωρητικές ικανοποιητικά) από την άλλη όμως στο ποσοτικό επίπεδο (τιμές των τάσεων) παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές με την θεωρία και το πείραμα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την παρατήρηση έντονων ανωμαλιών του τασικού πεδίου (ιδιαίτερα υψηλές τιμές αδικαιολόγητες σε κάθε περίπτωση) στις περιοχές όπου επιλέχθηκε η μοντελοποίηση να γίνει με περιορισμό των κόμβων, η ανάγκη διαφοροποίησης του τρόπου μοντελοποίησης της συγκράτησης του τεμαχίου ήταν επιβεβλημένη. Έτσι λοιπόν έγινε εκ νέου επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιώντας αυτή την φορά τον τρόπο συγκράτησης που προτείνει το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος και είναι ο περιορισμός κίνησης στην κάτω πλευρά του τεμαχίου. Η επίλυση του μοντέλου μετά την αλλαγή αυτή έδωσε αποτελέσματα που προσεγγίζουν ικανοποιητικά τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά τα πειραματικά και τα θεωρητικώς προβλεπόμενα.

Πιο συγκεκριμένα οι κατανομές που προκύπτουν είναι παρόμοιες με αυτές που προβλέπονται για τους μαλακούς ανθρακοχάλυβες ενώ οι τιμές των τάσεων συγκρινόμενες με αυτές του πειράματος και της θεωρίας διαφέρουν τόσο που μας επιτρέπεται να πούμε πως η διαφορά οφείλεται στο γεγονός πως πρόκειται για μοντελοποίηση ενός πολύπλοκου φαινομένου και άρα είναι αδύνατο να προσομοιώσουμε ακριβώς όλες τις συνθήκες για να πάρουμε ίδια αποτελέσματα. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως πρόκειται για ένα μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει την διαδικασία της συγκόλλησης και να προβλέψει της παραμένουσες τάσεις που αυτή θα προκαλέσει.

Τελειώνοντας την σύντομη αυτή ανασκόπηση, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και την εμπειρία που αποκτήθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής αξίζει να αναφερθεί πως υπάρχει μεγάλο πεδίο δράσης διαθέσιμο για όποιον επιθυμεί να ασχοληθεί με την μελέτη των παραμενουσών τάσεων ακολουθώντας την πορεία που χαραχθηκε στην εργασία αυτή (συνδυασμός θεωρίας – πειράματος – μοντελοποίησης). Για περισσότερη εμβάθυνση στο θέμα προτείνεται ο σχεδιασμός πειραμάτων υπό όσο το δυνατόν αυστηρά καθορισμένων συνθηκών συγκόλλησης σε τεμάχια πολλών διαστάσεων κατά προτίμηση μεγάλων για να υπάρξει πλήρης και ορατή ανάπτυξη των τασικών πεδίων σε μεγάλη ποικιλία και πολλούς συνδυασμούς υλικών έτσι ώστε να μελετηθούν και οι μετατοπίσεις των θερμοκρασιακών και των τασικών πεδίων. Επίσης όσον αφορά στην μοντελοποίηση, υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης λεπτομερέστατων μοντέλων τα οποία θα εκμεταλλεύονται και τα κατά περίπτωση ειδικά χαρακτηριστικά που παρέχουν πολλά υπολογιστικά πακέτα για τις συγκολλήσεις. Γενικά πρόκειται για ένα επιστημονικό πεδίο με πληθώρα δυνατοτήτων μελέτης και εξερεύνησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Έντυπη

1. S. Kou, “Welding Metallurgy”, εκδ. Wiley – Interscience.
2. R. J. Sacks “Welding: principles & practices, εκδ. Glencoe, McGraw – Hill.
3. R. J. Sacks “Essentials of welding”, εκδ. Glencoe, McGraw – Hill.
4. Θ. Α. Διαμαντούδης “Συγκολλήσεις Μετάλλων”.
5. Δ. Ι. Παντελής, “Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών”, εκδ. Παπασωτηρίου 1996.
6. Α. Γ. Μάμαλης, “Κατεργασίες των υλικών”, εκδ. Ε.Μ.Π. 1991.
7. Ν. Ανδριανόπουλος, Ε. Κυριαζή, Κ. Λιακόπουλος, “Πειραματική αντοχή των υλικών”, εκδ. Συμείων 1991.
8. Μ. Κ. Ριτσώνης, διπλωματική εργασία με θέμα “Μέτρηση παραμενουσών τάσεων με την μέθοδο της διάνοιξης οπής”, Τομέας τεχνολογίας των κατεργασιών, σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα 2006.
9. L. Jeffus “Welding principles & applications”, εκδ. Delmar publishers Inc.
10. H. B. Carry “Modern welding technology”, εκδ Prentice Hall.
11. T.-L. Teng, C.-P. Fung, P.-H. Chang, W.-C. Young, “Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds, International Journal of Pressure Vessels and Piping 78 (2001), 523 – 538.
12. T.-L. Teng, C.-C. Lin, “Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 75 (1998), 857 – 864.
13. D. M. Finch, F. M. Burdekin, “Effects of welding residual stresses on significance of defects in various types of welded joint”, Engineering Fracture Mechanics vol. 41, No. 5 (1992), 721 – 735.
14. J.J. Janosch, “International Institute of welding work on residual stresses and its application to industry”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 85 (2008), 183 – 190.
15. C.-H. Lee, K.-H. Chang, “Numerical analysis of residual stresses in welds of similar or dissimilar steel weldments under superimposed tensile loads”, Computational Material Science 40 (2007), 548 – 556.
16. J. Arnold Free, Robin F. D. Porter Goff, “Predicting residual stresses in multi-pass weldments with the finite element method”, Computers & Structures, vol. 32, No. 2 (1989), 365 – 378.
17. Y. V. L. N. Murthy, G. Venkata Rao, P. Krishna Iyer, “Numerical simulation of welding and quenching processes using transient thermal and thermo – elasto – plastic formulations”, Computers & Structures, vol. 60, No. 1 (1996), 131 – 154.
18. Z. Barsoum, “Residual stress analysis and fatigue of multi – pass welded tubular structures”, Engineering Failure Analysis 15 (2008), 863 – 874.
19. S. V. Pearce, V.M. Linton, E. C. Oliver, “Residual stresses in a thick section high strength T – butt weld”, Materials Science and Engineering A 480 (2008), 411 – 418.
20. R. H. Leggatt, “Residual stresses in welded structures”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 85 (2008), 144 – 151.

21. J. Mackerle, "Finite element analysis and simulation of welding: a bibliography (1976 – 1996)", *Modeling and Simulation in Material Science and Engineering* (1996), 501 – 533.
22. P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stresses, part 1 – measurement techniques", *Material Science and Technology* 17 (2001).
23. P. J. Withers, H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stresses, part 2 – nature and origins", *Material Science and Technology* 17 (2001).
24. J. A. Francis, S. Koundou, H. K. D. H. Bhadeshia, H. J. Stone, R. B. Rogge, P. J. Withers, "Transformation temperatures and welding residual stresses in ferritic steels", *Proceedings of PVP 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference* July 22 – 26, 2007, San Antonio, Texas.
25. J. A. Francis, H. K. D. H. Bhadeshia, P. J. Withers, "Welding residual stresses in ferritic power plant steels", *Material Science and Technology* vol. 23, No. 9 (2007).
26. INFCS and INFCS – xxxB, INFINITY C Strain Meter/Controller (Operator's Manual), Newport Electronics (Εγχειρίδιο χρήσης του οργάνου μέτρησης των παραμορφώσεων),
27. MARC user's guide (οδηγός χρήσης του προγράμματος MARC Mentat 2007r1).
28. "Measurements of residual stresses by the Hole – Drilling strain gage method", *Bulletin TN – 503 – 5*, Measurements group of Vishay, 1993.
29. "Shunt calibration of strain gage instrumentation", *Bulletin TN – 514*, Measurements group of Vishay, 1988.
30. "Strain gage rosettes – Selection, application and data reduction", *Bulletin TN – 515*, Measurements group of Vishay, 1990.
31. "Surface preparation for strain gage bonding", *Bulletin B – 129 – 8*, Measurements group of Vishay, 1993.
32. "Model RS – 200 Milling guide – Instruction Manual", Measurements group of Vishay, 1992.
33. "Strain gages and Instrumentation for residual stresses Measurements", *Bulletin 304 – E*, Measurements group of Vishay, 1990.

Ηλεκτρονική – Διαδίκτυο

1. www.matweb.com (ιστότοπος αναζήτησης υλικών και των ιδιοτήτων τους).
2. www.matbase.com (ιστότοπος αναζήτησης υλικών και των ιδιοτήτων τους).
3. www.measurementsgroup.com
4. www.vishay.com
5. www.newportelectronics.com