



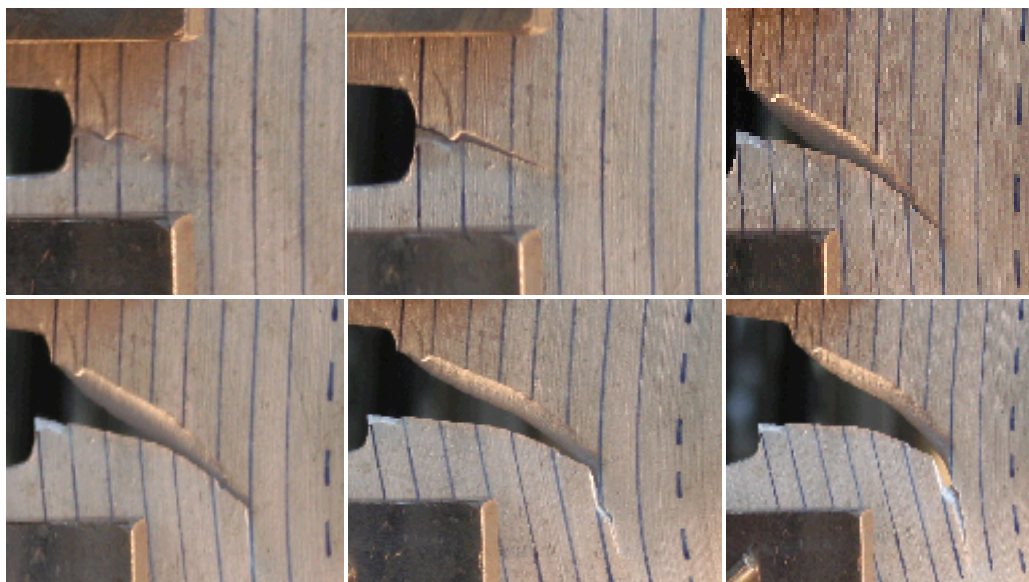
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ
ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ
ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ»**

ΡΗΓΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β. Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2009

Περίληψη

Η παρούσα διπλωτική εργασία πραγματεύεται την πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών μέσω της χρήσης δοκιμίων εφελκυσμού μικρής κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα, έγινε μακροσκοπική παρατήρηση του τρόπου διάδοσης μιας προϋπάρχουσας ρωγμής τόσο σε ενισχυμένα ελάσματα κράματος αλουμινίου 1561 όσο και σε συγκολλητά (υβριδικά) ελάσματα, δύο κραμάτων αλουμινίου (1561 και 5083), τα οποία εξετάστηκαν σε συνθήκες φόρτισης μονοαξονικού εφελκυσμού. Σκοπός της εργασίας ήταν η κατανόηση της συμπεριφοράς μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής σε μια σύνθετη –υβριδική– ναυπηγική κατασκευή από κράματα αλουμινίου, καθώς και η επέκταση των υφιστάμενων γνώσεων και πληροφοριών γύρω από τα κράματα αλουμινίου, των οποίων η χρήση στη ναυπηγική γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική στη σύγχρονη εποχή.

Μέσω της πειραματικής ανάλυσης, καθίσταται δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς και της αντοχής σε θραύση σύνθετων υβριδικών κατασκευών με απλές κατασκευές που χρησιμοποιούνται ήδη σε ναυπηγικές εφαρμογές.

Ο στόχος της διπλωματικής επιτεύχθηκε μέσω της διεξαγωγής ενός πειραματικού προγράμματος που περιλάμβανε τρεις ομάδες δοκιμίων: (α) υβριδικά δοκίμια τύπου “dogbone” για την εκτίμηση βασικών μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλητού υλικού, (β) συμπαγή συγκολλητά δοκίμια εφελκυσμού τύπου CT που αποτελούνταν από δύο κράματα αλουμινίου, και (γ) συμπαγή ενισχυμένα δοκίμια εφελκυσμού τύπου CT τα οποία περιείχαν ενίσχυση βολβολάμας.

Το πειραματικό πρόγραμμα οδήγησε στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των ενισχυτικών και των συγκολλήσεων στη διάδοση της ρωγμής σε ελάσματα αλουμινίου, η οποία, γενικά, μπορεί να χαρακτηριστεί ευεργετική για μια ναυπηγική κατασκευή η οποία λειτουργεί σε ένα σύνθετο περιβάλλον τάσεων και φορτίσεων. Επίσης, έγινε αξιολόγηση σχεδιαστικών παραμέτρων που επιδρούν στη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών, όπως είναι η κατασκευαστική διάταξη και η θέση της ενίσχυσης στο έλασμα, καθώς επίσης και η ποιότητα της συγκόλλησης, η οποία εξετάστηκε μέσω μεταλλογραφικής παρατήρησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση του φαινομένου της θραύσης σύγχρονων ναυπηγικών κατασκευών, ώστε να αποφευχθεί η επανάληψη αστοχιών και να διασφαλιστεί η κατασκευαστική ακεραιότητά τους. Επίσης, μπορεί να οδηγήσει στη διάνοιξη νέων τομέων έρευνας και επέκτασης των αποτελεσμάτων της στο μέλλον, που αναμφισβήτητα αποτελεί επιτακτική ανάγκη στη σύγχρονη ναυπηγική.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1	Εισαγωγή.....	8
1.2	Περιγραφή του Προβλήματος.....	8
1.3	Προσέγγιση του Προβλήματος.....	9
1.4	Υφιστάμενη Έρευνα.....	10
1.5	Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	10
1.6	Χρηστικότητα Διπλωματικής Εργασίας.....	12
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ.....	13
2.1	Χρήση του Αλουμινίου στη Ναυπηγική.....	13
2.1.1	Ιστορική εξέλιξη.....	13
2.1.2	Σύγχρονες εφαρμογές του αλουμινίου στη ναυπηγική.....	14
2.1.3	Εφαρμογές υβριδικών ναυπηγικών κατασκευών.....	21
2.2	Γενικές Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Αλουμινίου για Ναυπηγική Χρήση..	21
2.2.1	Γενικά.....	21
2.2.2	Μεταλλουργία του αλουμινίου και βασικές ιδιότητες.....	22
2.2.3	Βασικά κράματα αλουμινίου.....	24
2.2.3.1	Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου.....	24
2.2.3.2	Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου.....	26
2.2.4	Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου.....	31
2.2.5	Αλουμίνιο στη ναυπηγική: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	34
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ.....	36
3.1	Οι Φορτίσεις και οι Αποκρίσεις της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου ..	36
3.2	Είδη Φορτίσεων που Ασκούνται στις Ναυπηγικές Κατασκευές.....	36
3.2.1	Στατικές φορτίσεις.....	37
3.2.2	Δυναμικές φορτίσεις.....	38
3.3	Η Αντοχή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου.....	40
3.4	Η Κατασκευαστική Διαμόρφωση των Ναυπηγικών Κατασκευών.....	41
3.5	Είδη Αστοχίας των Ναυπηγικών Κατασκευών.....	42
3.6	Το Φαινόμενο της Θραύσης στις Ναυπηγικές Κατασκευές.....	45
3.6.1	Τα είδη των θραύσεων.....	46
3.6.2	Ψαθυρή και όλκιμη θραύση.....	47
3.6.3	Θραύση από κόπωση.....	50
3.7	Η Μηχανική της Θραύσης.....	51
3.7.1	Γραμμική-ελαστική θεωρία της θραύσης.....	52
3.7.2	Ελαστο-πλαστική θεωρία θραύσης και η πλαστική ζώνη στο άκρο της ρωγμής.....	55
3.8	Κρίσιμος Συντελεστής Έντασης Τάσης.....	57
3.8.1	Επίδραση διαφόρων παραγόντων στη δυσθραυστότητα.....	59

3.8.2	Δυσθραυστότητα κατ' εγκοπή	61
3.9	Κριτήρια Αποφυγής Θραύσης.....	63
3.9.1	Ορισμός γενικών επιπέδων συμπεριφοράς των υλικών	64
3.10	Αποτελέσματα Αστοχίας.....	66
3.10.1	Μέθοδοι ασφαλούς αστοχίας (fail safe approach)	67
3.11	Οι Ρωγμές στη Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου	68
3.11.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία κατασκευής λόγω ρωγμών ...	70
3.11.2	Όλκιμες και ψαθυρές ρωγμές.....	72
3.11.3	Τρόπος γένεσης ρωγμών (crack initiation)	72
3.11.4	Διάδοση ρωγμών (crack propagation).....	74
3.11.5	Διάδοση ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα	75
3.11.6	Μέθοδοι πρόληψης και επισκευής ρωγμών	78
3.12	Η Επιλογή και η Χρήση των Ενισχυτικών στη Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου.....	81
3.12.1	Τύποι ενισχυτικών στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου	81
3.12.2	Τα συστήματα ενίσχυσης της γάστρας του πλοίου	82
3.12.3	Σχέση και αλληλεπίδραση ελάσματος – ενισχυτικού	84
3.12.3.1	Ενισχυμένο έλασμα υπό καμπτικές φορτίσεις	85
3.12.3.2	Ενισχυμένο έλασμα υπό θλιπτικές φορτίσεις	85
3.12.4	Οι τύποι ενισχυτικών που εξετάστηκαν.....	88
3.12.5	Συμπεριφορά αλουμινένιων ενισχυμένων ελασμάτων	89
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	91
4.1	Σκοπός Πειραματικής Διαδικασίας.....	91
4.2	Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας	92
4.2.1	Επιλογή εξεταζόμενου υλικού	93
4.2.2	Επιλογή πειραματικών δοκιμίων και οι ομάδες των πειραμάτων.....	96
4.2.3	Ύπαρξη προϋπάρχουσας διαμπερούς ρωγμής	98
4.2.4	Διατάξεις συγκολλήσεων των δοκιμίων του πειράματος	99
4.2.5	Συστήματα ενίσχυσης των δοκιμίων.....	102
4.2.5.1	Κατασκευαστική διαμόρφωση της ενίσχυσης	103
4.2.6	Παρουσίαση πειραματικής διάταξης.....	103
4.3	Μεταλλογραφική Παρατήρηση Επιφάνειας Συγκολλητών Δοκιμίων Εφελκυσμού	107
4.3.1	Μέθοδοι προετοιμασίας και παρατήρησης εξεταζόμενων δοκιμίων	108
4.3.1.1	Προετοιμασία δειγμάτων	108
4.3.2	Οπτική μικροσκοπία και στερεοσκοπία.....	111
4.3.3	Η μικροδομή του εξεταζόμενου υλικού.....	113
4.4	1 ^H Ομάδα Πειραμάτων: Πειραματικός προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού με χρήση δοκιμίων “dogbone”.....	119
4.4.1	Βασικές μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών	119
4.4.2	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και παρουσίαση των αποτελεσμάτων	123
4.5	2 ^H Ομάδα Πειραμάτων: Εφελκυστικές Δοκιμές σε Συγκολλητά CT Δοκίμια με Προϋπάρχουσα Ρωγμή	134
4.5.1	Συγκολλητά CT δοκίμια δύο κραμάτων αλουμινίου	134

4.5.2	Σύνοψη αποτελεσμάτων για τα συγκολλητά δοκίμια wCTyzi	148
4.6	³ H Ομάδα Πειραμάτων: Εφελκυστικές Δοκιμές σε Ενισχυμένα CT Δοκίμια με Ενίσχυση Βολβολάμας.....	152
4.6.1	Ενισχυμένα CT δοκίμια με ενίσχυση βολβολάμας.....	152
4.6.2	Ενισχυμένα CT δοκίμια με βολβολάμα χωρίς “Rear Plate”	152
4.6.2.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων για τα δοκίμια CTgiR.....	168
4.6.3	Ενισχυμένα CT δοκίμια με βολβολάμα και έλασμα πίσω από το ενισχυτικό.....	171
4.6.3.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων για τα δοκίμια CTgiRP.....	186
4.6.4	Σύνοψη αποτελεσμάτων ενισχυμένων δοκιμίων βολβολάμας και σύγκριση με συγκολλητά δοκίμια αλουμινίου	190
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	193
5.1	Σύνοψη Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	193
5.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων με Προηγούμενες Μελέτες.....	195
5.3	Στόχοι που Επιτεύχθηκαν μέσω της Διπλωματικής Εργασίας.....	197
5.4	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	200
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	203
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	209

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Βασίλη Ι. Παπάζογλου, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και Επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, για την πολύτιμη συμβολή του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και για το ενδιαφέρον που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια του πειραματικού προγράμματος. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Κωνσταντίνο Π. Γαλάνη για την πολύ σημαντική υποστήριξη και βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Θέλω ακόμα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Τσούβαλη, Αναληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για τη χρήσιμη βοήθειά του στην πειραματική διαδικασία, καθώς και τους κ.κ. Αθανάσιο Μαρκούλη και Χαράλαμπο Ξάνθη, τεχνικούς του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, υπεύθυνους για τον χειρισμό της μηχανής δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα Ναυπηγεία Ελευσίνας για την παροχή των ναυπηγικών ελασμάτων και την παρασκευή των δοκιμών που εξετάστηκαν και ιδιαιτέρως τον κ. Σταύρο Χιονόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών, για την πολύτιμη συμβολή του στην προετοιμασία των δοκιμών και την μεταλλογραφική παρατήρηση, καθώς και τους Νίκο Δανιόλο και Χαρά Σαράφογλου, από το προσωπικό του εργαστηρίου για τη βοήθειά τους. Τέλος, θέλω να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στο συμφοιτητή μου Γιάννη Αθανασάτο, χωρίς τη συμβολή του οποίου δεν θα είχε πραγματοποιηθεί η διπλωματική εργασία, καθώς επίσης την οικογένειά μου και στους φίλους μου για την υποστήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών μέσω της χρήσης δοκιμών μικρής κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση, παρατήρηση και κατανόηση του τρόπου διάδοσης των ρωγμών σε συγκολλητές ή/και ενισχυμένες ναυπηγικές κατασκευές, και ειδικότερα, η παρατήρηση της συμπεριφοράς μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής σε μια μεταλλική ναυπηγική κατασκευή από αλουμίνιο.

Λόγω της πολυπλοκότητας των παραγόντων που συμβάλλουν στη μετάδοση μίας ρωγμής σε ένα μεταλλικό υλικό, όπως είναι το αλουμίνιο, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη να υπάρξει δυνατότητα πρόβλεψης της πορείας και της κατεύθυνσης της ρωγμής, ιδιαίτερα σε ναυπηγικές κατασκευές, οι οποίες υπόκεινται σε πληθώρα φορτίσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής τους. Η ικανότητα πρόβλεψης του τρόπου διάδοσης της ρωγμής, καθώς και η κατανόηση των παραγόντων που επιδρούν σε αυτή, μπορούν να συντελέσουν στην αύξηση της αξιοπιστίας μιας κατασκευής και στην πιθανότητα μείωσης των περιστατικών ανεξέλεγκτης διάδοσης ρωγμών σε ναυπηγικές κατασκευές, όπως είναι τα πλοία.

1.2 Περιγραφή του Προβλήματος

Υπάρχει πληθώρα περιστατικών θραύσης και αστοχίας ναυπηγικών κατασκευών λόγω της αναπάντεχης διάδοσης ρωγμών, με πολλές φορές καταστροφικές συνέπειες για την ανθρώπινη ζωή και το περιβάλλον. Η πρόοδος της τεχνολογίας κατασκευής των πλοίων προϋποθέτει τη συνεχή αναζήτηση νέων υλικών και μεθόδων διαμόρφωσης και κατεργασίας τους, με στόχο τη δημιουργία νέων, βελτιωμένων ναυπηγικών κατασκευών. Το αλουμίνιο είναι ένα υλικό που τα τελευταία χρόνια βρίσκει όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στη ναυπηγική, κυρίως λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που διαθέτει σε σχέση με τον ναυπηγικό χάλυβα. Στο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες της συμπεριφοράς σε θραύση κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιούνται συχνά σε

ναυπηγικές κατασκευές, με σημαντικά αποτελέσματα. Η παρούσα εργασία, εστιάζει στην πειραματική ανάλυση σε θραύση σύνθετων κατασκευών, που διαθέτουν συγκολλητά τμήματα, ή διαφόρων ειδών ενισχύσεις. Έτσι, μέσω αυτής της ανάλυσης, καθίσταται δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς και της αντοχής σε θραύση σύνθετων υβριδικών κατασκευών με απλές κατασκευές που ήδη χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές.

1.3 Προσέγγιση του Προβλήματος

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε ορισμένα βασικά στάδια, έτσι ώστε να γίνει σωστή και αποτελεσματική προσέγγιση του προβλήματος, και να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Αρχικά, έγινε θεωρητική μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας γύρω από θέματα διάδοσης ρωγμών σε μεταλλικές κατασκευές, καθώς και σε κατασκευές από αλουμίνιο. Επίσης, συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν δημοσιεύσεις και άρθρα, που αφορούσαν θέματα διάδοσης ρωγμών, επιλέγοντας κυρίως μελέτες που αφορούσαν πειραματική ανάλυση, όπως αυτές που έγιναν στο Ε.Μ.Π., [10, 11].

Στη συνέχεια, ακολούθησε έρευνα και συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων και πληροφοριών από τους χρήστες των υλικών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, με σκοπό να εντοπισθούν τα προβλήματα που υπάρχουν στις σημερινές ναυπηγικές κατασκευές, καθώς και να εξακριβωθούν οι ανάγκες που εγείρονται γύρω από την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τη χρήση νέων υλικών στη σύγχρονη ναυπηγική.

Στο τελικό στάδιο, έγινε διεξοδική μελέτη, μέσω της μεταλλογραφικής παρατήρησης και της μακροσκοπικής πειραματικής ανάλυσης, σε δοκίμια υπό συνθήκες εφελκυσμού στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., η οποία οδήγησε σε εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων, και στη δημιουργία της ανάγκης για περαιτέρω μελλοντική έρευνα και ανάλυση.

1.4 Υφιστάμενη Έρευνα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πριν την έναρξη του πειραματικού προγράμματος, έγινε μελέτη της ήδη υπάρχουσας έρευνας και βιβλιογραφίας. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε σε παρεμφερή πειραματικά προγράμματα που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν, με σημαντικότερο παράδειγμα αυτό της διπλωματικής εργασίας του προπτυχιακού φοιτητή Μιχαλόπουλου Στέφανου [10], και της διδακτορικής εργασίας του Δρ. Γαλάνη Κωνσταντίνου [11], που αφορούν στη διάδοση ρωγμών σε συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού αλουμινίου 1561, ένα από τα δύο υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1.5 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο είναι εισαγωγικό, γίνεται παρουσίαση του θέματος της εργασίας, καθώς επίσης οριοθετείται ο σκοπός στον οποίο αποβλέπει αυτή η πειραματική μελέτη και το κίνητρό της.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με τη χρήση του αλουμινίου στη ναυπηγική μέχρι και τη σημερινή εποχή, καθώς επίσης με τις ιδιότητες του αλουμινίου που το καθιστούν πλεονεκτικό έναντι άλλων υλικών στη ναυπηγική. Επίσης, γίνεται αναφορά στα διάφορα κράματα αλουμινίου, στις σύγχρονες εφαρμογές τους, καθώς και στις μηχανικές τους ιδιότητες.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της θραυστομηχανικής στη ναυπηγική και γίνεται αναφορά στις βασικότερες φορτίσεις και αποκρίσεις των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου. Επίσης, αναφέρονται κριτήρια ασφαλούς κατασκευαστικής διαμόρφωσης των ναυπηγικών κατασκευών και αναλύονται τα είδη αστοχίας που μπορούν να προκύψουν σε αυτές. Επιπρόσθετα, περιγράφονται τα είδη ρωγμών και τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης και διάδοσής τους, μέσω συνοπτικής παρουσίασης βασικών αρχών της θεωρίας της μηχανικής της θραύσης. Επιπρόσθετα, αναφέρονται μέθοδοι πρόληψης και επισκευής των ρωγμών και παρουσιάζεται ο ρόλος των ενισχυτικών στη λειτουργική ζωή και στην αντοχή ενός πλοίου.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί και το πιο σημαντικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, καθώς περιλαμβάνει αναλυτικά την περιγραφή του πειραματικού προγράμματος. Το πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από τρεις ομάδες πειραμάτων. Η πρώτη ομάδα πειραμάτων περιλαμβάνει δοκιμές εφελκυσμού σε συγκολλητά δοκίμια τύπου “dogbone” για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υβριδικού υλικού που αποτελείται από τα κράματα αλουμινίου 1561 και 5083. Στη δεύτερη πειραματική ομάδα διενεργήθηκαν εφελκυστικές δοκιμές σε συγκολλητά μη ενισχυμένα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT (Compact Tension) που αποτελούνταν από τα κράματα αλουμινίου 1561 και 5083. Στην τρίτη και τελευταία ομάδα έγιναν πειραματικές δοκιμές σε ενισχυμένα συμπαγή CT δοκίμια που περιείχαν ενισχυτικά τύπου βολβολάμας, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το ρόλο των ενισχυτικών στη διάδοση ρωγμών σε κατασκευές αλουμινίου. Πριν την έναρξη της ανάλυσης κάθε ομάδας δοκιμών, παρουσιάζεται ο πειραματικός σχεδιασμός, και αναφέρονται οι παράγοντες που τον επηρεάζουν. Στη συνέχεια, για κάθε ομάδα δοκιμών, παρουσιάζονται πλήρως τα χαρακτηριστικά των δοκιμών, οι διαστάσεις και η διαμόρφωσή τους, και αναλύεται η πειραματική διαδικασία για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά με παράλληλη παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Η εξέταση της μορφής και της διάδοσης των αναπτυσσόμενων ρωγμών γίνεται μόνο σε μακροσκοπικό επίπεδο. Όμως, κρίθηκε απαραίτητο πριν την έναρξη των πειραμάτων να εξετασθεί και μικροσκοπικά η επιφάνεια των υλικών των δοκιμών για να διαπιστωθούν τυχόν ατέλειες που μπορεί να επηρεάσουν τα πειραματικά αποτελέσματα, κυρίως στην περίπτωση των δοκιμών που εμπεριείχαν συγκόλληση.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πραγματοποίηση του πειραματικού προγράμματος, και εξετάζεται κατά πόσο η πειραματική μελέτη συνέβαλε αποτελεσματικά στην επίτευξή του. Επίσης, γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, ώστε τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας να επιβεβαιωθούν και να επεκταθούν σε άλλα ναυπηγικά υλικά.

1.6 Χρηστικότητα Διπλωματικής Εργασίας

Ένας ακόμα βασικός στόχος της διπλωματικής εργασίας, πέρα από την χαρτογράφηση των αναπτυσσόμενων ρωγμών σε αλουμιένιες ναυπηγικές κατασκευές, είναι να αποτελέσει στο μέλλον χρήσιμο εργαλείο για τη συνέχιση των πειραματικών αναλύσεων και σε άλλα είδη υλικών, καθώς και σε κατασκευές που αποτελούνται από σύνθετα υβριδικά υλικά ή που εμπεριέχουν παρόμοιες ενισχυτικές διατάξεις. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διευρυνθεί περαιτέρω η γνώση γύρω από τις διαδικασίες της έναρξης, διάδοσης και σύλληψης των ρωγμών που ισχύουν τόσο για τις αλουμιένιες όσο και για άλλες μεταλλικές κατασκευές.

Είναι πολύτιμες οι πληροφορίες που συγκεντρώνει ένας ερευνητής κατά τη διάρκεια πειραματικών προγραμμάτων καθόσον, εκτός της ανάλυσης των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων, δημιουργεί συνάμα και μια βάση δεδομένων χρήσιμη και για μελλοντική έρευνα ή/και σημείο αναφοράς στην περίπτωση που ένα φαινόμενο είναι παραπλήσιο με πτυχές των πειραμάτων που εκτελέστηκαν. Πιστεύω, λοιπόν, ότι η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, πέραν των σημαντικών συμπερασμάτων που παρουσιάζονται αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο, όσο και των γενικών συμπερασμάτων του πέμπτου κεφαλαίου, προσφέρει στην ακαδημαϊκή κοινότητα και στη ναυπηγική βιομηχανία σημαντικές πληροφορίες, κρίσιμες για την ασφαλή συμπεριφορά ναυπηγικών κατασκευών που υποστηρίζουν είτε φορτία είτε ανθρώπινες ζωές. Τέλος, ο χρήστης, ο ναυπηγός και ο σχεδιαστής πλοίων, διαθέτει περισσότερα στοιχεία για να σχεδιάσει, κατασκευάσει και συντηρήσει το ναυπήγημά του με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

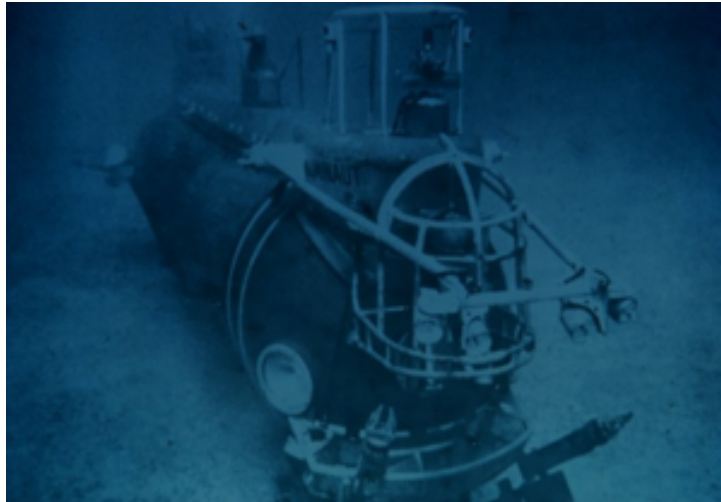
2.1 Χρήση του Αλουμινίου στη Ναυπηγική

2.1.1 Ιστορική εξέλιξη

Το αλουμίνιο εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε ναυπηγικές κατασκευές λίγο καιρό μετά την «είσοδο» του χάλυβα στη ναυπηγική. Γύρω στο 1891, ο Escher Wyss κατασκεύασε το πρώτο ατμοκίνητο πλοiάριο από αλουμίνιο, ενώ το 1984 ναυπηγήθηκε στην Αγγλία από τους Yarrow&Co η πρώτη τορπιλάκατος μήκους 20 m, εξ ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου που περιείχε 6% χαλκό [1].

Οι μέθοδοι ανέγερσης και κατασκευής του αλουμινίου εκείνη την εποχή ήταν ανεπαρκείς, γεγονός που κατέστησε την περαιτέρω χρήση του δύσκολη και περιορισμένη. Κατά τη διάρκεια του 1920 υπήρξαν εξελίξεις στην τεχνολογία παραγωγής του αλουμινίου, με αποτέλεσμα τη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων τους, όπως της μηχανικής αντοχής τους και της αντοχής τους στη διάβρωση. Επίσης, η εφεύρεση της μεθόδου συγκόλλησης με τόξο βολφραμίου και προστασία αερίου (GTAW), οδήγησε στην ανέγερση συγκολλητών κατασκευών από αλουμίνιο που χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα σε εμπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Το πρώτο πλοίο που κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο ήταν το δεξαμενόπλοιο ALUMINA, το 1959, μήκους 74 m.

Μια σημαντική εμπορική εφαρμογή του αλουμινίου στη ναυπηγική είναι το καταδυτικό σκάφος μεγάλων βαθών (deep submergence vehicle), ALUMINAUT, το οποίο ναυπηγήθηκε το 1965 και ήταν κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από το κράμα αλουμινίου 7079-T6 [1]. Το κυλινδρικής μορφής αυτό σκάφος είχε μήκος 15 m, εσωτερική διάμετρο 2 m και δυνατότητα κατάδυσης μέχρι βάθους 4,900 m, Εικόνα 2-1.



Εικόνα 2-1: Καταδυτικό σκάφος μεγάλων βαθών ALUMINAUT (1965)

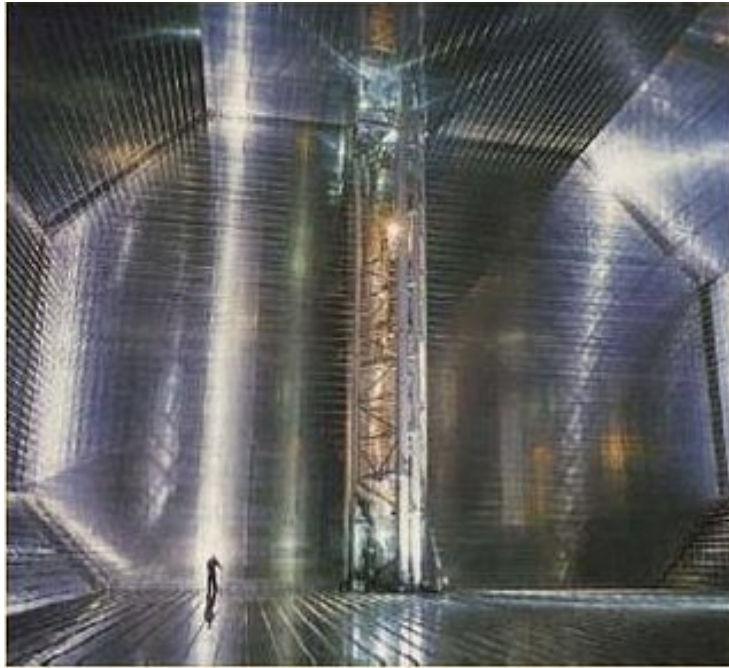
2.1.2 Σύγχρονες εφαρμογές του αλουμινίου στη ναυπηγική

Η ανάγκη για γρήγορες θαλάσσιες μεταφορές σε εμπορικές αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές έχουν αυξήσει σημαντικά την ανάγκη για ελαφρύτερα υλικά, όπως το αλουμίνιο, το οποίο εξασφαλίζει μια σειρά πλεονεκτημάτων που οφείλονται στον κατάλληλο συνδυασμό πολλών χρήσιμων ιδιοτήτων τους. Στη ναυπηγική γενικότερα χρησιμοποιούνται κυρίως τα κράματα των σειρών 5000 και 6000.

Παρακάτω, παρατίθενται οι σημαντικότερες σύγχρονες εφαρμογές του αλουμινίου στη ναυπηγική. Σε επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί αναφορά και επεξήγηση των ιδιοτήτων των ποικίλων κραμάτων αλουμινίου.

Δεξαμενές Πλοίων LNG

Μία από τις βασικές εφαρμογές του αλουμινίου στη ναυπηγική είναι η κατασκευή μεγάλων σφαιρικών δεξαμενών των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου αερίου (Liquified Natural Gas, LNG), οι οποίες μεταφέρουν καύσιμο σε υγροποιημένη μορφή, το οποίο φυλάσσεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-162°C). Οι δεξαμενές αυτές κατασκευάζονται συνήθως από το ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 5083 [1], Εικόνα 2-2.



Εικόνα 2-2: Εσωτερικό δεξαμενής πλοίου LNG

Σκάφη αναψυχής

Η χρήση σκαφών αναψυχής έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η χρήση του αλουμινίου γίνεται κυρίως σε μικρά σκάφη, μήκους έως και 6 m. Το χαμηλό βάρος των σκαφών αυτών είναι πλεονεκτικό, διότι μειώνει το κόστος κατασκευής και δίνει τη δυνατότητα πλεύσης με μικρότερες απαιτήσεις ισχύος και μεγαλύτερη αυτονομία. Επίσης, τα σκάφη από αλουμίνιο, φθείρονται λιγότερο από τα χαλύβδινα σκάφη, λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας του αλουμινίου, που έχει ως αποτέλεσμα, μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας [53], Εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3: Ταχύπλοο σκάφος κατασκευασμένο από κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται και στον εξοπλισμό των μικρών σκαφών, ανεξάρτητα του υλικού κατασκευής της γάστρας, στο εξωτερικό τους, στον πίνακα οργάνων κ.α. Τα μικρά σκάφη κατασκευάζονται συνήθως από τα κράματα αλουμινίου σειράς 5xxx και 6xxx, τα οποία αναλύονται παρακάτω. Αυτά παρουσιάζουν ένα συνδυασμό αντοχής, κόστους, ευκολίας κατασκευής και ανθεκτικότητας στη διάβρωση, που τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση σε μικρά σκάφη. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα κράματα 5052-H32, 5052-H34 και 6061-T6.

Για μεγαλύτερα σκάφη, μήκους 6 έως 36 m, χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου για τους ίδιους λόγους με τα μικρά σκάφη. Τα σκάφη αυτά κατασκευάζονται από συγκολλητά τμήματα για τη γάστρα, για τα εσωτερικά τμήματα και για τις καμπίνες. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κράμα για τη κατασκευή της γάστρας είναι το 5086-H32, σε πάχη από 0.45 έως 12.7 mm. Επίσης, από το ίδιο κράμα κατασκευάζονται φρακτές, δεξαμενές καυσίμου και καμπίνες, ενώ επίσης χρησιμοποιούνται και τα 5052 ή 6061.

Στα ιστιοπλοϊκά, η χρήση αλουμινίου οδηγεί σε σημαντική μείωση του βάρους του σκάφους, που βελτιώνει σημαντικά την απόδοσή του [53]. Μελέτες που έγιναν σε ξύλινα σκάφη, σκάφη από ενισχυμένο πλαστικό (glass reinforced plastic), και από αλουμίνιο, βρέθηκε σημαντική διαφορά βάρους. Το ξύλινο σκάφος ήταν βαρύτερο κατά 37% και το πλαστικό κατά 10% σε σχέση με το σκάφος από κράματα αλουμινίου, Εικόνα 2-4.



Εικόνα 2-4: Ιστιοπλοϊκό σκάφος κατασκευασμένο από κράματα αλουμινίου

Εμπορικά Σκάφη

Σημαντικές πρόσφατες εφαρμογές του αλουμινίου περιλαμβάνουν τη μεταλλική κατασκευή αλιευτικών σκαφών και σκαφών προσωπικού [53]. Όσον αφορά στα αλιευτικά σκάφη, η μείωση του βάρους και η σημαντική αντίσταση στη διάβρωση είναι τα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχουν οδηγήσει σε αντικατάσταση ολόκληρων στόλων αλιευτικών σκαφών με σκάφη από αλουμίνιο. Το αρχικό πλεονέκτημα του μικρού βάρους, επιτρέπει την προσθήκη επιπλέον εξοπλισμού στο σκάφος, χωρίς να επηρεάζεται η ευστάθεια. Επίσης, μεγάλα τμήματα του εξοπλισμού των εν λόγω σκαφών είναι κατασκευασμένα επίσης από αλουμίνιο, όπως δεξαμενές ψύξης, οι οποίες δε χρειάζονται προστατευτικά αντιδιαβρωτικά συστήματα χρωματισμού, όπως οι χαλύβδινες, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος συντήρησης.

Η χρήση αλουμινίου στα πλοία μεταφοράς προσωπικού και σε εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου μειώνει σημαντικά το βάρος τους, το χρόνο και κόστος κατασκευής τους, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει σημαντικά την ταχύτητά τους, με την ίδια ιπποδύναμη. Η πλειοψηφία των σκαφών μεταφοράς προσωπικού κατασκευάζεται από τα κράματα 5456-H321 ή 5456-H111, 5086 και 6061-T6.

Εκτός από τα μικρά εμπορικά σκάφη, υπάρχουν παραδείγματα χρήσης του αλουμινίου για την κατασκευή μεγάλων εμπορικών πλοίων, με πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το τριμαράν BENCHUJIGUA EXPRESS, το οποίο είναι σήμερα το μεγαλύτερο εμπορικό πλοίο στον κόσμο κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο. Πρόκειται για πλοίο τύπου τριμαράν, μήκους 126.7 m και ταχύτητας 40.5 knots, Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5: Benchijigua Express (2005)

Bulk Carriers

Τα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (bulk carriers) αποκομίζουν σημαντικά οφέλη από τη χρήση αλουμινίου, κυρίως στην ανέγερση των υπερκατασκευών, διότι με τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής, αυξάνεται η δυνατότητα μεταφοράς περισσότερου πρόσθετου φορτίου (payload). Οι αλουμινένιες κατασκευές μπορεί να έχουν έως και το 40% του βάρους μιας παρόμοιας χαλύβδινης κατασκευής.

Πολεμικά Πλοία

Οι στρατιωτικές απαιτήσεις δημιουργούν την ανάγκη για αναζήτηση ολοένα και μικρότερων, ελαφρύτερων και ευέλικτων πλοίων, με την ικανότητα να αναπτύσσουν ταχύτητες 60-80 knots ή περισσότερο. Αυτές οι απαιτήσεις οδήγησαν στην εφαρμογή του αλουμινίου στην κατασκευή πολεμικών σκαφών, με τη βοήθεια και νέων τεχνολογιών συγκολλήσεων (friction-stir welding)[10, 11].

Η σημαντική ανάπτυξη νέων κραμάτων τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην εφαρμογή του κράματος 5456 στις συγκολλητές υπερκατασκευές αντιτορπιλικών πλοίων. Ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου, η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου κράματος μπορεί να φτάσει και τους 100 με 350 tons. Η μείωση του

βάρους της υπερκατασκευής συμβάλει στην επαρκή ευστάθεια του πλοίου, ενώ η γάστρα παραμένει στενή, για να εξυπηρετεί στην ανάπτυξη υψηλών υπηρεσιακών ταχυτήτων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μείωση του βάρους άνωθεν του καταστρώματος του πλοίου, όπου και χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο ποσοστό του αλουμινίου. Αυτό προσδίδει στο σκάφος πολλά πλεονεκτήματα και μεγαλύτερη ευελιξία. Επίσης, χρήση αλουμινίου γίνεται και στον εξοπλισμό του πολεμικού σκάφους, για παράδειγμα σε πόρτες, παράθυρα, σκάλες, κ.α. Για αυτά τα τμήματα εξοπλισμού συνήθως χρησιμοποιούνται τα κατεργασμένα κράματα 5052, 5086, 6061 και 356, τα οποία εμφανίζουν σημαντική αντίσταση στη διάβρωση.

Ένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα χρήσης αλουμινίου για την κατασκευή πολεμικών πλοίων είναι το FSF-1 SEA FIGHTER, το μεγαλύτερο πολεμικό πλοίο του αμερικάνικου στόλου. Είναι πλοίο τύπου καταμαράν, μήκους 79m, εκτοπίσματος 450 tons και ταχύτητας 50 knots, Εικόνα 2-6.



Εικόνα 2-6: Sea Fighter

Επιβατηγά Πλοία

Η κατασκευή γάστρας και υπερκατασκευών από αλουμίνιο έχει βρει εφαρμογή και σε επιβατηγά πλοία, από τα οποία περισσότερα από χίλια είναι στις μέρες μας σε λειτουργία ανά τον κόσμο. Επίσης, κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί και σε υπερκατασκευές κρουαζιερόπλοιων, καθώς και σε πολλά σκάφη αναψυχής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Άλλες χρήσεις

Τα κράματα αλουμινίου έχουν βρει, επίσης, εφαρμογή στη μεταλλική κατασκευή υδροπτερυγίων (hydrofoils), τα οποία συνήθως κατασκευάζονται από το κράμα 6061, αμφίβιων πλοίων (hovercrafts), ναρκαλιευτικών, κανονιοφόρων, ποντονίων, κ.α [1].

Σημαντική εφαρμογή βρίσκει το αλουμίνιο και στην ανέγερση υπερκατασκευών και υπερστεγασμάτων τόσο σε πολεμικά, όσο και σε εμπορικά πλοία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς και σε καλύμματα στομίων κυτών. Επίσης, χρησιμοποιούνται ευρέως σε τμήματα εξοπλισμού του πλοίου, όπως σκάλες, κιγκλιδώματα, δικτυώματα, παράθυρα, πόρτες, κ.α.

Επίσης, χάρη στη σημαντική αντίστασή του σε διάβρωση, το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε τμήματα σωληνώσεων του πλοίου και σε εναλλάκτες θερμότητας.

Κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί, επίσης, και σε τμήματα υποβρυχίων, με σκοπό τη μείωση του βάρους τους, καθώς και σε εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου, Εικόνα 2-7.



Εικόνα 2-7: Εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου

Σημαντική εφαρμογή έχουν βρει τα ναυπηγικά κράματα αλουμινίου και σε εφαρμογές όπως ελικοδρόμια, κλιμακοστάσια, αλεξίπτρα διαφράγματα, καφασωτές κατασκευές, και σε πολλές άλλες μη ναυπηγικές εφαρμογές. Η μείωση του βάρους μπορεί να κυμαίνεται και στο 40-70% μιας όμοιας χαλύβδινης κατασκευής.

2.1.3 Εφαρμογές υβριδικών ναυπηγικών κατασκευών

Μια υβριδική κατασκευή μπορεί να αποτελείται από την ένωση δύο ή και περισσότερων διαφορετικών υλικών, με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Στη ναυπηγική, η χρήση υβριδικών κατασκευών και ιδίως από αλουμίνιο είναι αρκετά περιορισμένη στις μέρες μας, ενώ κυρίως έχουν εξετασθεί περιπτώσεις υβριδικών κατασκευών αποτελούμενων από χάλυβα και σύνθετα υλικά τύπου sandwich.

Ο βασικός σκοπός όλων των υβριδικών κατασκευών για τη γάστρα του πλοίου, είναι ο βέλτιστος συνδυασμός των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν τα υλικά αυτά. Για να εξασφαλισθεί η ασφαλής και χαμηλού κόστους λειτουργία τέτοιων κατασκευών, είναι απαραίτητη η ύπαρξη στιβαρής σύνδεσης μεταξύ των υλικών και ο σωστός έλεγχος της επιφάνειας της συγκόλλησης που τα συνδέει. Η συντήρηση και η εκμετάλλευση μιας τέτοιας κατασκευής έχει αυξημένο κόστος, αλλά μια καλή επιφάνεια σύνδεσης παραμένει σημαντικό στοιχείο για την πραγματοποίησή της.

Στην παρούσα εργασία, δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό συγκολλητά δοκίμια δύο κραμάτων αλουμινίου (5083 και 1561) με ύπαρξη αρχικής ρωγμής. Μέσω των δοκιμών εφελκυσμού των μικρής κλίμακας μη ενισχυμένων CT δοκιμίων, εξήχθησαν συμπεράσματα για το πώς αλληλεπιδρούν τα δύο μέταλλα μεταξύ τους, και έγιναν συγκρίσεις με μη υβριδικά δοκίμια, που αποτελούνταν από ένα μόνο υλικό. Η πειραματική διαδικασία παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

2.2 Γενικές Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά Αλουμινίου για Ναυπηγική Χρήση

2.2.1 Γενικά

Ο βασικότερος λόγος που καθιστά το αλουμίνιο ιδανικό για χρήση σε ναυπηγικές κατασκευές είναι η υψηλή τιμή του λόγου αντοχής προς βάρος. Η μείωση του βάρους της κατασκευής, σε συνδυασμό με τις καλές μηχανικές ιδιότητες και την άριστη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά, έχουν καθιερώσει το αλουμίνιο ως βασικό μέταλλο σε πολλές ναυπηγικές και μη εφαρμογές. Η εξοικονόμηση βάρους σε σχέση με τις χαλύβδινες κατασκευές μπορεί να φτάσει και το 55-67% για τις ίδιες απαιτήσεις αντοχής. Σημαντικό, επίσης, πλεονέκτημα που προσφέρει το χαμηλό ειδικό βάρος του αλουμινίου

είναι η αύξηση της ταχύτητας του πλοίου, καθώς και του μεγέθους του, και κατ'επέκταση της μεταφορικής ικανότητάς του. Αυτό οδηγεί και σε σημαντική οικονομία καυσίμου κατά το χρόνο λειτουργικής ζωής του πλοίου.

Άλλο ένα φυσικό χαρακτηριστικό του αλουμινίου σε σχέση με τον χάλυβα και άλλα μέταλλα, είναι η σημαντική αντίσταση στη διάβρωση, και πιο συγκεκριμένα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ως αποτέλεσμα, οι κατασκευές από αλουμίνιο απαιτούν λιγότερο κόστος και χρόνο συντήρησης από τις χαλύβδινες κατασκευές που χρειάζονται ειδικά στρώματα αντιδιαβρωτικής μπογιάς για προστασία.

Όσον αφορά στη μηχανική του συμπεριφορά, η οποία θα αναλυθεί περισσότερο σε επόμενο κεφάλαιο, το αλουμίνιο παρουσιάζει πολύ καλά χαρακτηριστικά σε καταστάσεις στρεπτικής, θλιπτικής και καμπτικής φόρτισης. Το αλουμίνιο είναι εύκολα επεξεργάσιμο μέταλλο και δίνει τη δυνατότητα στον σχεδιαστή να δημιουργήσει από απλές έως περίπλοκες κατασκευές.

Εμφανίζει καλή συγκολλητότητα, με πιο γρήγορες και οικονομικές μεθόδους από αυτές που χρησιμοποιούνται στο χάλυβα, με αποτέλεσμα την εύκολη σύνδεση και ενσωμάτωση του, και τη δημιουργία υβριδικών κατασκευών με καλά χαρακτηριστικά αντοχής.

Στα παρακάτω κεφάλαια παρατίθενται πιο αναλυτικά οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου, καθώς και οι κύριες σειρές κραμάτων αλουμινίου με τα κύρια στοιχεία τους.

2.2.2 Μεταλλουργία του αλουμινίου και βασικές ιδιότητες

- **Χαμηλή πυκνότητα**

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο πολύ χαμηλής πυκνότητας (0.16 kg/m^3). Κατ'επέκταση εμφανίζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E) και υψηλή μηχανική αντοχή σ_{TS} σε σχέση με άλλα μεταλλικά υλικά

Το καθαρό αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Γενικά, όμως, στις πρακτικές εφαρμογές απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή, η οποία επιτυγχάνεται με την προσθήκη στοιχείων κράμωσης στο καθαρό αλουμίνιο, όπως χαλκός, σίδηρος, μαγνήσιο, ψευδάργυρος και άλλα, σε συγκεκριμένα ποσοστά [1]. Περαιτέρω αύξηση της αντοχής επιτυγχάνεται με διάφορες διαδικασίες θερμικής και μη κατεργασίας.

Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, αλλά πολύ καλύτερη μηχανική συμπεριφορά.

- **Υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα**

Το αλουμίνιο είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, όπως και όλα τα μέταλλα. Έχει υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ($2.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), σχεδόν έξι φορές μεγαλύτερο από αυτόν του χάλυβα. Ενώ τα περισσότερα κράματα αλουμινίου τήκονται στους 565° με 648°C , η πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου απαιτεί μεγαλύτερη θερμότητα συγκόλλησης από αυτή που χρησιμοποιείται για τον χάλυβα. Λόγω της υψηλής θερμικής τους αγωγιμότητας, τα κράματα αλουμινίου μπορούν να εμφανίσουν μεγάλες παραμορφώσεις μετά από έκθεση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, που μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της αντοχής τους.

- **Υψηλή Αντίσταση σε Διάβρωση**

Το αλουμίνιο εμφανίζει μεγάλη χημική συγγένεια με το οξυγόνο και αν αφαιρεθεί στον αέρα οξειδώνεται πολύ γρήγορα, δημιουργώντας ένα λεπτό και συνεχές επιφανειακό στρώμα οξειδίου Al_2O_3 , το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο σημαντική αντιοξειδωτική προστασία.

Η κυριότερη μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι η διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion). Η αντίσταση του κράματος σε διάβρωση με βελονισμούς εξαρτάται σημαντικά από το είδος της θερμικής ή μη κατεργασίας που έχει υποστεί.

Ένα ακόμα είδος διάβρωσης που εμφανίζεται σε αλουμινένιες κατασκευές είναι η γαλβανική διάβρωση. Αυτή συνήθως εμφανίζεται στις συνδέσεις του αλουμινίου με τον χάλυβα ή με άλλα μέταλλα με αρνητικότερο δυναμικό διάβρωσης από αυτό του αλουμινίου, σε υγρό περιβάλλον. Έτσι δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο μετάλλων, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της γαλβανικής διάβρωσης. Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν με άλλα μεταλλικά στοιχεία σε υγρό περιβάλλον (π.χ θάλασσα), μόνο εάν έχει προληφθεί η ηλεκτρική ή ηλεκτρολητική απομόνωση των δύο μετάλλων. Για να γίνει αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικά μονωτικά υλικά (δακτύλιοι) για τον διαχωρισμό της επιφάνειας των δύο μετάλλων.

2.2.3 Βασικά κράματα αλουμινίου

Τα πιο διαδεδομένα κράματα αλουμινίου έχουν ως στοιχεία κραμάτωσης χαλκό, ψευδάργυρο, μαγνήσιο, πυρίτιο και μαγγάνιο. Είναι πολύ ελαφρύτερα και έχουν μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση από τον απλό χάλυβα, αλλά όχι τόσο όσο το καθαρό αλουμίνιο.

Τα κράματα αλουμινίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα κράματα διαμόρφωσης και τα κράματα χύτευσης [1, 5]. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών μπορούν να υποδιαιρεθούν σε άλλες δύο κατηγορίες: σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη.

2.2.3.1 Ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου

1. Κράματα διαμόρφωσης

Το καθαρό αλουμίνιο κραματοποιείται εύκολα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κραμάτων με πληθώρα φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Τα κράματα διαμόρφωσης κατατάσσονται με το παρακάτω σύστημα τεσσάρων ψηφίων, ανάλογα με το στοιχείο κραμάτωσης [1, 5]:

Πρώτο ψηφίο: Κύριο συστατικό

Δεύτερο ψηφίο: Χαρακτηριστικό παραλλαγής

Τρίτο & Τέταρτο ψηφίο: διακριτικό κράματος

Κύρια Στοιχεία Κραμάτων Διαμόρφωσης Αλουμινίου

<u>Σειρά</u>	<u>Κύριο Στοιχείο Κράματος</u>
1000	τουλάχιστον 99% Al
2000	Χαλκός (Cu)
3000	Μαγγάνιο (Mn)
4000	Πυρίτιο (Si)
5000	Μαγνήσιο (Mg)
6000	Μαγνήσιο και Πυρίτιο (Mg ₂ Si)
7000	Ψευδάργυρος (Zn)

8000	Άλλα στοιχεία
9000	Μη χρησιμοποιημένη σειρά

2. Κράματα χύτευσης

Στην περίπτωση των κραμάτων χύτευσης τα χυτά εξαρτήματα έχουν οριστική και καθορισμένη μορφή και δεν υφίστανται πλέον καμία πλαστική παραμόρφωση. Έχουν καλές μηχανικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Όσον αφορά στην ονοματολογία τους, η κωδικοποίηση ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης είναι η εξής [1, 5]:

Πρώτο ψηφίο: Κύριο στοιχείο προσθήκης

Δεύτερο & Τρίτο ψηφίο: Ειδική κατηγορία κράματος οικείας ομάδας

Τέταρτο ψηφίο: Μορφολογία προϊόντος χύτευσης (0:χυτό, 1:πλίνθωμα)

Κύρια Στοιχεία Κραμάτων Χύτευσης Αλουμινίου

<u>Σειρά</u>	<u>Κύρια Προσθήκη</u>
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99%
2XX.X	Χαλκός (Cu)
3XX.X	Πυρίτιο και Χαλκός ή Μαγνήσιο (Si-Cu-Mg)
4XX.X	Πυρίτιο (Si)
5XX.X	Μαγνήσιο (Mg)
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος (Zn)
8XX.X	Κασσίτερος (Sn)
9XX.X	Άλλα στοιχεία

Τόσο στα κράματα διαμόρφωσης όσο και στα κράματα χύτευσης μπορεί να υπάρχει και δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας, το οποίο αναφέρεται στη μηχανική ή θερμική κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα. Συνοπτικά, η ονοματολογία των κατεργασιών είναι η εξής [1]:

F → Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική κατεργασία

O → Ανόπτηση

H → Ενδοτράχυνση

W → Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης (για κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση)

T → Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση

Στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται κυρίως κράματα διαμόρφωσης των σειρών 5000 και 6000, οι ιδιότητες των οποίων θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.2.3.2 Κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου

Τα κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου παράγονται με τη διαδικασία της εξέλασης, και μπορούν να πάρουν πολλά τυποποιημένα σχήματα. Έτσι, είναι κατάλληλα για πληθώρα εφαρμογών, ειδικά στη ναυπηγική.

Τα κράματα διαμόρφωσης χωρίζονται σε άλλες δύο κατηγορίες: κράματα που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία, και κράματα που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες.

Στα **μη θερμικά κατεργασμένα** κράματα η αύξηση της αντοχής οφείλεται στα στοιχεία κραμάτωσης (σειρές 1000, 3000, 4000, 5000). Περαιτέρω αύξηση της αντοχής επιτυγχάνεται με κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ (cold working), δηλαδή πλαστική παραμόρφωση σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και με τέτοιο ρυθμό, ώστε να προκληθεί ενδοτράχυνση.

Στα **θερμικά κατεργασμένα κράματα** η βασική αντοχή οφείλεται στα στοιχεία κραμάτωσης όπως, χαλκός, μαγνήσιο, ψευδάργυρος, πυρίτιο. Η θερμική κατεργασία αποτελείται από 4 βήματα: κατεργασία διαλυτοποίησης (ή υπερβαφή), γρήγορη βαφή, κατακρήμνιση, και γήρανση. Είναι δυνατή η περαιτέρω αύξηση της αντοχής και σταθεροποίηση των ιδιοτήτων του κράματος με θέρμανση για ελεγχόμενο χρονικό διάστημα σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (τεχνητή γήρανση, σκλήρυνση με κατακρήμνιση). Με αυτό τον τρόπο παρασκευάζονται κράματα διαμόρφωσης πολύ μεγάλης αντοχής.

Παρακάτω γίνεται αναφορά στις χρησιμοποιούμενες σειρές κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου και στις ιδιότητες τους. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στις

σειρές 5000 και 6000, που είναι οι βασικές σειρές κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική [1, 5, 10, 13].

- ❖ Σειρά 1000: Τα κράματα της σειράς 1000 περιέχουν τουλάχιστον 99% αλουμίνιο. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται σε αυτά τα κράματα είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό έως 1%. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων τους είναι αρκετά χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Τα κράματα αυτής της σειράς υπόκεινται σε κατεργασίες εν ψυχρώ και έχουν εξαιρετική αντοχή σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Έχουν θαυμάσια ηλεκτρική αγωγιμότητα (χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συρμάτων, καλωδίων κ.λπ.), και θερμική αγωγιμότητα (χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλοριφέρ κ.λπ.). Επίσης έχουν εξαιρετική αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Χαρακτηριστικά κράματα της σειράς είναι τα 1100 και 1350.

- ❖ Σειρά 2000: Αυτή η σειρά αποτελείται από κράματα αλουμινίου-χαλκού (Al-Cu), όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά από 2.6 έως 6.3%, καθώς επίσης και κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο περιέχεται σε ποσοστά 0.5-1.5%. Τα κράματα της σειράς 2000 είναι θερμικά κατεργαζόμενα κράματα και η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση. Έτσι το κράμα έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή σε διάβρωση και όχι καλή συγκολλητότητα.
Τα κράματα της σειράς 2000 μπορούν να περιέχουν επίσης τα στοιχεία Si και Mn σε ποσοστά, όμως, μικρότερα του 0.8%. Επίσης, στην ίδια σειρά ανήκουν και τα κράματα Al-Li, χάρις στο οποίο δημιουργούνται πολύ ελαφριά κράματα.
Χρησιμοποιούνται ευρέως στην αεροπορική βιομηχανία (κράμα 2024), καθώς και στην αεροδιαστημική βιομηχανία (κράμα 2195), λόγω της μικρής τους πυκνότητας και της υψηλής μηχανικής αντοχής που τα χαρακτηρίζουν.

- ❖ Σειρά 3000: Η κύρια προσθήκη των κραμάτων της σειράς 3000 είναι το μαγγάνιο (Mn), σε ποσοστά έως 1.8%. Είναι μη θερμικά επεξεργάσιμα κράματα. Χαρακτηρίζονται από καλή επεξεργασιμότητα, πολύ καλή αντοχή σε διάβρωση, καλή συγκολλητότητα και μέτρια αντοχή. Τα πιο χαρακτηριστικά κράματα της

σειράς είναι τα 3003, 3004, και 3005. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου πιο σημαντική είναι η δυνατότητα επεξεργασιμότητας και όχι η μηχανική αντοχή.

- ❖ Σειρά 4000: Τα κράματα της σειράς 4000 περιέχουν πυρίτιο σε ποσοστά 4-22%. Είναι θερμικά επεξεργάσιμα κράματα με μέτρια αντοχή, αλλά καλή αντίσταση σε διάβρωση. Η προσθήκη πυριτίου κάνει το κράμα πιο ρευστό όταν υγροποιείται, και σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος του χρησιμοποιείται πολύ ως μέταλλο εναπόθεσης στις τεχνικές GMAW (Gas Metal Arc Welding) και GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Τα κυριότερα κράματα είναι το 4032 και το 4043 που χρησιμοποιείται ως καταναλισκόμενο μέταλλο.
- ❖ Σειρά 5000: Βασικό στοιχείο κραματοποίησης των κραμάτων της σειράς 5000 είναι το μαγνήσιο (Mg), σε ποσοστά μικρότερα του 4%. Όταν χρησιμοποιείται ως κύριο στοιχείο κραμάτωσης (ή σε συνδυασμό με το μαγγάνιο), οδηγεί στη δημιουργία κράματος μέτριας μηχανικής αντοχής, που βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως της ολκιμότητάς τους. Τα κράματα αυτά δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Σε περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, πρέπει τα ποσοστά σιδήρου και πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Όσο αυξάνεται η προσθήκη μαγνησίου στο κράμα, τόσο βελτιώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες και η συγκολλητότητά του. Τα κράματα της σειράς 5000 συγκολλώνται εύκολα με πληθώρα τεχνικών. Ως αποτέλεσμα, τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευαστική βιομηχανία (δρόμοι, γέφυρες, δεξαμενές), και στη ναυπηγική βιομηχανία.

Ενδεικτικές τιμές μηχανικής αντοχής των κραμάτων της σειράς 5000, κυμαίνονται από 124-352 MPa, με σημαντική μείωση της αντοχής κοντά στις περιοχές της συγκόλλησης.

Εφαρμογές κραμάτων διαμόρφωσης της σειράς 5000 στη ναυπηγική βιομηχανία

Κράματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε μαγνήσιο είναι τα 5086, 5083, 5456. Αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου και σε πληθώρα ναυπηγικών κατασκευών, συνήθως μετά από κατεργασία H116.

- 5086: Μέσα επίπεδα αντοχής, χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Mg, καλή συγκολλητικότητα, καλή αντίσταση σε διάβρωση και καλή κατεργασιμότητα. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή της γάστρας, των καταστρωμάτων, των φρακτών, ιστών, πύργων, δεξαμενών, κ.α.
- 5083: παρουσιάζει υψηλή μηχανική αντοχή, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε Mg, καλή συγκολλητικότητα, εξαιρετικές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, μέτρια κατεργασιμότητα. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που απαιτούν πολύ υψηλό λόγο αντοχής/βάρος, όπως γάστρες υδροπτέρυγων, αμφίβια σκάφη. Επίσης, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που εμφανίζει σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή σφαιρικών δεξαμενών πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φορτίου (LNG).

Τα κράματα 5083-H113/H321 βρίσκουν εφαρμογή σε ταχύπλοα σκάφη, στην κατασκευή της γάστρας, ενισχυτικών, καταστρωμάτων και υπερκατασκευών. Επίσης, το κράμα 5083 χρησιμοποιείται σε συγκολλητές κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση σε διάβρωση σε υγρό θαλάσσιο περιβάλλον, όπως εξέδρες γεώτρησης πετρελαίου.

- 5456: έχει παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες και εφαρμογές με το κράμα αλουμινίου 5083, και εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση.
- 5052: ένα από τα πρώτα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στη ναυπηγική. Λόγω της μικρής αντοχής του δεν χρησιμοποιείται πλέον στην κατασκευή μεγάλων πλοίων, αλλά περισσότερο σε μικρά σκάφη αναψυχής.
- 5454: εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που η υπηρεσιακή θερμοκρασία ξεπερνά τους 65°C, για την αποφυγή διαβρωσης με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε

ρωγμάτωση (stress corrosion cracking). Χρησιμοποιείται σε ταχύπλοα επιβατηγά πλοία.

- ❖ Σειρά 6000: κύρια στοιχεία προσθήκης είναι το μαγνήσιο και το πυρίτιο, σε ποσοστά που κάνουν δυνατή τη δημιουργία Mg_2Si , έτσι ώστε να μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία. Ορισμένα κράματα της σειράς 6000 περιέχουν μικρές προσθήκες Mn (<0.8%) και Cr (<0.3%). Αυτές οι προσθήκες συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της δυσθραυστότητας του κράματος. Τα κράματα αυτά εμφανίζουν πολύ υψηλή αντίσταση σε διάβρωση, εξαιρετικές δυνατότητες εξέλασης -που το καθιστούν ιδανικό για κατασκευαστικά δύσκολα τμήματα που απαιτούν υψηλή αντοχή- καλές μηχανικές ιδιότητες και αντοχή. Επίσης εμφανίζουν καλή συγκολλητότητα, κυρίως με τις μεθόδους GTAW ή GMAW. Εμφανίζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους 150°C.

Τυπικές τιμές αντοχής των κραμάτων σειράς 6000 κυμαίνονται από 124-400 MPa, με τις τιμές να μειώνονται σημαντικά σε περιοχές κοντά στη συγκόλληση.

Τα κυριότερα κράματα της σειράς είναι τα 6061, 6063 και 6111, και εφαρμόζονται ευρέως σε πολλά είδη κατασκευών, στην οδοποιία, την αυτοκινητιστική βιομηχανία, καθώς και στη ναυπηγική και την αεροναυπηγική.

Εφαρμογές κραμάτων διαμόρφωσης της σειράς 6000 στη ναυπηγική βιομηχανία

- 6061: μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία και έχει πολύ καλή συγκολλητότητα. Βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στη ναυπηγική, κυρίως στην κατασκευή μορφοδοκών που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά των ελασμάτων. Οι ιδιότητες του κράματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της κατεργασίας το οποίο έχει αυτό υποστεί. Συνήθως χρησιμοποιείται το κράμα 6061, μετά από κατεργασία T6 (υπερβαφή και τεχνητή γήρανση).
- 6063: παρουσιάζει εξαιρετική κατεργασιμότητα και εξελασιμότητα. Χρησιμοποιείται ευρέως σε σωληνώσεις, καθώς και σε πλαίσια παραθύρων, σε πόρτες, κ.α.

- ❖ Σειρά 7000: πρόκειται για κράματα Al-Zn-Mg. Το κύριο στοιχείο κραμάτωσης σε αυτή τη σειρά είναι ο ψευδάργυρος, ο οποίος σε συνδυασμό με μικρό ποσοστό μαγνησίου προσδίδει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες στο κράμα και πολύ υψηλή αντοχή. Είναι κράματα εύκολα θερμικά κατεργαζόμενα και παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου, ανάλογα με το είδος της κατεργασίας. Ωστόσο, εμφανίζουν μέτρια συγκολλητικότητα. Το κύριο μειονέκτημα των κραμάτων 7000 είναι η μειωμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, έτσι η χρήση τους περιορίζεται στους 120°C.

Κυριότερο κράμα της σειράς είναι το 7075, το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών τα οποία απαιτούν πολύ υψηλή αντοχή λόγω των συνεχών και υψηλών καταπονήσεων που υφίστανται, και πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Είναι ένα κράμα πολύ υψηλού κόστους και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που άλλα φθηνότερα κράματα αποδεικνύονται ανεπαρκή.

2.2.4 Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου

Στην παράγραφο αυτή θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στις βασικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου, σε σύγκριση με άλλα ναυπηγικά υλικά, όπως ο ναυπηγικός χάλυβας ASTM-A131 και ο κοινός χάλυβας ASTM-A100 [1, 5]

1. Αντοχή σε θραύση

Το μέγιστο όριο αντοχής σε θραύση των κραμάτων αλουμινίου γενικά είναι συγκρίσιμο με αυτό του χάλυβα. Τα περισσότερα κράματα της σειράς 5000 έχουν όριο θραύσης σε εφελκυσμό από 214 έως 434 MPa, ενώ οι τιμές για τους χάλυβες κυμαίνονται από 400-490 MPa.

2. Ειδικό Βάρος

Το αλουμίνιο έχει 3 φορές μικρότερη πυκνότητα από το χάλυβα, περίπου 2.7 gr/cm³. Έτσι, το ειδικό βάρος του αλουμινίου είναι αισθητά μικρότερο από αυτό του χάλυβα. Ενδεικτικά αναφέρουμε την τιμή ειδικού βάρους του κράματος αλουμινίου

5083-H113 (26.1 kN/m^3), σε σύγκριση με τις τιμές του ναυπηγικού χάλυβα A131 (78.7 kN/m^3), και του κοινού χάλυβα A100 (76.0 kN/m^3). Όμως, δεν πρέπει να θεωρείται γενικά ότι μια κατασκευή αλουμινίου που εκπληρώνει τους ίδιους σκοπούς με μια χαλύβδινη κατασκευή θα έχει βάρος 3 φορές μικρότερο από την τελευταία. Ο λόγος στην πραγματικότητα πλησιάζει το ένα δεύτερο.

3. Λόγος Αντοχής προς Βάρος

Τα κράματα αλουμινίου έχουν πολύ υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος. Ενδεικτικά αναφέρουμε τον λόγο αντοχής/βάρος του κράματος 5083-H113 που είναι 12.1, σε σχέση με αυτόν του ναυπηγικού χάλυβα, που είναι μόλις 5.8. Έτσι, το αλουμίνιο σε πολλές κατασκευές αντικαθιστά άλλα βαρύτερα μέταλλα, χωρίς να μειώνεται η ικανότητα της κατασκευής να φέρει όμοια φορτία.

4. Μέτρο Ελαστικότητας

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου, που τα διαχωρίζουν από τον χάλυβα, είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητάς τους (το $1/3$ από αυτό του χάλυβα). Αυτό σημαίνει ότι έχουν μεγαλύτερη ευκαμψία από τον χάλυβα, και ότι μπορούν να απορροφήσουν 3 φορές περισσότερη ενέργεια από αυτόν, πριν τη θραύση [1]. Αυτή η μηχανική ιδιότητα του αλουμινίου αποτελεί και πλεονέκτημα και μειονέκτημα μαζί.

Οι ναυπηγικές κατασκευές από αλουμίνιο υπερέχουν έναντι των χαλύβδινων, στην περίπτωση κρουστικών φορτίων, διότι έχουν την ιδιότητα να απορροφούν πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, άρα μειώνεται η πιθανότητα θραύσης από κρουστική φόρτιση. Επίσης, το μικρό μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου συμβάλλει στην αποφυγή αρμών στη σύνδεση υπερκατασκευών με το κατάστρωμα.

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν κατασκευές στις οποίες η έκταση της παραμόρφωσης που μπορούν να δεχθούν είναι περιοριστικός παράγοντας. Κατασκευή από αλουμίνιο με την ίδια γεωμετρία και υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης με μία χαλύβδινη κατασκευή μπορεί να εμφανίσει έως και 3 φορές μεγαλύτερη παραμόρφωση. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι μερικές φορές απαγορευτικές στις ναυπηγικές κατασκευές, διότι επηρεάζουν τη στατική αντοχή του σκάφους.

Έτσι λαμβάνεται ως περιοριστικός παράγοντας στις ναυπηγικές κατασκευές από αλουμίνιο η ελαστική παραμόρφωση. Για την ίδια ελαστική παραμόρφωση το αλουμίνιο απαιτεί τριπλάσια ροπή αδράνειας από τον χάλυβα, όπως προκύπτει από τη σχέση $I_A = I_S \cdot E_S / E_A$, όπου A:αλουμίνιο, S:χάλυβας. Σε κατασκευές από αλουμίνιο προτιμάται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης, καθώς επίσης και η χρήση διελασμένων μορφοδοκών που διαθέτουν μεγάλη ροπή αδράνειας. Επίσης, χρησιμοποιούνται και άλλες διατάξεις, όπως κυψελωτές κατασκευές (honeycomb construction), κ.α.

5. Αντοχή σε Διάβρωση

Το αλουμίνιο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, έχει πολύ καλή αντοχή σε διάβρωση, χαρακτηριστικό που το καθιστά κατάλληλο για ναυπηγική χρήση. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανοδικής προστασίας που λαμβάνει χώρα όταν η επιφάνεια του αλουμινίου έρθει σε επαφή με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Τα κράματα με τη μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση είναι αυτά των σειρών 1000, 3000, 5000, και 6000.

6. Αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες

Το αλουμίνιο εμφανίζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες (δυσθραυστότητα και ολκιμότητα) σε χαμηλές θερμοκρασίες (υπό το μηδέν), σε πολλά κράματα καλύτερες από ότι σε θερμοκρασία δωματίου. Πιο συγκεκριμένα, τα κράματα των σειρών 3000, 5000, και 6000, ενδύκνυνται για χρήση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα παράδειγμα είναι αυτό του κράματος 5083, το οποίο χρησιμοποιείται στις δεξαμενές των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φορτίου στους -163°C .

7. Δυσθραυστότητα

Το αλουμίνιο είναι όλκιμο ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου άλλα μέταλλα ψαθυροποιούνται εύκολα. Είναι λιγότερο ευπαθή σε θραύση κατ'εγκοπή (notch sensitive), σε σχέση με τους περισσότερους χάλυβες. Έτσι οι νηογνώμονες δεν απαιτούν δοκιμές δυσθραυστότητας (δοκιμή Charpy) στα κράματα αλουμινίου για ναυπηγική χρήση.

Η δυσθραυστότητα μειώνεται με αύξηση του ορίου διαρροής. Τα κράματα της

σειράς 5000 διαθέτουν τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα, και ακολουθούν αυτά των σειρών 6000, 2000 και 7000.

8. Θερμική και Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι πολύ καλοί αγωγοί της θερμότητας. Παρόλο που έχουν χαμηλότερο σημείο τήξης από τον χάλυβα, σε περίπτωση έκθεσής τους σε φωτιά αγγίζουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες με χαμηλότερο ρυθμό απ'ότι ο χάλυβας. Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι με αύξηση της θερμοκρασίας πέραν των 93°C, οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου παρουσιάζουν σημαντική μείωση, γεγονός που μπορεί να αποβεί μοιραίο για μια κατασκευή σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του έχουν εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στη κατασκευή καλωδίων, συρμάτων, κ.α.

9. Αντοχή σε Κόπωση

Η αντοχή σε κόπωση κραμάτων αλουμινίου είναι μικρότερη από αυτή των ναυπηγικών χαλύβων.

10. Κατεργασιμότητα και Συγκολλησιμότητα

Τα κράματα αλουμινίου είναι εύκολα κατεργάσιμα και παράγονται με διαδικασία εξέλασης (κράματα διαμόρφωσης). Έτσι, βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών σε ποικίλα τμήματα του πλοίου, χάρη στην ικανότητά τους να λαμβάνουν πολλές μορφές και σχήματα.

Γενικά, τα κράματα αλουμινίου εμφανίζουν καλή συγκολλησιμότητα. Οι κυριότερες μέθοδοι που εφαρμόζονται στο αλουμίνιο είναι οι GTAW και GMAW, με πιο συχνή τη δεύτερη, ως γρηγορότερη και πιο αποτελεσματική.

2.2.5 Αλουμίνιο στη ναυπηγική: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Σε αυτή τη παράγραφο αναφέρονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του αλουμινίου σε ναυπηγικές κατασκευές [1].

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι:

- Ελαφρύτερη κατασκευή
- Μεγάλη αντοχή σε διάβρωση χωρίς προστασία
- Μακρύτερος χρόνος ζωής της κατασκευής
- Ευκολία διαμόρφωσης-εφαρμογής
- Ευχάριστη όψη
- Μικρότερο ολικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου (μεγάλο κόστος ανέγερσης, αλλά πολύ μικρότερο κόστος συντήρησης σε σχέση με μία χαλύβδινη κατασκευή).

Τα βασικότερα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Κακή συμπεριφορά σε σφυρόκρουση
- Μικρότερη αντοχή από χάλυβα σε ολιγοκυκλική και πολυκυκλική κόπωση και σε κόπωση λόγω ρωγμάτωσης
- Ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων σε σχέση με τον χάλυβα, για την ίδια επιβεβλημένη τάση
- Περιορισμός χρήσης σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 260°C), λόγω μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων. Επίσης, πρέπει να ληφθούν προληπτικά μέτρα (χρήση πυρομονωτικών υλικών, σύστημα ταχείας ανίχνευσης πυρκαγιάς, κ.α.
- Κακή συμπεριφορά σε διάβρωση από περιπατητικά ρεύματα, γειώσεις ηλεκτρικών συστημάτων και διμεταλλικές ενώσεις.
- Προβλήματα που εμφανίζονται στις περιοχές συγκολλήσεων, όπως: πόροι στη συγκόλληση, συστολή και παραμόρφωση λόγω του πολύ υψηλού μέτρου θερμικής αγωγιμότητας και μικρού μέτρου ελαστικότητας, καθώς και σημαντική μείωση της αντοχής στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη επηρεάζεται από το πάχος του υλικού, την τεχνική και τις συνθήκες της συγκόλλησης και την απόσταση από την περιοχή της συγκόλλησης. Η επίδραση της θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των ιδιοτήτων όσο πλησιάζουμε στην περιοχή της συγκόλλησης, κυρίως σε κράματα που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

3.1 Οι Φορτίσεις και οι Αποκρίσεις της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου

Το πλοίο, κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του και επιχειρώντας στο θαλάσσιο περιβάλλον, δέχεται ποικίλες και σύνθετες φορτίσεις, σε σύγκριση με άλλες στατικές δομές και κατασκευές. Οι φορτίσεις που ασκούνται από το θαλάσσιο, και όχι μόνο, περιβάλλον, καθώς και οι αποκρίσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι ένα πολύπλοκο θέμα, δύσκολο να προσδιορισθεί με απόλυτη ακρίβεια. Οι φορτίσεις αυτές έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά η καθεμία και ασκούνται σε διαφορετική φορά, διεύθυνση και ένταση. Ένας από τους βασικούς σκοπούς του ναυπηγού είναι να γνωρίζει τις βασικές φορτίσεις που ασκούνται σε διάφορες πιθανές καταστάσεις κατά τη λειτουργία του πλοίου, και να προσπαθήσει να προβλέψει, αλλά και να αποτρέψει τις καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να αποφέρουν στην κατασκευή του πλοίου, αλλά και στις ανθρώπινες ζωές που επιβαίνουν σε αυτό.

3.2 Είδη Φορτίσεων που Ασκούνται στις Ναυπηγικές Κατασκευές

Παρακάτω γίνεται αναφορά στις βασικότερες φορτίσεις που υφίσταται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Οι φορτίσεις μπορούν να υποδιαιρεθούν είτε ανάλογα με τη φύση τους –τη διάρκεια και τη μεταβλητότητά τους στο χρόνο- είτε ανάλογα με την απόκριση της κατασκευής που τα παραλαμβάνει. Στην πρώτη περίπτωση, οι φορτίσεις παραμένουν σταθερές στο χρόνο, όπως το βάρος του πλοίου, η άντωση και το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου. Ασκούνται, όμως, και φορτίσεις που μεταβάλλονται ραγδαία συναρτήσει του χρόνου και του χώρου (κρούση κυμάτων, σφυρόκρουση, ταλαντώσεις λόγω περιστροφής της έλικας, υδροδυναμικές φορτίσεις κ.α.).

Εάν κατηγοριοποιήσουμε τις φορτίσεις με κριτήριο την απόκριση της κατασκευής, οι εξωτερικές φορτίσεις μπορούν να υποδιαιρεθούν σε στατικές (static loading) που παραμένουν σταθερές στο χρόνο και σε δυναμικές (dynamic loading) [2, 7].

3.2.1 Στατικές φορτίσεις

Στην πρώτη κατηγορία των στατικών φορτίσεων περιλαμβάνονται κυρίως οι υδροστατικές φορτίσεις που ασκούνται στο εξωτερικό περίβλημα της γάστρας και τις εσωτερικές επιφάνειες (εγκάρσιες φρακτές και εσωτερικός πυθμένας) και οφείλονται στο θαλάσσιο περιβάλλον και στα μεταφερόμενα ρευστά ή στερεά (αργό πετρέλαιο, θαλάσσιο έρμα, ξηρό φορτίο χύδην, κ.α). Οι στατικές φορτίσεις παραμένουν σταθερές στο χρόνο (τουλάχιστον για τη διάρκεια ενός ταξιδιού) και δεν προκαλούν αδρανειακές επιταχύνσεις των στοιχείων της κατασκευής. Οι κυριότερες από αυτές είναι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, η άντωση και το βάρος του μεταφερομένου φορτίου.

Οι στατικές φορτίσεις μπορούν επίσης να υποδιαιρεθούν σε κάθετες ή πλάγιες (καμπτικές) και σε ομοεπίπεδες ή συνεπίπεδες (θλιπτικές, εφελκυστικές και διατμητικές), στις επίπεδες επιφάνειες της μεταλλικής κατασκευής ή/και συνδυασμός αυτών.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3-1, οι στατικές φορτίσεις προκαλούν κάμψη της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Οι φορτίσεις αυτές δεν προκαλούν κάμψη μόνο στο σύνολο της γάστρας του πλοίου, αλλά και στα ελάσματα και ενισχυτικά που την αποτελούν [2].



Σχήμα 3-1: Στατικές φορτίσεις στην εγκάρσια τομή του πλοίου

Οι βασικότερες στατικές φορτίσεις που ασκούνται στη γάστρα του πλοίου είναι οι εξής:

- Διαμήκης κάμψη σε ήρεμο νερό
- Τέμνουσες δυνάμεις λόγω διαμήκους κάμψης
- Διαμήκης κάμψη σε κύμα
- Τέμνουσες δυνάμεις σε κύμα
- Αδρανειακές φορτίσεις λόγω κίνησης μαζών
- Θερμικές φορτίσεις
- Συγκεντρωμένες φορτίσεις σε καταστρώματα
- Φορτίσεις κατά την ανέλκυση του σκάφους
- Φορτίσεις ρυμούλκησης και προσάραξης (στατικές και δυναμικές)
- Φορτίσεις κατά το δεξάμενισμό (στατικές και δυναμικές)

3.2.2 Δυναμικές φορτίσεις

Εκτός των στατικών φορτίσεων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, στο πλοίο ασκούνται και φορτίσεις οι οποίες μεταβάλλονται στο χρόνο και οι οποίες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτές που δεν προκαλούν δυναμική απόκριση (dynamic response) της κατασκευής στο σύνολό της ή τοπικά και σε αυτές που προκαλούν δυναμική απόκριση. Οι πρώτες καλούνται, επίσης, και φορτίσεις χαμηλών συχνοτήτων και μπορούν να προσεγγισθούν με ψευδο-στατική θεώρηση (διαμήκης κάμψη). Εάν, όμως, απαιτείται ακριβής περιγραφή της συμπεριφοράς της κατασκευής, τότε εφαρμόζεται η υδροελαστική θεωρία με την οποία λαμβάνονται υπόψη οι παραμορφώσεις της γάστρας στο σύνολό της στον χρόνο. Η θεώρηση αυτή δεν είναι ακόμα αρκετά εύχρηστη και έτσι δεν βρίσκει εφαρμογή στον συμβατικό σχεδιασμό, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

Οι δυναμικές φορτίσεις υψηλών συχνοτήτων προκαλούν διαφόρων μορφών διεγέρσεις που μπορούν να είναι [7]:

- Υψηλόσυχνες διαμήκεις ταλαντώσεις της κατασκευής (springing).
- Σφυρόκρουση (slamming).
- Αδρανειακές επιταχύνσεις διαφόρων στοιχείων της κατασκευής.
- Τοπικές ταλαντώσεις που οφείλονται στη λειτουργία των μηχανολογικών συστημάτων και της έλικας.

Στην πρώτη περίπτωση, οι διαμήκεις ταλαντώσεις της γάστρας προκαλούνται από κρούση θαλάσσιων κυμάτων στην περιοχή της πλώρης και διαρκούν αρκετό χρόνο. Προκύπτουν όταν η περίοδος βασικής κατακόρυφης ταλάντωση του πλοίου έχει σχετικά μεγάλη διάρκεια. Στην περίπτωση αυτή, όταν το πλοίο συναντά κυματισμούς με αντίστοιχη συχνότητα, η διέγερση της γάστρας παύει να είναι αμελητέα και παρατηρούνται συνεχείς ταλαντώσεις.

Η σφυρόκρουση είναι αποτέλεσμα της κρούσης της προωραίας περιοχής του πυθμένα στην επιφάνεια της θάλασσας και προκύπτει εφόσον η σχετική ταχύτητα της περιοχής της πλώρης του πλοίου ως προς την επιφάνεια της θάλασσας υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο. Παρατηρείται κατά κανόνα στο προωαίο τμήμα του πυθμένα, αλλά μπορεί επίσης να υποστεί σφυρόκρουση και η πρυμναία κατασκευή. Όταν το πλοίο κινείται σε θαλασσοταραχή, μπορεί επίσης να υποστεί υδροδυναμική κρούση το κύριο κατάστρωμα λόγω κυμάτων (διαβροχή). Κατά κανόνα αυτό προκύπτει συχνότερα στην περιοχή της πλώρης, δεν θα πρέπει, όμως, να αμελούνται και οι υπόλοιπες εκτεθειμένες περιοχές της κατασκευής (όπως π.χ. ο καθρέπτης των υπερκατασκευών).

Οι αδρανειακές φορτίσεις οφείλονται στη μετακίνηση μεγάλων μαζών κατά την κίνηση του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι αδρανειακές φορτίσεις σε διάφορα σημεία του πλοίου καθίστανται κρίσιμες όταν η κίνηση του πλοίου περί κάποιο άξονα αναφοράς, για παράδειγμα τον διαμήκη άξονα, που οδηγεί σε διατοιχισμό, είναι έντονη. Είναι τότε δυνατόν οι επιταχύνσεις σε περιοχές της κατασκευής που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από τον άξονα περιστροφής του πλοίου να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές. Αδρανειακές φορτίσεις προκύπτουν, επίσης, και ως αποτέλεσμα των ταλαντώσεων στην περιοχή της πρύμνης (μηχανοστάσιο, εδράσεις μηχανημάτων και περιστροφή της έλικας).

Δυναμικές φορτίσεις δημιουργούνται, επίσης, και κατά τη σύγκρουση ή προσάραξη του πλοίου. Θεωρούνται ως τυχαίες, μη επιθυμητές φόρτισεις (εκτός φυσικά ειδικών περιπτώσεων, όπως αποβατικών σκαφών) και κατά συνέπεια δεν λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής. Μόνο τα τελευταία χρόνια, με τις διατάξεις του Αμερικανικού Νόμου Περί Ρύπανσης «Oil Pollution Act» (OPA '90) μπορούμε να πούμε ότι έχει γίνει προσπάθεια αντιμετώπισης της ρύπανσης του

περιβάλλοντος από προσαράξεις και συγκρούσεις με την απαίτηση διπλής γάστρας σε πετρελαιοφόρα δεξαμενόπλοια.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι δυναμικές φορτίσεις έχουν κατά κανόνα τοπική επίδραση στη συμπεριφορά της κατασκευής, στη δε περίπτωση της διαμήκουσ ταλάντωσης δεν είναι εύκολο να αποφευχθεί το φαινόμενο μετά την κατασκευή του πλοίου. Οι δυναμικές φορτίσεις λαμβάνονται υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού, προσθέτοντας ισοδύναμες στατικές φορτίσεις σε αυτές που έχουν ήδη υπολογισθεί.

3.3 Η Αντοχή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου

Για να εξασφαλισθεί η επαρκής αντοχή μιας μεταλλικής κατασκευής, όπως είναι το πλοίο, το πρώτο θέμα που τίθεται είναι η αντοχή κατά τη διαμήκη κάμψη της γάστρας, καθόσον οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω αυτής της φόρτισης είναι οι κρίσιμες, ειδικά όταν ξεπερνά σε μήκος τα 100 m. Σε πλοία με μικρότερο μήκος, η διαμήκης καμπτική ροπή -η οποία είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του μήκους του πλοίου- είναι σημαντικά μικρότερη. Οι κρίσιμες τάσεις οφείλονται τότε στις τοπικές φορτίσεις, οι οποίες ασκούνται κατά κανόνα κάθετα στις διάφορες επιφάνειες του πλοίου (εξωτερικό περίβλημα, καταστρώματα και φρακτές). Για να εκτιμηθεί η μέγιστη αντοχή της διατομής είναι ανάγκη να υπολογισθεί η τοπική αντοχή των στοιχείων που παραλαμβάνουν τη διαμήκη φόρτιση όπως τα καταστρώματα, ο πυθμένας, τα πλευρικά ελάσματα, οι διαμήκεις φρακτές, καθώς και τα ενισχυτικά τους [11].

Το πρόβλημα του υπολογισμού της αντοχής μιας ναυπηγικής κατασκευής, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, μπορεί να διαιρεθεί σε τρία επιμέρους προβλήματα, τα οποία είναι:

- η αντοχή του κυρίως κατασκευαστικού σώματος (κορμού) του πλοίου,
- η αντοχή των ελασμάτων της γάστρας, και τέλος,
- η αντοχή των τοπικών στοιχείων.

Κύριος σκοπός του σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής είναι η επιλογή μιας κατά το δυνατόν βέλτιστης διάταξης έτσι ώστε η κατασκευή να είναι ικανή να παραλάβει επιτυχώς τις προβλεπόμενες φορτίσεις κατά τη διάρκεια της χρήσης της. Στις πιο

προχωρημένες μεθοδολογίες σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες πιθανές μορφές αστοχίας, όπως ο λυγισμός, η κατάρρευση, η κόπωση, η διαρροή, η ανάπτυξη ρωγμών, καθώς επίσης και οι πιθανότητες να προκύψει κάθε μια από αυτές.

3.4 Η Κατασκευαστική Διαμόρφωση των Ναυπηγικών Κατασκευών

Ο βασικός σκοπός του σωστού σχεδιασμού της κατασκευαστικής διαμόρφωσης ενός πλοίου είναι να επιβιώνει σε περιπτώσεις έκθεσης σε ακραίες συνθήκες φορτίσεων (συγκρούσεις, προσαράξεις, έντονη θαλασσοταραχή, κ.α). Η σωστή σχεδίαση μιας ναυπηγικής κατασκευής εξαρτάται κατά πολύ από την επιλογή των κατασκευαστικών υλικών, καθώς και από την κατασκευαστική διαμόρφωση.

Τα πλοία είναι ναυπηγικές κατασκευές που αποτελούνται από λεπτότοιχα ελάσματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του εξωτερικού περιβλήματος, των καταστρώματων και των φρακτών. Βέβαια, οι επίπεδες αυτές εκτεταμένες επιφάνειες φέρουν και ενισχύσεις που συμβάλλουν σε σημαντικό βαθμό στην αντοχή της κατασκευής. Έτσι, το πρόβλημα του σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου συνίσταται στην επιλογή της διάταξης των ενισχύσεων και σε επόμενο στάδιο στην επιλογή των διαστάσεων των ελασμάτων και των ενισχυτικών, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των οριακών καταστάσεων μέγιστης αντοχής, λειτουργικότητας και κόπωσης. Στην παράγραφο 3.12 γίνεται εκτεταμένη ανάλυση των ειδών των ενισχυτικών και των κριτηρίων επιλογής τους.

Τα πλοία διαιρούνται οριζόντια με τα καταστρώματα και κάθετα με τις φρακτές. Τα καταστρώματα και οι φρακτές συμβάλλουν στη συνολική, διαμήκη και εγκάρσια, αντοχή του πλοίου και «διαιρούν» τη γάστρα σε υδατοστεγή διαμερίσματα. Σε όλα τα πλοία το κύριο κατάστρωμα, το εξωτερικό περίβλημα και ο ανεπτυγμένος ιστός των διαμήκων και εγκάρσιων ενισχυτικών, μαζί με τα υπόλοιπα καταστρώματα, τον πυθμένα και τις φρακτές, δίνουν στο πλοίο την αντοχή που χρειάζεται συν ένα επιπλέον περιθώριο ασφαλείας που επιτρέπει στο πλοίο να ανθίσταται σε τυχόν προκαλούμενη ζημιά χωρίς να καταρρεύσει.

Πριν γίνει ο σχεδιασμός ολόκληρου του σώματος του πλοίου είναι σημαντικό να εξετασθούν τα επιμέρους τοπικά κατασκευαστικά στοιχεία του και να ελεγχθεί εάν αυτά αντέχουν σε λυγισμό. Για αυτό το λόγο, τα επιμέρους τμήματα υπόκεινται σε δοκιμές

κόπωσης ώστε να γίνει μια εκτίμηση του περιθώριου αστοχίας. Αυτές οι δοκιμές είναι πολύ σημαντικές, έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή μελλοντική αστοχία ολόκληρης της κατασκευής. Επίσης, στις μέρες μας έχει σημασία ο σχεδιασμός του πλοίου να γίνει με κριτήριο και την εξοικονόμηση βάρους, καθώς και τη χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών.

Για να υπολογισθεί το περιθώριο αστοχίας μιας ναυπηγικής κατασκευής, όπως είναι ένα πλοίο, χρησιμοποιούνται πολλά πιθανοθεωρητικά μοντέλα. Τα δεδομένα που προκύπτουν από την αστοχία ήδη υπάρχουσών κατασκευών, χρησιμοποιούνται για νεότερες μελέτες και νέες κατασκευές. Αυτές οι περιπτώσεις, όμως, δεν συγκρίνονται με αυτές της αστοχίας συμβατικών πλοίων, όπως είναι δεξαμενόπλοια, πλοία LNG ή πλοία μεταφοράς ραδιενεργών ουσιών, που οδηγούν σε μεγάλες οικολογικές καταστροφές. Υπάρχει πληθώρα παραδειγμάτων τέτοιων ατυχημάτων τα τελευταία χρόνια, γεγονός που κάνει τη ανάγκη να βρεθούν νέες μέθοδοι και εφαρμογές για την πρόβλεψη της αστοχίας σε τέτοια πλοία να γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική.

3.5 Είδη Αστοχίας των Ναυπηγικών Κατασκευών

Η κατασκευαστική αστοχία των πλοίων μπορεί να έχει πολλαπλά αίτια, τα οποία είναι δύσκολο να προβλεφθούν όταν δεν είναι ορατά για γυμνού οφθαλμού. Ο βαθμός και η δριμύτητα της αστοχίας που μπορεί να προκληθεί από μια κατασκευαστική ατέλεια, μπορεί να ποικίλει, από μια δευτερεύουσα αισθητική υποβάθμιση της κατασκευής έως την καταστροφική αστοχία, με πιθανή συνέπεια τη συνολική απώλεια του πλοίου.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι προσέγγισης ώστε να καθοριστεί ο τρόπος αστοχίας μιας μεταλλικής κατασκευής. Σκοπός είναι, γνωρίζοντας τις φορτίσεις τις οποίες δέχεται, και κατά συνέπεια τις τάσεις που αναπτύσσονται σε μία μεταλλική κατασκευή, να βγάλουμε σαφή συμπεράσματα ως προς το είδος και τη μορφή της αστοχίας που μπορεί να επέλθει σε αυτήν.

Η απλούστερη προσέγγιση της αστοχίας ενός πλοίου γίνεται αν η γεωμετρία του θεωρηθεί αντίστοιχη με αυτή μίας συμπαγής δοκού. Με αυτή τη παραδοχή, η κατασκευαστική αστοχία μπορεί να οφείλεται στα παρακάτω αίτια:

1. Διαρροή του υλικού λόγω εφελκυστικής τάσης (plasticity).

Σε αυτή την περίπτωση, η διαρροή εμφανίζεται όταν σε κάποιο κατασκευαστικό στοιχείο της δοκού (δηλαδή του μεταλλικού σώματος του πλοίου), η τάση η οποία αναπτύσσεται ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού. Έτσι, επέρχεται πλαστική παραμόρφωση του υλικού στο συγκεκριμένο σημείο. Στην περίπτωση που η τάση συνεχίζει να αυξάνεται, έτσι ώστε να φθάσει στην τάση θραύσης (ή όριο θραύσης του υλικού), επέρχεται θραύση του υλικού. Τοπική διαρροή του υλικού μπορεί να είναι αποδεκτή σε ορισμένα τμήματα της κατασκευής αν δεν επέλθει θραύση, και δεν αποτελεί πάντοτε κίνδυνο για την κατασκευή.

2. Θλιπτικές φορτίσεις που οδηγούν σε αστάθεια (instability) και λυγισμό (buckling)

Το φαινόμενο του λυγισμού είναι πιο σύνθετο από αυτό της θραύσης λόγω διαρροής, διότι δεν εξαρτάται από την αντοχή του υλικού, αλλά από τη λυγηρότητα (λόγος b/t , πλάτους/πάχος). Ο λυγισμός συμβαίνει στο κρίσιμο σημείο λυγισμού, το οποίο εξαρτάται από τη γεωμετρία, καθώς και από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Έτσι, η αστοχία λόγω λυγισμού μπορεί να επέλθει και σε τάση χαμηλότερη του ορίου διαρροής. Στην περίπτωση ελαστικού λυγισμού, μια μικρή υπέρβαση της τάσης λυγισμού, δεν σημαίνει απαραίτητα και αστοχία ολόκληρης της διατομής, αλλά μία ελαστική εκτροπή του κεντρικού τμήματος του ελάσματος από την αρχική του θέση. Με την αφαίρεση του φορτίου, το τμήμα αυτό μπορεί να επανέλθει στο αρχικό του επίπεδο. Τα ναυπηγικά ελάσματα έχουν λόγο λυγηρότητας $80 > b/t > 30$, και αστοχούν συνήθως ανελαστικά, αφού η τάση λυγισμού υπερβαίνει το όριο διαρροής τους.

3. Άμεση αστοχία λόγω ρωγμάτωσης που περιλαμβάνει την όλκιμη θραύση, την ψαθυρή θραύση και τη θραύση λόγω κόπωσης χαμηλής συχνότητας – υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας – χαμηλής τάσης.

Η αστοχία λόγω ρωγμάτωσης είναι από τις πιο σημαντικές και επικίνδυνες για την αντοχή του πλοίου. Κατά τη λειτουργική ζωή του πλοίου αναπτύσσονται ρωγμές, άλλες περιορισμένες και άλλες περισσότερο εκτεταμένες, οι οποίες αποτελούν απειλή για την αντοχή του πλοίου, ως πόλος διάδοσης ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές στο παρελθόν έχουν προκαλέσει αιφνίδια ψαθυρή θραύση της μεταλλικής κατασκευής σε

δύο τμήματα, και για το λόγο αυτό πλέον προτιμούνται υλικά με υψηλότερη δυσθραυστότητα, έτσι ώστε να αποφευχθούν τέτοια γεγονότα. Μεγάλος όγκος ερευνών πραγματοποιείται για να προβλέψει την έναρξη και τη διάδοση τέτοιων ρωγμών προκειμένου να καθοριστούν οι κανόνες που απαιτούνται για τη σωστή εκτίμηση της αστοχίας από θραύση λόγω ρωγμάτωσης. Στην παράγραφο 3-11, θα αναλυθούν οι διάφοροι τρόποι αστοχίας λόγω ρωγμών.

4. Μη αποδεκτή παραμόρφωση.

Μία περιορισμένη παραμόρφωση σε ένα σημείο της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου δεν αποτελεί απαραίτητα κίνδυνο πλήρους αστοχίας. Όταν, όμως, το υλικό περάσει στην πλαστική περιοχή και προκληθεί εκτεταμένη, ή μη αποδεκτή, παραμόρφωση, αυτό μπορεί να συντελέσει σε προβλήματα στην κατασκευαστική διαμόρφωση αλλά και στον εξοπλισμό του πλοίου (διατάραξη ευθυγράμμισης μηχανημάτων) μέχρι και σε πλήρη αστοχία.

Από κατασκευαστικής άποψης, ο προσδιορισμός της αστοχίας δεν είναι εύκολη υπόθεση. Ο υπολογισμός και η πρόβλεψη των φορτίσεων, αλλά και των αποκρίσεων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, το οποίο μπορεί να λυθεί μόνο με προσεγγίσεις και παραδοχές. Η διασφάλιση του πλοίου έναντι αστοχίας είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που απασχολεί τους κατασκευαστές των πλοίων, οι οποίοι σχεδιάζοντας ένα πλοίο πρέπει να λάβουν υπόψη τους όλους τους κανόνες των Νηογνομόνων, αλλά και να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, για μεταφορική ικανότητα και ταχύτητα.

Από κατασκευαστικής απόψεως, οι τρόποι αστοχίας της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου είναι οι εξής:

1. Άμεση θραύση προκαλούμενη κυρίως από κάποιο τμήμα της κατασκευής το οποίο ξεπέρασε τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη ή διάτμηση.
2. Θραύση από κόπωση για κατασκευές οι οποίες λειτουργούν σε εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον με επιβαλλόμενα φορτία υψηλών συχνοτήτων.
3. Μειωμένη ευστάθεια.

4. Ανεπιθύμητες παραμορφώσεις λόγω ταλαντώσεων και κραδασμών οι οποίες κυρίως δημιουργούνται λόγω κυματισμών (διατοιχισμός και σφυρόκρουση) καθώς επίσης και λόγω κακής ευθυγράμμισης του άξονα μετάδοσης της κίνησης.

3.6 Το Φαινόμενο της Θραύσης στις Ναυπηγικές Κατασκευές

Η ύπαρξη προϋπαρχουσών ρωγμών στη μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αιτίες έναρξης της θραύσης όταν αυτό βρίσκεται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Μικρορωγμές υπάρχουν πάντοτε στο υλικό και δημιουργούνται κυρίως στις επιφάνειές του είτε κατά την κατεργασία του είτε κατά τη χρήση του. Η σημασία των μικρορωγμών έγκειται στο γεγονός ότι δημιουργούν μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή τους με αποτέλεσμα την τοπική, τουλάχιστον, αστοχία του υλικού.

Η φύση της θραύσης διαφέρει από υλικό σε υλικό, ενώ πολλές φορές επηρεάζεται από το είδος της φόρτισης, την επιβαλλόμενη τάση, τη γεωμετρία της κατασκευής, τη θερμοκρασία και τον ρυθμό μεταβολής της εντατικής κατάστασης. Επίσης, διαφορετικός τύπος θραύσης παρατηρείται σε όλκιμα (ductile) και σε ψαθυρά (brittle) υλικά υπό την επίδραση εναλλασσόμενων τάσεων ή υψηλών θερμοκρασιών. Στις δύο αυτές περιπτώσεις, αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο έναρξης και διάδοσης της ρωγμής.

Για τη σωστή αξιολόγηση των πλοίων και γενικότερα των ναυπηγικών κατασκευών, ιδιαίτερα με την παρουσία ρωγμών, απαιτείται κάποια μέθοδος για την πρόβλεψη και εκτίμηση της συμπεριφοράς αυτών των ρωγμών. Η κλασική μηχανική της θραύσης προσφέρει τις μεθόδους για την πρόβλεψη της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών σε ομοιογενή τέλεια ελάσματα, όμως οι πραγματικές κατασκευές των πλοίων δεν αποτελούνται από τέλεια ελάσματα, αλλά χαρακτηρίζονται από την παρουσία ρωγμών και άλλων σφαλμάτων, ενισχυτικών και περιοχών συγκέντρωσης παραμενουσών τάσεων από τη διαδικασία συγκόλλησης ή εξέλασης αυτών των ενισχυτικών.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να μελετηθούν οι τρόποι ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα πλοίων, αλλά και σε συγκολλητές κατασκευές δύο διαφορετικών υλικών. Έτσι, σε όλα τα δοκίμια (συγκολλητά και ενισχυμένα), που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα με σκοπό την ανάπτυξη

προτύπων διάδοσης ρωγμών στα κράματα αλουμινίου, δημιουργήθηκαν ακραίες διαμπερείς ρωγμές, έτσι ώστε το πείραμα να γίνει περισσότερο ρεαλιστικό.

3.6.1 Τα είδη των θραύσεων

Οι θραύσεις σε μικροσκοπικό επίπεδο χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις ενδοκρυσταλλικές και τις διακρυσταλλικές. Η ενδοκρυσταλλική θραύση διαχωρίζει τους κόκκους ενός πολυκρυσταλλικού υλικού, ενώ στη διακρυσταλλική θραύση ο διαχωρισμός συμβαίνει κατά μήκος των ορίων των κόκκων (grain boundaries).

Η διακρυσταλλική θραύση συμβαίνει συνήθως όταν τα υλικά βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα η θραύση ερπυσμού (creep fracture). Τέτοιο είδος θραύσης παρατηρείται και στο μέταλλο συγκόλλησης κατά τη στερεοποίησή του στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (ΘΕΖ). Επίσης, διακρυσταλλική θραύση μπορεί να επέλθει και σε κανονικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε υλικά που έχουν υποστεί σημαντική διάβρωση, όπως συμβαίνει στο θαλάσσιο περιβάλλον (διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση).

Στην κατηγορία των ενδοκρυσταλλικών θραύσεων ανήκουν η *ψαθυρή* και η *όλκιμη θραύση*, καθώς και η *θραύση από κόπωση*, στις οποίες γίνεται εκτενής αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο.

Η λύση της συνέχειας του σώματος μιας κατασκευής μπορεί να συμβεί με δύο μηχανισμούς [1]:

(α) Θραύση κατ' αποχωρισμό (cleavage fracture): Η θραύση κατ' αποχωρισμό οφείλεται στην εφαρμογή ορθών εφελκυστικών τάσεων, κάθετων στην επιφάνεια αστοχίας, και επομένως, δεν συνεπάγεται αναγκαίως τη δημιουργία πλαστικών παραμορφώσεων. Ο τύπος της θραύσης είναι ψαθυρός.

(β) Θραύση κατ' ολίσθηση (shear fracture): Ολίσθηση (slip), δηλαδή πλαστική ροή, συμβαίνει με διάτμηση ορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων. Οι θραύσεις κατ' ολίσθηση συμβαίνουν με εφαρμογή διατμητικών τάσεων και είναι όλκιμες, δηλαδή συνυφασμένες με τις πλαστικές παραμορφώσεις.

Τα υλικά, επομένως, μπορούν να αστοχήσουν ή με θραύση κατ' αποχωρισμό ή με θραύση κατ' ολίσθηση ή -πράγμα που είναι και συνηθέστερο- με έναν ενδιάμεσο μικτό τρόπο.

3.6.2 Ψαθυρή και όλκιμη θραύση

Είναι προφανές ότι ο τρόπος αστοχίας ενός υλικού εξαρτάται από την όλκιμότητα του υλικού, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τη φύση του υλικού, τον τρόπο φορτίσεως, το είδος των επιβαλλόμενων φορτίων, το περιβάλλον λειτουργίας και τη γεωμετρία της κατασκευής. Τα όλκιμα υλικά έχουν πολύ μεγαλύτερη ικανότητα ανάπτυξης παραμορφώσεων από τα ψαθυρά, στα οποία επέρχεται αμέσως θραύση όταν η τάση γίνει ίση με την τάση θραύσης του υλικού.

Σε ένα ψαθυρό υλικό, μικρής ή αμελητέας όλκιμότητας, τα υλικά αστοχούν κατ' αποχωρισμό (ψαθυρή θραύση, brittle fracture). Στην περίπτωση αυτή ο αποχωρισμός του υλικού σε δύο τουλάχιστον τμήματα είναι ταυτόσημος με τη διάδοση ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές εκκινούν από τις αιχμές προϋπαρχουσών στο υλικό μικρορωγμών και διαδίδονται με ταχύτητες που πλησιάζουν την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο υλικό, κατά ασταθή τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι η διάδοση της ρωγμής δεν θα σταματήσει έως ότου να επέλθει η θραύση του υλικού.

Πληθώρα παραδειγμάτων ψαθυρών θραύσεων παρατηρήθηκαν κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, όποτε και ξεκίνησε να χρησιμοποιείται μαζικά η διαδικασία της συγκόλλησης για την ανέγερση των τμημάτων της γάστρας των πλοίων [18]. Λίγο αφότου έγινε η κατέλκυση των πλοίων αυτών, πληθώρα σημαντικών προβλημάτων θραύσης εντοπίστηκαν σε πολλά από αυτά. Από τα 5.000 περίπου εμπορικά πλοία, που κατασκευάστηκαν στις Η.Π.Α. την εποχή εκείνη, περίπου τα 1.000 πλοία παρουσίασαν 1.300 αστοχίες στην κατασκευή τους. Σοβαρές αστοχίες, όπως πλήρης θραύση των ελασμάτων καταστρώματος και πυθμένα, παρουσιάστηκαν σε 250 περίπου πλοία, ενώ 20 πλοία έσπασαν στα δύο ή εγκαταλείφθηκαν από το πλήρωμά τους. Στα πλοία αυτά η αστοχία εμφανίστηκε κυρίως σε περιπτώσεις έντονης θαλασσοταραχής και για μεγέθη τάσεων κάτω από το όριο διαρροής του υλικού της κατασκευής.

Άλλα παραδείγματα ψαθυρής θραύσης παρατηρήθηκαν το 1942, οπότε και καταγράφηκαν σοβαρές ρωγμές σε ορισμένα πλοία τύπου Liberty, που συνέβησαν

ραγδαία και με δυνατό κρότο. Παρόμοιες αστοχίες συνέβησαν και σε ορισμένα δεξαμενόπλοια τύπου T2. Η πιο γνωστή περίπτωση ήταν αυτή του Schenectady, που ήταν και το πρώτο δεξαμενόπλοιο τύπου T2 που κατασκευάστηκε. Το πλοίο αυτό κόπηκε ξαφνικά στα δύο, σε μια πρυμναία τομή της κεντρικής υπερκατασκευής της γέφυρας, ακόμα και μετά από πολλές θαλάσσιες δοκιμές τις οποίες είχε περάσει επιτυχώς. Η ρωγμή επεκτάθηκε σε όλη την περίμετρο της γάστρας εκτός του πυθμένα, που αποτέλεσε και τη μόνη περιοχή σύνδεσης των δύο τμημάτων της κατασκευής. Λίγο καιρό μετά την απώλεια του Schenectady, ταυτόσημη απώλεια προέκυψε και στο πλοίο Esso Manhattan, Εικόνα 3-1.



Εικόνα 3-1: Θραύση και κοπή στα δύο δεξαμενόπλοιου Schenectady

Μετά από έρευνα και ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων αστοχίας, καθώς και εξέταση της επιφάνειας της θραύσης, εξήλθαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Οι περισσότερες θραύσεις ήταν κυρίως ψαθυρές και η ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης ήταν πολύ μικρή, ενώ τα πλοία ήταν κατασκευασμένα από υλικά που παρουσιάζουν όλκιμη συμπεριφορά σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.
- Οι περισσότερες θραύσεις έγιναν σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Συνήθως, η τάση που προκάλεσε τη θραύση στα πλοία, ήταν αρκετά μικρότερη από την τάση διαρροής του υλικού.

- Οι περισσότερες θραύσεις είχαν ως περιοχή έναρξης κατασκευαστικές ασυνέχειες όπως τρύπες, εγκοπές, γωνίες, κ.α.
- Η έναρξη και διάδοση των ρωγμών, στις περισσότερες περιπτώσεις έγινε σε περιοχές όπου υπήρχαν ελαττώματα όπως, προυπάρχουσες ρωγμές, περιοχές συγκόλλησης συγκόλλησης, κ.α.
- Οι κατασκευές που υπέστησαν ψαθυρή θραύση ήταν φτιαγμένες από μέταλλα υψηλής αντοχής με χαμηλή δυσθραυστότητα.
- Η διάδοση των ρωγμών έγινε με πολύ υψηλές ταχύτητες, όπου για μεταλλικές κατασκευές άγγιζαν τα 1000 m/s.

Αυτές οι περιπτώσεις ψαθυρών ανεξέλεγκτων θραύσεων προκάλεσαν γενική ανησυχία και έδωσαν το έναυσμα για τη λήψη μέτρων και τη διεξαγωγή ερευνών, ώστε να αποφευχθούν τέτοια φαινόμενα στο μέλλον.

Στις μεταλλικές κατασκευές, είναι προτιμότερη η χρήση όλκιμων υλικών έναντι ψαθυρών. Η ψαθυρή θραύση επέρχεται πολύ γρήγορα και με πολύ καταστροφικές συνέπειες χωρίς οποιαδήποτε προειδοποίηση, ενώ τα όλκιμα υλικά έχουν το πλεονέκτημα ότι παραμορφώνονται πλαστικά, επιβραδύνοντας με την ιδιότητά τους αυτή τη διαδικασία της θραύσης και προσφέροντας έτσι άφθονο χρόνο για τη διόρθωση και επίλυση του προβλήματος. Επίσης, ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, απαιτείται περισσότερη ενέργεια παραμόρφωσης για να επέλθει όλκιμη θραύση. Επομένως, τα όλκιμα υλικά προτιμούνται ως υλικά λόγω της υψηλής τους δυσθραυστότητας, μιας και ένα τυχαίο λάθος στη χρήση και στον σχεδιασμό τους μπορεί να μην «κοστίσει» και να μην οδηγήσει το υλικό σε αστοχία. Επομένως, στις μηχανικές εφαρμογές, και ειδικά σε εκείνες που είναι απαραίτητες οι υψηλές απαιτήσεις ασφάλειας, τα όλκιμα υλικά είναι μια προφανής καλή επιλογή.

Στην παρούσα διπλωματική, επιλέχθηκε ως μέταλλο το αλουμίνιο, το οποίο χαρακτηρίζεται από σημαντική ιδιότητα δημιουργίας πλαστικής ζώνης πριν τη θραύση. Συνεχείς έρευνες γίνονται για τη βελτιστοποίηση των υπάρχόντων μετάλλων, έως ακόμα και τη δημιουργία νέων κραμάτων υψηλότερης δυσθραυστότητας, άρα και ανθεκτικότητας σε θραύση, με σκοπό την κατασκευή ολοένα και πιο ασφαλών ναυπηγικών κατασκευών.

3.6.3 Θραύση από κόπωση

Στα σύγχρονα πλοία, ο πιο διαδεδομένος τύπος θραύσης που παρατηρείται, είναι η θραύση που προκύπτει από την κόπωση στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, η οποία βρίσκεται υπό την επίδραση εναλλασσόμενων επαναληπτικών φορτίσεων. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να προέρχονται από τη δράση των κυμάτων, κατά την φορτοεκφόρτωση, ταλαντώσεις λόγω της συνεχούς λειτουργίας των μηχανολογικών εγκαταστάσεων του πλοίου, κ.α.

Υπάρχουν δύο είδη θραύσης από κόπωση: η κόπωση υψηλής συχνότητας – χαμηλής τάσης, που συναντάται σε περιοχές κόντα στην έλικα και σε μηχανήματα, και η κόπωση χαμηλής συχνότητας – υψηλής τάσης, που συναντάται σε περιοχές κοντά σε ασυνέχειες της μεταλλικής κατασκευής του σκάφους [1, 2]. Η μακροχρόνια επίδραση κοπωτικών τάσεων έχει συνήθως ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιας ρωγμής στην μεταλλική κατασκευή.

Η θραύση από κόπωση διακρίνεται σε τρία στάδια: την έναρξη της ρωγμής (συνήθως στην επιφάνεια της κατασκευής), τη διάδοση της ρωγμής (αρχικά αργή και σε κατεύθυνση κάθετη της εφεκλυστικής τάσης), και την ασταθή θραύση (είτε με όλκιμο, είτε με ψαθυρό τρόπο).

Εκτός από τις εξωτερικές επιβαλλόμενες τάσεις, οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη θραύση από κόπωση σχετίζονται με το περιβάλλον λειτουργίας του πλοίου, όπως:

- Περιβαλλοντικές φορτίσεις (κύματα, άνεμος).
- Κινούμενα φορτία, ταλαντώσεις και κραδασμοί κατασκευών.
- Αδρανειακές επιταχύνσεις κινούμενων κατασκευών.
- Αλλαγές θερμοκρασίας.
- Επίδραση του θαλάσσιου περιβάλλοντος

Είναι πολύ σημαντικό, κατά τον σχεδιασμό ενός πλοίου να ληφθούν μέτρα για τη βελτίωση της αντόχης της κατασκευής του σε κόπωση, όπως τον περιορισμό, όσο είναι αυτό δυνατό, των ασυνεχειών της γεωμετρίας της, και τη δημιουργία πιο ομαλών κατανομών επιφανειακών τάσεων. Περικοπές που μπορούν να γίνουν σε διάφορα σημεία

της κατασκευής μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση κοπωτικών φαινομένων, καθώς μπορούν να προκύψουν εναλλακτικοί τρόποι παραλαβής των φορτίων, προκαλώντας με αυτό τον τρόπο αστοχίες. Επίσης, θα πρέπει να επιλεγθεί ο τύπος ενισχυτικών και η θέση τους, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη παραλαβή της εξωτερικής φόρτισης.

Στο διαβρωτικό περιβάλλον, όπως το θαλάσσιο, η θραύση από κόπωση επιταχύνεται σημαντικά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται κόπωση από διάβρωση και συναντάται αρκετά συχνά σε ναυπηγικές κατασκευές.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στο όριο κόπωσης μιας κατασκευής είναι το υλικό από το οποίο αποτελείται, η συγκέντρωση τάσεων και οι παραμένουσες τάσεις που ενυπάρχουν σε αυτή. Ειδικότερα, η συγκέντρωση τάσεων είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επιδρά στο όριο κόπωσης των μετάλλων, δηλαδή η τοπική συγκέντρωση τάσεων που οφείλεται σε γεωμετρικές ασυνέχειες, όπως ρωγμές, συγκολλήσεις, οπές, επιφανειακά σφάλματα. Η επίδραση των ανωμαλιών είναι πολύ μεγαλύτερη όταν τα σφάλματα βρίσκονται στην επιφάνεια παρά στο εσωτερικό του υλικού. Έτσι, η έναρξη μίας κοπωτικής ρωγμής συνήθως γίνεται στο σημείο κάποιας προϋπάρχουσας ατέλειας που βρίσκεται στην επιφάνεια της κατασκευής.

3.7 Η Μηχανική της Θραύσης

Η μηχανική της θραύσης αποτελεί αντικείμενο μελέτης της σχεδίασης και της ανάλυσης των κατασκευών που περιέχουν ρωγμές ή άλλες κατασκευαστικές ατέλειες και σφάλματα. Κατά συνέπεια, η μηχανική της θραύσης εμπλέκεται στη λεπτομερή σχεδίαση και αξιολόγηση της ασφάλειας κάθε κατασκευής, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ότι αυτή δεν θα αστοχήσει λόγω υπερφόρτισης. Μέσω της μηχανικής της θραύσης, μπορούν να απαντηθούν πολλά σημαντικά ερωτήματα, όπως ποιο είναι το κρίσιμο μήκος ρωγμής, και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχθεί η κατασκευή, χωρίς να επέλθει αστοχία. Επίσης, μπορεί να γίνει αξιολόγηση των εξεταζόμενων υλικών ώστε να βρεθεί το ιδανικό υλικό για κάθε εφαρμογή, ανάλογα με τη δυσθραυστότητά τους, δηλαδή την ικανότητά τους να αντιστέκονται στη θραύση.

Είναι γεγονός πως μία κατασκευή, καθώς και τα υλικά που την απαρτίζουν, εμπεριέχει ρωγμές, από όπου ξεκινά συνήθως η αστοχία. Οι ρωγμές αυτές οδηγούν σε

υψηλές τάσεις στην περιοχή του άκρου τους, όπου πρέπει να δίνεται η μεγαλύτερη προσοχή, αφού είναι το σημείο από όπου θα γίνει η διάδοση της ρωγμής.

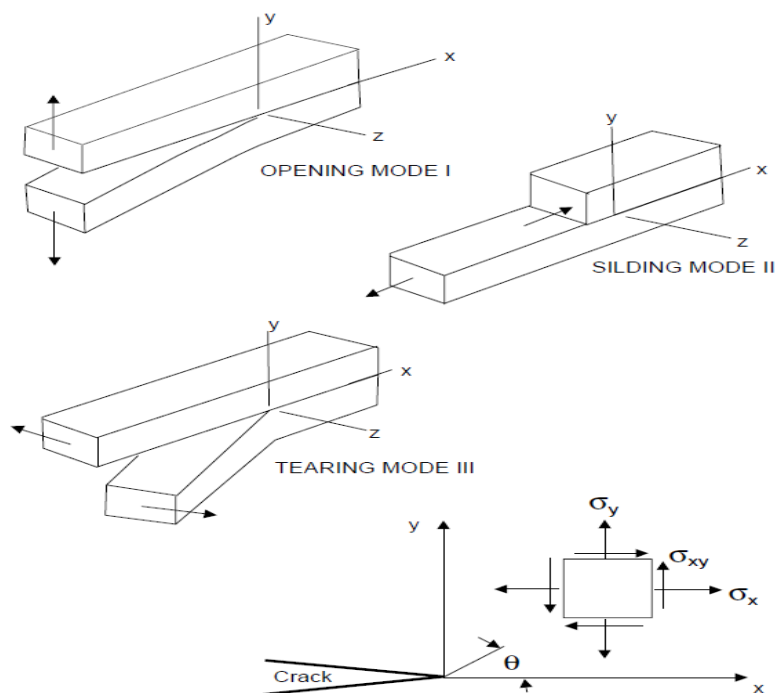
Οι φορτίσεις που δέχεται μια ατελής κατασκευή με προϋπάρχουσες ρωγμές, συνήθως συνοδεύεται από ανελαστική παραμόρφωση και άλλα μη γραμμικά φαινόμενα κοντά στο άκρο της ρωγμής. Ωστόσο, υπάρχουν καταστάσεις στις οποίες η έκταση της πλαστικής παραμόρφωσης και των μη γραμμικών φαινομένων είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μέγεθος της ρωγμής και το μήκος της κατασκευής. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η γραμμική ελαστική θεωρία της θραύσης.

Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στις δύο βασικές θεωρίες της θραύσης, την Γραμμική-Ελαστική Θεωρία της Θραύσης, στην οποία θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση, και στην Ελαστο-Πλαστική Θεωρία της Θραύσης.

3.7.1 Γραμμική-ελαστική θεωρία της θραύσης

Η γραμμική ελαστική θεωρία της θραύσης (linear elastic fracture mechanics) βασίζεται σε μία αναλυτική διαδικασία, η οποία συνδέει τις παραμέτρους εντατικής κατάστασης στην περιοχή του άκρου μιας ρωγμής με την ονομαστική τάση που εφαρμόζεται σε μία κατασκευή, με το μέγεθος, τη μορφή και τον προσανατολισμό της ρωγμής, καθώς και με τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής (δυσθραυστότητα, κ.α).

Αρχικά, πρέπει να αναφερθούμε στους τύπους των ρωγμών, οι οποίοι επηρεάζουν τον τρόπο διάδοσής της, άρα και τη θραύση μιας κατασκευής. Υπάρχουν τρεις τύποι ρωγμής, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-2 και αντιπροσωπεύουν τοπικές μετατοπίσεις σε στοιχειώδες στοιχείο, το οποίο περιλαμβάνει το άκρο μίας ρωγμής [1].



Σχήμα 3-2: Οι τρεις βασικοί τύποι ρωγμής

- Ο Τύπος I ή άνοιγμα της ρωγμής (opening mode), χαρακτηρίζεται από τοπικές μετατοπίσεις που είναι συμμετρικές ως προς τα επίπεδα x-y και x-z. Οι δύο επιφάνειες της ρωγμής μετατοπίζονται κάθετα η μία προς την άλλη σε τελείως αντίθετες κατευθύνσεις.
- Οι τοπικές μετατοπίσεις στην περίπτωση ρωγμής Τύπου II, διάτμηση ή ολίσθηση ρωγμής (sliding or shear mode), είναι συμμετρικές ως προς το επίπεδο x-y και αντισυμμετρικές ως προς το επίπεδο x-z. Οι δύο επιφάνειες ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη σε κατεύθυνση κάθετη ως προς τη γραμμή του άκρου ρωγμής.
- Τέλος, ο Τύπος III, σχάση ρωγμής (tearing mode), χαρακτηρίζεται από τοπικές μετατοπίσεις οι οποίες είναι αντισυμμετρικές ως προς τα επίπεδα x-y και x-z. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο επιφάνειες ρωγμής ολισθαίνουν η μία προς την άλλη σε κατεύθυνση παράλληλη προς το άκρο της ρωγμής.

Κάθε είδος ρωγμής μπορεί να χαρακτηριστεί από έναν από τους παραπάνω τύπους ή από κάποιον συνδυασμό τους.

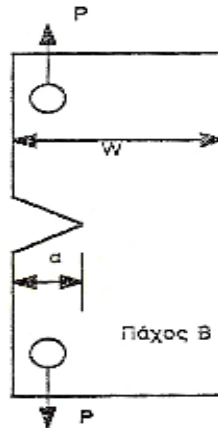
Η πρώτη γραμμική-ελαστική θεωρία θραύσης οφείλεται στον Griffith [18], και είναι γνωστή ως θεωρία ή κριτήριο του Griffith. Κατά τη θεωρία αυτή, υποθέτουμε ότι έχουμε μια άπειρη ελαστική πλάκα μοναδιαίου πάχους, η οποία περιέχει ελλειπτική ρωγμή με ημιάξονες a , b όπου $a \gg b$. Η πλάκα αυτή φορτίζεται εφελκυστικά με τάση, σ_{∞} , στο άπειρο, κάθετη προς τον μεγάλο ημιάξονα της ρωγμής. Η θεωρία του Griffith κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, υπό την επίδραση μιας δεδομένης μορφής παραμόρφωσης, η κατανομή των ελαστικών τάσεων και των μετατοπίσεων στην περιοχή του άκρου μίας ρωγμής είναι αναλλοίωτη ως προς όλες τις συνιστώσες τους. Η κατανομή αυτή, μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια της παραμέτρου K , η οποία ονομάζεται **συντελεστής έντασης τάσης**, και απεικονίζει το πεδίο των τάσεων κοντά στο άκρο της ρωγμής. Η βασική μορφή των εξισώσεων του συντελεστή έντασης τάσης, είναι η εξής:

$$K = f(g) \cdot \sigma \cdot \sqrt{a}$$

όπου $f(g)$ μία παράμετρος που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου και της ρωγμής, a το μήκος της ρωγμής και σ η επιβαλλόμενη τάση.

Ο συντελεστής έντασης τάσης εξαρτάται από τον τύπο της ρωγμής και από το είδος της σχετικής μετατόπισης των δύο επιφανειών της ρωγμής, καθώς επίσης και από τη θέση της ρωγμής στο δοκίμιο (ακραία διαμπερής ρωγμή, κεντρική διαμπερής ρωγμή, κ.α). Στην επόμενη παράγραφο, γίνεται ανάλυση του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσης, δηλαδή της τιμής του K , για την οποία επέρχεται ασταθής θραύση.

Στη βιβλιογραφία [1, 18] υπάρχει πληθώρα σχέσεων μεταξύ του συντελεστή έντασης τάσης και διαφόρων γεωμετριών δοκιμίων, σχημάτων, μεγεθών και προσανατολισμού ρωγμών και συνθηκών εξωτερικής φόρτισης. Για το συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού (Compact Tension Specimen, CTS), όπως τα δοκίμια της παρούσας εργασίας, ισχύουν τα παρακάτω, Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3: Συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού (CTS)

$$K_I = \frac{P}{B \cdot W^{1/2}} \cdot \left[29.6 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 63.9 \cdot \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$

3.7.2 Ελαστο-πλαστική θεωρία θραύσης και η πλαστική ζώνη στο άκρο της ρωγμής

Η γραμμική ελαστική ανάλυση του πεδίου των τάσεων σε μια ρωγματομένη κατασκευή, που αναλύθηκε παραπάνω, εφαρμόζεται μόνο σε ιδανικά ψαθυρά υλικά, για τα οποία η πλαστική ζώνη κοντά στο άκρο της ρωγμής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, το άκρο μιας ρωγμής είναι ιδιόμορφο σημείο, δηλαδή ισχύει $\sigma_y \rightarrow \infty$. Στην πραγματικότητα, και ειδικότερα στα μέταλλα, υπάρχει η τάση διαρροής σ_0 , πάνω από την οποία η παραμόρφωση γίνεται με πλαστικό τρόπο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δηλαδή, υπάρχει κάποια ανελαστικότητα, με τη μορφή πλαστικότητας, ερπυσμού ή αλλαγής φάσεως, στην περιοχή κοντά στο άκρο της ρωγμής, η οποία δεν μπορεί να αμεληθεί [18].

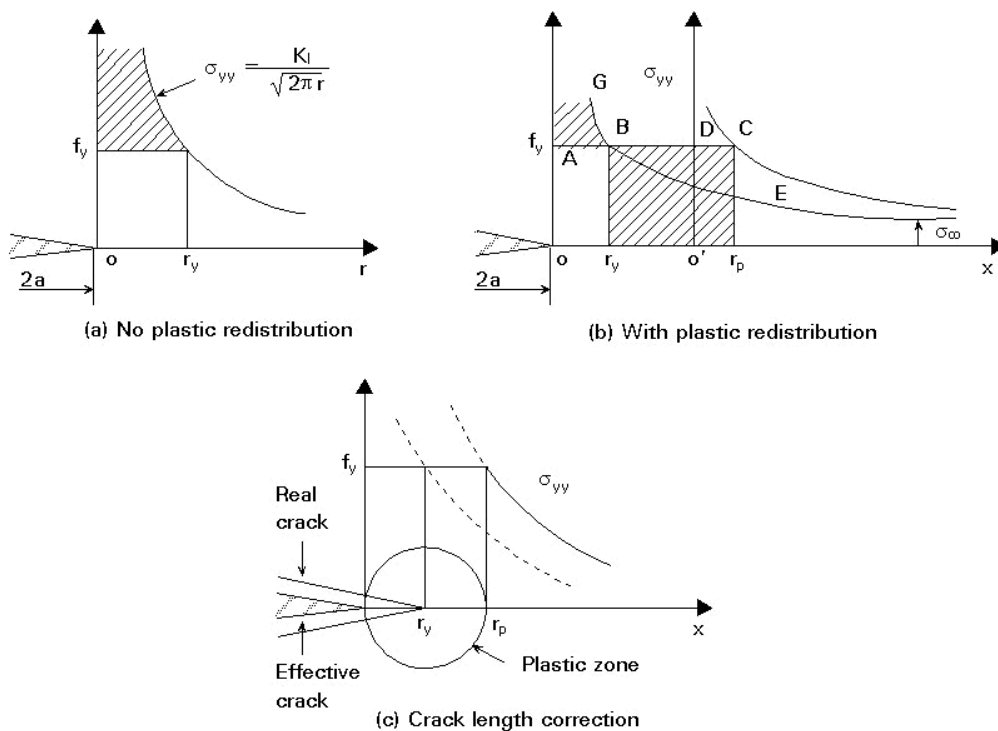
Όπως είπαμε και παραπάνω, το είδος της φόρτισης, το μήκος και η γεωμετρία της ρωγμής, καθώς και η γεωμετρία της κατασκευής που εξετάζεται, επηρεάζουν τη θραύση μέσω του συντελεστή έντασης τάσης. Αυτό σημαίνει πως, δύο σώματα που έχουν διαφορετικές γεωμετρίες, μήκη ρωγμών και που βρίσκονται υπό την επίδραση

διαφορετικών φορτίσεων, μπορεί να αναπτύξουν την ίδια πλαστική ζώνη κοντά στο άκρο της ρωγμής, εφόσον οι συντελεστές έντασης τάσης είναι οι ίδιοι.

Οι πρώτες απόπειρες προσέγγισης της πλαστικής ζώνης κοντά στο άκρο της ρωγμής, δεν ήταν ακριβείς, καθώς το αρχικό μέγεθος r_p^* της πλαστικής ζώνης που υποτέθηκε, ήταν πολύ μικρότερο του πραγματικού.

Ο Irwin [35] ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε τη θεωρία υπολογισμού της πλαστικής ζώνης κοντά στο άκρο της ρωγμής. Έκανε την υπόθεση ότι η ύπαρξη πλαστικότητας κάνει τη ρωγμή να συμπεριφέρεται σαν το μήκος της να είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό φυσικό μέγεθός της. Αποτέλεσμα της πλαστικής ζώνης στο άκρο της ρωγμής είναι η αύξηση των παραμορφώσεων και η μείωση της ακαμψίας σε σύγκριση με την ελαστική συμπεριφορά. Με το μοντέλο το Irwin, βρέθηκε ότι το μέγεθος της πλαστικής ζώνης r_p βρέθηκε ίσο προς το διπλάσιο της τιμής της πρώτης εκτίμησης r_p^* .

Στο Σχήμα 3-4 φαίνεται και σχηματικά το μοντέλο εκτίμησης της πλαστικής ζώνης κατά Irwin.



Σχήμα 3-4: Μοντέλο εκτίμησης πλαστικής ζώνης στο άκρο ρωγμής κατά Irwin

3.8 Κρίσιμος Συντελεστής Έντασης Τάσης

Μία από τις βασικότερες έννοιες της γραμμικής ελαστικής μηχανικής θεωρίας θραύσης, η οποία βασίζεται στην υπόθεση της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών, είναι ότι ασταθής θραύση συμβαίνει όταν ο συντελεστής έντασης τάσης στο άκρο της ρωγμής φτάσει μία κρίσιμη τιμή, τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσης (critical stress intensity factor) ή K_C . Για σχετική μετατόπιση τύπου I και μικρή πλαστική παραμόρφωση στο άκρο της ρωγμής (επίπεδη παραμόρφωση), η τιμή αυτή συμβολίζεται με K_{IC} . Επομένως, η θραύση αναμένεται να εμφανιστεί όταν:

$$K_I \geq K_{IC}$$

Το αριστερό τμήμα της ανισότητας εξαρτάται από το φορτίο, το μέγεθος της ρωγμής και τη γεωμετρία του ρωγματομένου δοκιμίου. Το δεξί τμήμα, αντιπροσωπεί μια ιδιότητα του υλικού και μπορεί να προσδιορισθεί πειραματικά με διάφορους τρόπους, όπως με τη χρήση δοκιμίου κάμψης με εγκοπή ή με συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού, [10].

Το K_{IC} παριστάνει την εγγενή ικανότητα ενός υλικού να υποστηρίξει μια δεδομένη εντατική κατάσταση στο άκρο μιας ρωγμής και να αντισταθεί στην προοδευτική επέκταση της ρωγμής κάτω από συνθήκες εφελκυσμού σε επίπεδη παραμόρφωση. Παριστάνει, δηλαδή, τη *δυσθραυστότητα* του υλικού και έχει μονάδες $\text{MN/m}^{3/2}$ ή $\text{kg/mm}^{3/2}$ $\text{ksi (in)}^{1/2}$.

Σημειώνεται, ότι αυτή η ιδιότητα, δηλαδή της δυσθραυστότητας, εξαρτάται από το υλικό, τον ρυθμό φόρτισης και τον επιβαλλόμενο περιορισμό (constraint) ως εξής :

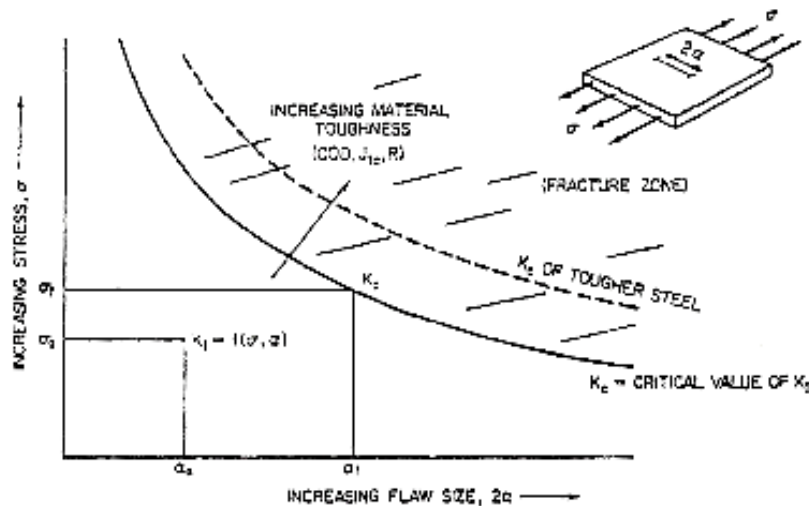
- **K_C** : κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης για στατική φόρτιση και συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης (plane stress) μεταβλητού περιορισμού. Επομένως, η τιμή αυτή εξαρτάται από το πάχος και τη γεωμετρία του δοκιμίου, και από το μέγεθος της ρωγμής.
- **K_{IC}** : κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης για στατική φόρτιση και συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) μέγιστου περιορισμού. Επομένως, η τιμή αυτή είναι η ελάχιστη για παχιά ελάσματα.

- **K_{Ia}** : κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης για δυναμική (κρουστική) φόρτιση και συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης μέγιστου περιορισμού.

Κάθε μία από τις παραπάνω τιμές είναι συνάρτηση και της θερμοκρασίας, ειδικά για τα υλικά εκείνα που παρουσιάζουν το φαινόμενο της διάβασης.

Η δυσθραυστότητα ενός υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σχεδιαστικό κριτήριο για την πρόληψη της θραύσης, ακριβώς όπως χρησιμοποιείται η τάση διαρροής ως σχεδιαστικό κριτήριο για την πρόληψη της διαρροής των όλκιμων υλικών υπό την επιβολή στατικής φόρτισης. Γνωρίζοντας την κρίσιμη τιμή του K_I για ένα υλικό δεδομένου πάχους και για συγκεκριμένη θερμοκρασία και ρυθμό φόρτισης, ο μελετητής μπορεί να υπολογίσει τα μεγέθη των σφαλμάτων που είναι αποδεκτά για τις συγκεκριμένες τάσεις. Αντίστροφα, μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις που μπορεί να φέρει ασφαλώς μια κατασκευή για δεδομένα σφάλματα.

Στο Σχήμα 3-5, φαίνεται πως αν ένας συνδυασμός τάσης και μεγέθους ρωγμής δηλαδή συγκεκριμένος K_I , φθάσει την τιμή του κρίσιμου συντελεστή τάσης K_{IC} , θα επέλθει θραύση. Υπάρχουν, βέβαια, πολλοί συνδυασμοί τάσης- μήκους ρωγμής (σ - a), για ένα συγκεκριμένο K_{IC} σε μια κατασκευή, για δεδομένη θερμοκρασία, ρυθμό φόρτισης και πάχος δοκιμίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5: Σχηματική παράσταση της σχέσης μεταξύ τάσης, μεγέθους ρωγμής και δυσθραυστότητας του υλικού

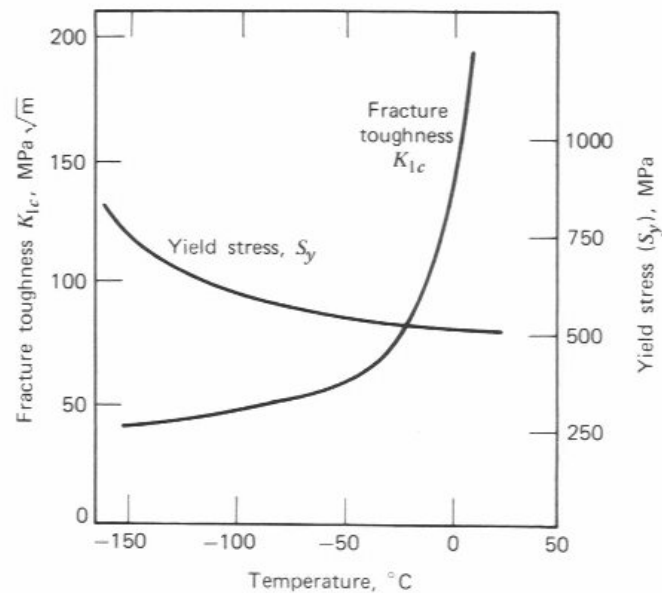
3.8.1 Επίδραση διαφόρων παραγόντων στη δυσθραυστότητα

Παρακάτω γίνεται αναφορά στους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ιδιότητα της δυσθραυστότητας ενός μεταλλικού υλικού.

(α) Θερμοκρασία διάβασης σε επίπεδη παραμόρφωση

Είναι γνωστό, ότι σε μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές, όπως στους κατασκευαστικούς χάλυβες, η μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά, γίνεται με μείωση της θερμοκρασίας, [18]. Η μετάβαση αυτή είναι σταδιακή και γίνεται σε σχετικά στενό εύρος θερμοκρασιών. Από τα αποτελέσματα δοκιμών μέτρησης δυσθραυστότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας, είναι φανερό ότι ο ρυθμός αύξησης του K_{IC} δεν παραμένει σταθερός, αλλά μεταβάλλεται δραστικά σε κάποιο θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοκιμίου και τις συνθήκες μέτρησης.

Στο Σχήμα 3-6, φαίνεται η σχέση του K_{IC} με τη θερμοκρασία, καθώς και με το όριο διαρροής κοινού ναυπηγικού χάλυβα.



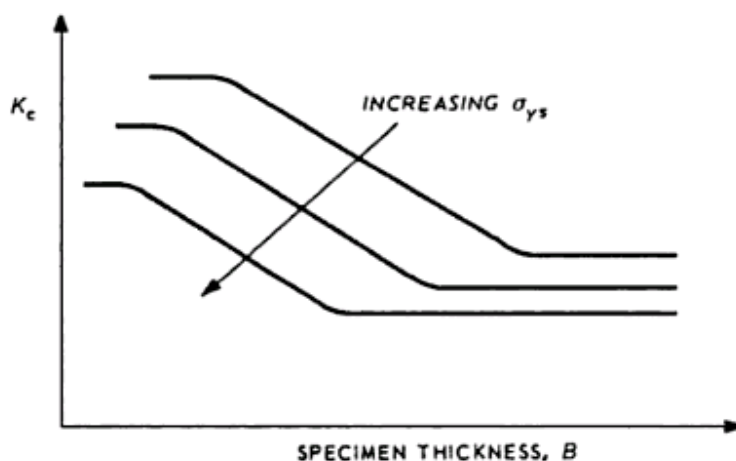
Σχήμα 3-6: Σχέση K_{IC} –θερμοκρασίας ναυπηγικού χάλυβα

(β) Πάχος Δοκιμίου

Πειραματικές δοκιμές έχουν αποδείξει ότι ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης K_{IC} , εξαρτάται από το πλάτος B του δοκιμίου που χρησιμοποιείται.

Μπροστά από οξεία ρωγμή, ο πλευρικός περιορισμός (ο οποίος αυξάνει με αύξηση του πάχους του ελάσματος), είναι τέτοιος που δημιουργεί τάσεις κατά τη διεύθυνση του πάχους. Επειδή οι τάσεις κατά την έννοια του πάχους πρέπει να μηδενίζονται στις δύο επιφάνειες του ελάσματος, έχουν μικρότερη τιμή σε λεπτά σε σχέση με τα παχιά ελάσματα.

Στο παρακάτω Σχήμα 3-7, διακρίνονται τρεις περιοχές, ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου: «πολύ λεπτό», (δεξιά περιοχή), «πολύ παχύ», (μεσαία περιοχή) και «μεσαίου πάχους», (περιοχή αριστερά) [52].



Σχήμα 3-7: Σχηματική απεικόνιση επίδρασης πάχους δοκιμίου και ορίου διαρροής στη δυσθραυστότητα

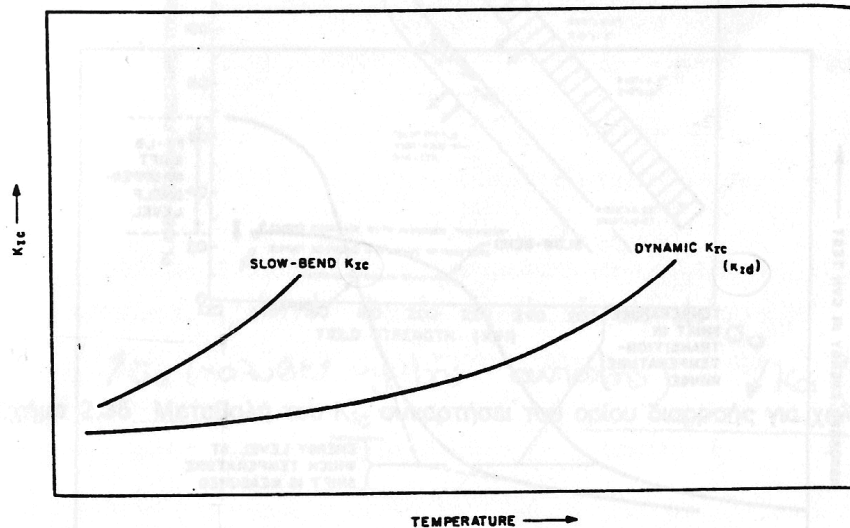
Για «πολύ παχιά» ελάσματα (περιοχή αριστερά), οι τάσεις κατά την έννοια του πάχους είναι μεγάλες και έτσι έχουμε τρισδιάστατη εντατική κατάσταση μπροστά από τη ρωγμή. Η κατάσταση αυτή ελαττώνει τη φαινόμενη ολκιμότητα του υλικού, άρα και τη δυσθραυστότητά του. Σε αυτή την περιοχή επικρατεί κυρίως η κατάσταση της επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

Για ελάσματα μέσου πάχους (μεσαία περιοχή), επικρατεί μια μεταβατική κατάσταση, στην οποία σταδιακά αυξάνεται η δυσθραυστότητα. Στη δεξιά περιοχή, που αντιπροσωπεύει λεπτά δοκίμια, η δυσθραυστότητα αγγίζει την υψηλότερη τιμή της, για

ένα συγκεκριμένο πάχος δοκιμίου B_m . Σε αυτή την περιοχή επικρατεί η επίπεδη εντατική κατάσταση (plane stress), και φαινόμενα διαρροής εμφανίζονται σε επίπεδα που σχηματίζουν γωνία 45° με την επιφάνεια του δοκιμίου.

(γ) Επίδραση θερμοκρασίας και ρυθμού φόρτισης στα K_{IC} και K_{Id}

Γενικά, η δυσθραυστότητα των κατασκευαστικών υλικών και ιδιαίτερα των χαλύβων, αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας και με μείωση του ρυθμού φόρτισης, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 3-8, τόσο ο K_{IC} όσο και ο K_{Id} αυξάνουν με αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά και για κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία, η δυσθραυστότητα σε κρουστική καταπόνηση, K_{Id} , είναι γενικά μικρότερη από εκείνη σε στατική, K_{IC} .



Σχήμα 3-8: Επίδραση θερμοκρασίας και ρυθμού φόρτισης στον K_{IC}

Σε σταθερή θερμοκρασία, οι δοκιμές δυσθραυστότητας που γίνονται σε μεγαλύτερους ρυθμούς φόρτισης δίνουν γενικά μικρότερες τιμές δυσθραυστότητας.

3.8.2 Δυσθραυστότητα κατ' εγκοπή

Για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης, το υλικό πρέπει να έχει επαρκή δυσθραυστότητα κατ' εγκοπή (notch toughness), η οποία ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια, συνήθως σε δυναμική καταπόνηση, παρουσία ενός προϋπάρχοντος σφάλματος (ρωγμής).

Η δυσθραυστότητα κατ'εγκοπή μπορεί να μετρηθεί με πληθώρα δοκιμών, όπως με τη δοκιμή κρούσης Charpy με εγκοπή τύπου V, τη δοκιμή δυναμικής σχάσης (dynamic tear test ή DT), τη δοκιμή K_{IC} , τη δοκιμή Charpy με προϋπάρχουσα ρωγμή, κ.α.

Στην περίπτωση χαλύβων χαμηλής και μέσης αντοχής, η ιδιότητα της δυσθραυστότητας περιγράφεται παραδοσιακά από τη μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά. Η μετάβαση από το ένα είδος συμπεριφοράς αστοχίας στο άλλο συμβαίνει γενικά όταν αλλάξουν οι συνθήκες υπηρεσίας όπως η εντατική κατάσταση, η θερμοκρασία και ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης (strain rate).

Η συμπεριφορά επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) αναφέρεται σε θραύση με ελαστική καταπόνηση και είναι βασικά ψαθυρή. Η πλαστική συμπεριφορά αναφέρεται σε όλκιμη θραύση κάτω από συνθήκες γενικής πλαστικής ροής. Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων καταστάσεων έχουμε την ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Φυσικά, το είδος της συμπεριφοράς ενός δοκιμίου σε θραύση εξαρτάται και από το ρυθμό και το είδος της φόρτισης (στατική ή δυναμική), αλλά και από τη θερμοκρασία. Στην περίπτωση στατικής φόρτισης, η διάβαση συμβαίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι σε δυναμική φόρτιση. Τέλος, σημειώνεται και η θερμοκρασία NDT (Nil – Ductility Temperature ή Θερμοκρασία Μηδενικής Ολκιμότητας), η οποία ορίζεται ως η μέγιστη θερμοκρασία για την οποία έχουμε συμπεριφορά επίπεδης παραμόρφωσης σε συνθήκες κρουστικής καταπόνησης.

Ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα που γεννιούνται σχετικά με τη μεταφορά των αποτελεσμάτων οποιασδήποτε δοκιμής δυσθραυστότητας σε πραγματικές κατασκευές είναι και το ακόλουθο: *ποιο επίπεδο συμπεριφοράς υλικού πρέπει να απαιτηθεί για να έχουμε ικανοποιητική απόδοσή του σε μια συγκεκριμένη κατασκευή;*

Αν και η πλαστική συμπεριφορά θα ήταν η πιο επιθυμητή για όλα τα κατασκευαστικά υλικά, κάτι τέτοιο είναι πιθανό να μην είναι αναγκαίο ή οικονομικό για πολλές κατασκευές. Έτσι, για μεγάλο αριθμό κατασκευών, ένα λογικό επίπεδο συμπεριφοράς είναι το ελαστοπλαστικό, το οποίο θεωρείται ότι είναι επαρκές για να εμποδιστεί η έναρξη ψαθυρής θραύσης με την προϋπόθεση ότι έχουν ακολουθηθεί ικανοποιητικές μέθοδοι μελέτης και κατασκευής.

Ας σημειωθεί ότι η μετάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά δεν παρατηρείται σε όλα τα υλικά. Για παράδειγμα, οι χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής, το αλουμίνιο και το τιτάνιο ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Γενικά, ο βασικός σκοπός των διαφόρων τύπων δοκιμών που υπάρχουν για τη μέτρηση της δυσθραυστότητας υλικών έγκειται στην προσομοίωση της συμπεριφοράς πραγματικών κατασκευών, έτσι ώστε τα αποτελέσματα των εργαστηριακών πειραμάτων να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της υπηρεσιακής συμπεριφοράς. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα των δοκιμών (όπως απορροφούμενη ενέργεια, εμφάνιση επιφάνειας θραύσης, παραμόρφωση) δεν μπορούν πάντα να μεταφερθούν εύκολα σε μορφή παραμέτρων χρήσιμων για τη μελέτη και το σχεδιασμό κατασκευών (τάσεις, μέγεθος σφαλμάτων). Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια η μηχανική θεωρία θραύσης (fracture mechanics theory), η οποία παρέχει πλέον στους μελετητές ένα εργαλείο για την ποσοτική αντιμετώπιση του προβλήματος της θραύσης.

3.9 Κριτήρια Αποφυγής Θραύσης

Η επιλογή ενός κριτηρίου για την αποφυγή της θραύσης, δηλαδή ο καθορισμός της απαιτούμενης δυσθραυστότητας, καθώς και το επιθυμητό κόστος για τη χρήση υλικών υψηλού επιπέδου δυσθραυστότητας, αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα για την ανάπτυξη ενός επαρκούς σχεδίου ελέγχου θραύσης (fracture control plan) και πρέπει να βασίζεται σε πολύ προσεκτική μελέτη των ιδιοτήτων μιας κατασκευής.

Μερικοί από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάπτυξη οποιουδήποτε κριτηρίου είναι:

- (α) Οι υπηρεσιακές συνθήκες (φορτία, θερμοκρασία, ρυθμός επιβολής φορτίων, κ.λπ.) που θα συναντήσει η κατασκευή κατά τη λειτουργική της ζωή.
- (β) Το επιθυμητό επίπεδο εκπλήρωσης του σκοπού της κατασκευής, καθώς και της συμπεριφοράς της.
- (γ) Τα αποτελέσματα πιθανής αστοχίας.

Σίγουρα, δεν μπορεί να υπάρχει ένα μοναδικό βέλτιστο κριτήριο για όλες τις κατασκευές, επειδή οποιαδήποτε βελτιστοποιημένη μελέτη βασίζεται τόσο σε οικονομικούς όσο και σε τεχνικούς παράγοντες.

Στις περισσότερες εφαρμογές, ένα επαρκές κριτήριο αποφυγής θραύσης είναι η ύπαρξη κάποιου επιπέδου ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς στην υπηρεσιακή θερμοκρασία και τον υπηρεσιακό ρυθμό φόρτισης. Το βασικό ερώτημα, όμως, είναι πώς μπορεί ο μελετητής να βεβαιωθεί ότι αυτό θα συμβεί στην πράξη.

3.9.1 Ορισμός γενικών επιπέδων συμπεριφοράς των υλικών

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του μηχανικού είναι η θεμελίωση συγκεκριμένων απαιτήσεων δυσθραυστότητας για τη βιωσιμότητα μίας κατασκευής. Η απαιτούμενη δυσθραυστότητα δεν πρέπει να είναι υπερβολική, αλλά ούτε και ανεπαρκής για τις συνηθισμένες υπηρεσιακές συνθήκες της κατασκευής.

Από την προηγούμενη ανάπτυξη συνάγεται ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος σφάλματος σχετίζεται με τη δυσθραυστότητα και το όριο διαρροής του υλικού, σύμφωνα με τη σχέση :

$$a = C \cdot \left(\frac{K_C \text{ ή } K_{IC} \text{ ή } K_{Id}}{\sigma_o \text{ ή } \sigma_{od}} \right)^2$$

Σε συνθήκες μέγιστου περιορισμού (επίπεδη παραμόρφωση-plane strain), που συναντώνται για παράδειγμα σε παχιά ελάσματα ή σε περιοχές μεγάλου περιορισμού, το μήκος σφάλματος είναι ανάλογο του $(K_{IC}/\sigma_o)^2$ ή $(K_{Id}/\sigma_{od})^2$, όπου τόσο η δυσθραυστότητα όσο και το όριο διαρροής μετρούνται στην υπηρεσιακή θερμοκρασία και για το ρυθμό φόρτισης της κατασκευής.

Επομένως, ο λόγος K_{IC}/σ_o ή K_{Id}/σ_{od} , είτε στην περιοχή επίπεδης παραμόρφωσης, όπου ισχύει, είτε με παρεμβολή στην ελαστοπλαστική περιοχή, αποτελεί ένα ικανοποιητικό μέγεθος για τη μέτρηση της σχετικής δυσθραυστότητας των κατασκευαστικών υλικών. Στις περισσότερες κατασκευαστικές εφαρμογές είναι επιθυμητή η αποδοχή σχετικά μεγάλων σφαλμάτων. Επομένως, είναι επιθυμητή η χρήση υλικών με υψηλούς λόγους K_{IC}/σ_o ή K_{Id}/σ_{od} , δηλαδή ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

Επειδή η ύπαρξη μεγάλου περιορισμού (παχιά ελάσματα – συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης) στο άκρο της ρωγμής είναι δυνατό να οδηγήσει σε πρόωρη θραύση, ο μηχανικός πρέπει να προσπαθεί να δημιουργεί τον μικρότερο δυνατό περιορισμό (λεπτά ελάσματα – συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης) στο άκρο της ρωγμής. Για να βοηθηθεί ο μηχανικός στο έργο του, τα ακόλουθα τρία γενικά επίπεδα συμπεριφοράς μπορούν να οριστούν με χρήση της ορολογίας της μηχανικής θεωρίας της θραύσης [1]:

A. Ελαστική Συμπεριφορά σε Επίπεδη Παραμόρφωση :

$$(K_{IC}/\sigma_0 \text{ ή } K_{IId}/\sigma_{0d} < (t/2.5)^{1/2})$$

Υλικά για τα οποία η σχέση δυσθραυστότητας και πάχους είναι τέτοια, ώστε να ισχύει η παραπάνω σχέση, συμπεριφέρονται ελαστικά σε επίπεδη παραμόρφωση και γενικά θραύονται κατά ψαθυρό τρόπο. Τέτοια υλικά συνήθως δεν χρησιμοποιούνται για κατασκευές και λόγω του υψηλού περιορισμού στα άκρα της ρωγμής και λόγω του μικρού μεγέθους των κρίσιμων μηκών ρωγμής στις τάσεις μελέτης. Ευτυχώς, τα περισσότερα υλικά έχουν επίπεδα δυσθραυστότητας τέτοια που να μην συμπεριφέρονται ελαστικά στις υπηρεσιακές θερμοκρασίες, στους υπηρεσιακούς ρυθμούς φόρτισης και για τα συνηθισμένα μεγέθη που χρησιμοποιούνται. Παρόλα αυτά, σε πολύ παχιά ελάσματα ή ελάσματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών, όπου ο περιορισμός μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, είναι δυνατή η ψαθυρή θραύση, αν και η βασική τιμή δυσθραυστότητάς τους, όπως μετρείται με τα μικρά εργαστηριακά δοκίμια, φαίνεται ότι είναι επαρκής.

B. Συμπεριφορά σε Επίπεδη Εντατική Κατάσταση (ελαστοπλαστική) :

$$((t/2.5)^{1/2} < K_{IC}/\sigma_0 \text{ ή } K_{IId}/\sigma_{0d} < at^{1/2})$$

Τα υλικά αυτά γενικά υπόκεινται σε ελαστοπλαστική θραύση με διάφορα ποσά διαρροής πριν από τη θραύση. Τα αποδεκτά μεγέθη σφαλμάτων για θραύση διαφέρουν αρκετά σε τιμή, αλλά είναι δυνατό να είναι αρκετά μεγάλα. Πριν από τη θραύση έχουμε συνήθως δημιουργία μεγάλων πλαστικών ζωνών μπροστά από το άκρο της ρωγμής. Οι περισσότερες κατασκευές είναι φτιαγμένες από τέτοια υλικά. Επομένως, είναι δύσκολη η μέτρηση των τιμών K_{IC} ή K_{IId} κατευθείαν, παρά μόνο αν χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγάλα δοκίμια.

Γ. Γενική Διαρροή (πλαστική κατάσταση) :

$$(K_{IC}/\sigma_0 \text{ ή } K_{Ia}/\sigma_{od} > at^{1/2})$$

Τα υλικά αυτά συνήθως θραύονται κατά πλαστικό όλκιμο τρόπο, με δημιουργία μεγάλων παραμορφώσεων πριν από τη θραύση. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση αυτή τα K_{IC} ή K_{Ia} δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας.

Αυτός ο τύπος συμπεριφοράς είναι πολύ επιθυμητός σε κατασκευές και αντιπροσωπεύει πολύ υψηλά επίπεδα δυσθραυστότητας. Τόσο υψηλή δυσθραυστότητα, όμως, είναι σπάνια αναγκαία και επομένως δεν προδιαγράφεται, εκτός συγκεκριμένων εξαιρέσεων όπως γάστρες υποβρυχίων ή πυρηνικοί αντιδραστήρες.

Σε κατασκευαστικούς χάλυβες, τα τρία αυτά γενικά επίπεδα συμπεριφοράς περιγράφονται συνήθως με βάση τη διάβαση από ψαθυρή σε όλκιμη συμπεριφορά, όπως αυτή μετριέται με τις διάφορες δοκιμές δυσθραυστότητας.

3.10 Αποτελέσματα Αστοχίας

Τα αποτελέσματα της αστοχίας μιας κατασκευής, μπορεί να ποικίλουν από απώλεια της ανθρώπινης ζωής, που είναι και το σημαντικότερο, έως οικονομικά και κοινωνικά. Οι γνώση των αποτελεσμάτων της αστοχίας είναι σημαντικός παράγοντας που συντελεί στην επιλογή των κριτηρίων αποφυγής θραύσης, καθώς και στο επιθυμητό επίπεδο συμπεριφοράς (ελαστοπλαστική, πλαστική, επίπεδη παραμόρφωση) που απαιτείται από τα κριτήρια δυσθραυστότητας.

Τα κριτήρια της θραύσης μπορεί πολλές φορές να είναι συντηρητικά, καθώς επιλέγονται με βάση τα αποτελέσματα της πιθανής αστοχίας, όπως είναι η απώλεια της ανθρώπινης ζωής. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η πρόταση για την απαίτηση δυσθραυστότητας των ναυπηγικών χαλύβων για θερμοκρασία μηδενικής ολκιμότητας NDT να είναι ίση με 0°F (δηλαδή -17.8°C), για ελάχιστη υπηρεσιακή θερμοκρασία 30°F (-1.11°C). Το κριτήριο αυτό στηρίζεται στην υπόθεση ότι τα πλοία φορτίζονται κρουστικά. Παρ'όλο που το κριτήριο αυτό φαίνεται συντηρητικό, αν σκεφτεί κανείς το πιθανό αποτέλεσμα αστοχίας (απώλεια ζωών), μπορεί να πει ότι το κριτήριο είναι αρκετά λογικό.

3.10.1 Μέθοδοι ασφαλούς αστοχίας (fail safe approach)

Με σκοπό τη διασφάλιση μιας κατασκευής έναντι αστοχίας χρησιμοποιούνται διάφορες ασφαλιστικές δικλείδες, έτσι ώστε ακόμα και αν σημειωθεί τοπική αστοχία, η κατασκευή να παραμείνει ασφαλής στο σύνολό της. Οι ασφαλιστικές αυτές δικλείδες αποτελούν τη βάση και τη φιλοσοφία της μεθόδου ασφαλούς αστοχίας (fail-safe approach). Βασικός στόχος είναι να προληφθεί η πιθανή αστοχία της κατασκευής, έτσι ώστε να μην καταστραφεί ολοκληρωτικά, και κάθε τοπική αστοχία σε κάποιο από τα στοιχεία της να μπορεί να επισκευασθεί ή εγκαίρως να αντικατασταθεί.

Ένα από τα σημαντικά ερωτήματα που γεννιούνται σε αυτό το σημείο είναι με ποιο τρόπο και με ποια κριτήρια γίνεται η επιλογή των μεθόδων ασφαλούς αστοχίας που εφαρμόζονται. Οι περισσότεροι μηχανικοί τείνουν να συσχετίζουν τον κίνδυνο αστοχίας με την *πιθανότητα να συμβεί* η αστοχία, ενώ άλλοι στηρίζουν τις θεωρήσεις τους στο *κόστος των πιθανών απωλειών*, δηλαδή της ανθρώπινης ζωής, και έχουν ως σκοπό τη διασφάλιση της κατασκευής, όσο μικρή και αν είναι η πιθανότητα να αστοχήσει. Με λίγα λόγια, οι πρώτοι στηρίζονται στην *αξιοπιστία* της κατασκευής, ενώ οι δεύτεροι στην *ασφάλεια* που αυτή θα παρέχει.

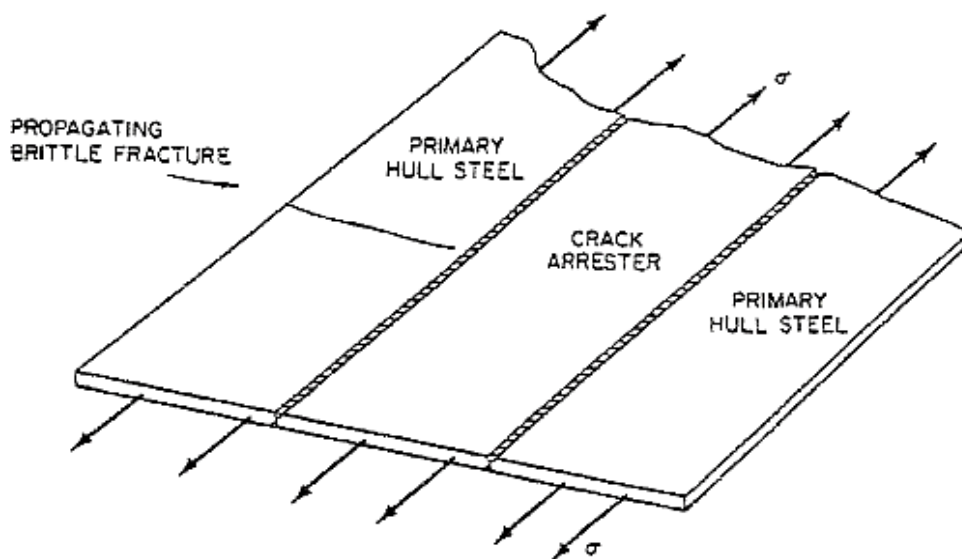
Μερικά από τα βασικότερα παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδων ασφαλούς αστοχίας είναι τα παρακάτω [1]:

A. Πολλαπλά στοιχεία για τη μεταφορά φορτίου

Εάν χρησιμοποιούνται πολλά παράλληλα στοιχεία που μπορούν να μεταφέρουν το φορτίο (multiple load – path members), τότε αστοχία ενός τέτοιου στοιχείου δεν οδηγεί αναγκαστικά σε ολική αστοχία της κατασκευής, επειδή το φορτίο κατανέμεται και φέρεται από τα υπόλοιπα μέλη.

B. Χρήση στοιχείων σύλληψης ρωγμών

Με την τοποθέτηση στοιχείων σύλληψης ρωγμών (crack arrestors) σε διάφορα σημεία μιας κατασκευής, είναι δυνατή η παρεμπόδιση υπερβολικής μεγέθυνσης των ρωγμών πριν σημειωθεί αστοχία της κατασκευής. Έχουν ιδιαίτερη χρησιμότητα, κυρίως στην περίπτωση διάδοσης κοπωτικών ρωγμών.



Σχήμα 3-9: Τυπική γεωμετρική διάταξη συνεπίπεδων στοιχείων σύλληψης των ρωγμών (crack arrestors)

Χρήση τέτοιων στοιχείων για σύλληψη των ρωγμών γίνεται στη ναυπηγική, όπως φαίνεται και στην παραπάνω Εικόνα 3-9.

Τα στοιχεία σύλληψης ρωγμών δεν εφαρμόζονται μόνο στη γάστρα του πλοίου, αλλά και σε σωληνώσεις, για την αποφυγή της διαμήκουσ διάδοσης ρωγμών.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει έρευνες σχετικά με τη χρήση «μπαλωμάτων» σύνθετων υλικών (composite patches) για την σύλληψη και την επιδιόρθωση των ρωγμών που δημιουργούνται στα διάφορα σημεία της γάστρας του πλοίου. Αυτά τα σύνθετα στοιχεία λειτουργούν ως στοιχεία σύλληψης ρωγμών, μειώνοντας την τάση στην περιοχή του άκρου της ρωγμής.

Ανάλογα με την περίπτωση και τις συνθήκες, η σωστή τοποθέτηση και χρήση των στοιχείων σύλληψης ρωγμών, μπορεί να μετριάσει την ανάγκη για συνεχείς επισκευές των ρωγμών που αναπτύσσονται στην κατασκευή, άρα συμβάλλουν και στη μείωση του κόστους.

3.11 Οι Ρωγμές στη Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου

Οι ρωγμές αποτελούν αδιαμφισβήτητα την πρωταρχική πηγή αστοχίας μιας μεταλλικής κατασκευής. Δεν αποτελούν πάντοτε κίνδυνο για την ολική αστοχία της

κατασκευής, αλλά, υπό συνθήκες, μια τοπική αστοχία μπορεί να διαδοθεί και να έχει σοβαρές συνέπειες για την κατασκευή.

Ο επιστημονικός ορισμός της ρωγμής είναι *«μία ασυνέχεια υλικού οφειλόμενη σε θραύση και χαρακτηριζόμενη από οξύ άκρο και μεγάλους λόγους μήκους και πλάτους προς το άνοιγμά της»*. Ειδικότερα, στο άκρο της ρωγμής, το οποίο είναι συνήθως οξύ, επικρατεί πολύ μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Αυτά τα σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, σε συνδυασμό με τις εξωτερικές συνθήκες, μπορεί να αποτελέσουν επικίνδυνα σημεία ραγδαίας διάδοσης της ρωγμής, με καταστροφικά αποτελέσματα.

Κατά τον σχεδιασμό μίας κατασκευής έναντι ρωγμάτωσης, γεννιούνται τα εξής ερωτήματα, που αφορούν στα χαρακτηριστικά μίας ρωγμής, καθώς και το κρίσιμο φορτίο, το οποίο μπορεί αυτή να δεχθεί:

- Ποιο είναι το μέγιστο μήκος ρωγμής που το υλικό μπορεί να αντέξει χωρίς να αστοχήσει;
- Πώς μεταβάλλεται η αντοχή της κατασκευής σε συνάρτηση με το μήκος της ρωγμής;
- Πώς σχετίζεται το μέγεθος της ρωγμής με τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή;
- Ποιο είναι το κρίσιμο φορτίο που μπορεί να διαδόσει μία ρωγμή και είναι η διάδοση της ρωγμής ασταθής ή όχι;
- Πώς αυξάνεται το μέγεθος μίας ρωγμής σε συνάρτηση με τον χρόνο;

Όλα αυτά τα ερωτήματα δεν είναι απλό να απαντηθούν και σε αυτό το σημείο επεισέρχονται οι θεωρίες μηχανικής της θραύσης.

Είναι δύσκολο να προβλεφθούν με βεβαιότητα τα σημεία στα οποία θα δημιουργηθούν ρωγμές, καθώς επίσης και ο τρόπος με τον οποίο θα διαδοθούν. Πάνω σε αυτά τα δύο προβλήματα, «έναρξη ρωγμής» και «διάδοση ρωγμής», έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος τα τελευταία πενήντα χρόνια, και έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψής τους. Ακόμη και στις μέρες μας, όμως, δεν μπορεί να προβλεφθεί με σιγουριά ο τρόπος με τον οποίο θα συμπεριφερθεί ένα υλικό και η απόκρισή του σε ένα πολύπλοκο πεδίο φορτίσεων, όπως συμβαίνει στη θάλασσα.

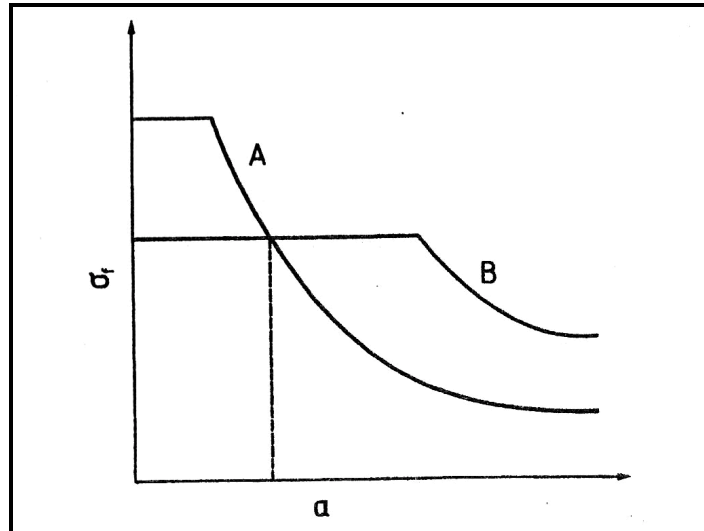
Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε η διάδοση προϋπάρχουσας ρωγμής σε υβριδικά δοκίμια δύο κραμάτων αλουμινίου και ενισχυμένα δοκίμια με εξελασμένα

ενισχυτικά βολβολάμας, καθώς η βασική κατηγορία σφαλμάτων στις ναυπηγικές κατασκευές αφορά συγκολλητά τμήματά τους, καθώς και σημεία που έχουν υποστεί κάποια μηχανική επεξεργασία, όπως είναι η εξέλαση. Ειδικότερα στις συγκολλητές κατασκευές, οι ρωγμές αποτελούν την πιο επικίνδυνη μορφή σφάλματος γιατί υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούν να επεκταθούν με μεγάλη ταχύτητα και να προκαλέσουν κατάρρευση της κατασκευής.

3.11.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την αστοχία κατασκευής λόγω ρωγμών

Κατά την επιλογή υλικού που θα χρησιμοποιηθεί σε μία ναυπηγική κατασκευή, πρέπει να επιλέξουμε ανάμεσα σε υλικά με υψηλό όριο διαρροής, αλλά χαμηλή αντοχή σε θραύση και σε υλικά χαμηλού ορίου διαρροής, αλλά υψηλής αντοχής σε θραύση, αντίστοιχα. Όπως ανακάλυψε ο Griffith [1, 18], η αντοχή σε θραύση (fracture strength) είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του μήκους της ρωγμής για ψαθυρή θραύση. Έτσι, για δύο διαφορετικά υλικά A και B, εκ των οποίων το A έχει υψηλότερο όριο διαρροής, γενικά μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή της κατασκευής είναι μεγαλύτερη αν χρησιμοποιηθεί το υλικό υψηλού ορίου διαρροής, στην περίπτωση που αναμένουμε ότι θα αναπτυχθούν ρωγμές με μικρό μήκος. Αντίθετα, στην περίπτωση μεγάλου μήκους ρωγμής, είναι προτιμότερο ένα υλικό με μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση, και χαμηλότερο όριο διαρροής.

Στο παρακάτω Σχήμα 3-10 φαίνεται πώς μεταβάλλεται η τάση θραύσης σ_f δύο διαφορετικών υλικών A και B, καθώς το μήκος ρωγμής αυξάνεται. Σημειώνεται ότι το υλικό A έχει υψηλότερο όριο διαρροής από το B, και άρα χαμηλότερη δυσθραυστότητα.



Σχήμα 3-10: Σχέση τάσης θραύσης σ_f και μήκους ρωγμής a δύο διαφορετικών υλικών A, B ($\sigma_{YA} > \sigma_{YB}$)

Η βασικότερη επίδραση στην αστοχία μιας κατασκευής λόγω ρωγμής είναι αυτή των ατελειών που προϋπάρχουν στο υλικό. Ανάλογα με την επίδραση των ατελειών στο υλικό της κατασκευής, η αστοχία μπορεί να επέλθει με ψαθυρό ή με όλκιμο τρόπο.

Στις αστοχίες κατά τις οποίες η συμπεριφορά είναι όλκιμη, οι ατέλειες που επιδρούν είναι αυτές που προκαλούν παραμόρφωση και διακοπή των κρυσταλλικών πεδίων. Παρεμποδίζεται έτσι η ολίσθηση των διαταραχών και αναπτύσσεται αντίσταση στις πλαστικές παραμορφώσεις που χαρακτηρίζουν την αντοχή των μετάλλων με υψηλή τάση διαρροής. Παραδείγματα τέτοιων ατελειών είναι οι πρόσθετες ξένες ουσίες, τα σύνορα των κόκκων, τα ομογενή ιζήματα και τα δίκτυα των διαταραχών. Οι μεγαλύτερες ατέλειες, όπως τα πρόσθετα υλικά, τα πορώδη υλικά, τα επιφανειακά γδαρσίματα και οι μικρές ρωγμές, μπορεί να επηρεάσουν το εμβαδόν της επιφάνειας που παραλαμβάνει τις εξωτερικές φορτίσεις, δεν έχουν όμως επίδραση στην αντοχή του υλικού σε διαρροή.

Στις αστοχίες που σχετίζονται με ρωγμές, δηλαδή αυτές που προκύπτουν προ της γενικευμένης διαρροής, οι σχετικές ατέλειες επιδρούν στο μακροσκοπικό ή φαινομενολογικό επίπεδο, καθώς μόνο τα τοπικά εντατικά πεδία που σχετίζονται με τις ατέλειες επηρεάζουν την απόκριση. Οι ατέλειες της ατομικής δομής που επιδρούν στην αντίσταση στην πλαστική ροή δεν έχουν τότε κάποια άμεση επίδραση.

3.11.2 Όλκιμες και ψαθυρές ρωγμές

Οι ρωγμές κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: ψαθυρές και όλκιμες. Και στις δύο περιπτώσεις, όπως είδαμε παραπάνω, οι ατέλειες-μακροσκοπικές και μικροσκοπικές-έχουν μεγάλη επίδραση, αλλά προκαλούν διαφορετικά αποτελέσματα (ψαθυρή ή όλκιμη αστοχία).

Οι ρωγμές που συναντώνται περισσότερο σήμερα στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου είναι κατά κανόνα όλκιμες και οφείλονται στην κόπωση της κατασκευής. Οι όλκιμες ρωγμές (ductile cracks) προκύπτουν ως αποτέλεσμα υπερβολικής φόρτισης (overload). Η έκταση της μετατόπισης του υλικού εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο στήριξης της κατασκευής. Επίσης, σε διατομές όπου υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί (παχιές διατομές) μπορεί να προκύψει όλκιμη θραύση χωρίς σημαντική σμίκρυνση της διατομής, δηλαδή χωρίς σημαντική δημιουργία λαιμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μόνη διαφορά είναι η (οπτική) αντανακλαστικότητα της επιφάνειας θραύσης, που τείνει να είναι πιο έντονη στην περίπτωση της ψαθυρής ρωγμής.

Όσον αφορά στις ψαθυρές ρωγμές, είναι δύσκολο να αποφευχθούν, αλλά είναι σημαντικό η κατασκευή να υπόκειται σε συχνές διαδικασίες επίβλεψης και επισκευής, έτσι ώστε να παρατηρούνται τυχόν ψαθυρές ρωγμές και να διορθώνονται προτού προκαλέσουν καταστροφική αστοχία. Οι ψαθυρές ρωγμές μπορούν να διαδοθούν με πολύ μεγάλη ταχύτητα, που αγγίζει και τα 500m/s, ενώ μια κοπωτική ρωγμή εξαπλώνεται με σημαντικά μικρότερη ταχύτητα. Οι ψαθυρές ρωγμές είναι και οι πιο ανησυχητικές, μιας και έχουν προκαλέσει μέχρι και θραύση και κοπή πλοίων στα δύο στο παρελθόν.

3.11.3 Τρόπος γένεσης ρωγμών (crack initiation)

Όσον αφορά στη γένεση των ρωγμών, την τελευταία πενήνταετία έχουν σημειωθεί σημαντικές πρόοδοι στην κατανόηση του φαινομένου της γένεσης των ρωγμών, το οποίο παραμένει ακόμα και σήμερα περίπλοκο. Δεν είναι δυνατόν να υπάρξει απόλυτη βεβαιότητα ως προς τον τρόπο που συμπεριφέρονται τα υλικά, και ως προς τους λόγους για τους οποίους εμφανίζεται μία ρωγμή σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της γένεσης είναι και μακροσκοπικοί, αλλά και μικροσκοπικοί, δηλαδή αφορούν τη μικροδομή (microstructure) του υλικού. Επίσης,

πρέπει να επισημάνουμε ότι οι ρωγμές δεν αποτελούν μεμονωμένο φαινόμενο, αλλά προκύπτουν σχεδόν πάντα ταυτόχρονα με άλλες αστοχίες, και σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλονται σε αυτές. Έτσι, πρέπει να εξετάζονται σε συνάρτηση με άλλα συναφή προβλήματα.

Η γνώση της σύλληψη ρωγμών είναι πολύ σημαντική σε μεγάλες συγκολλητές κατασκευές όπως είναι τα πλοία, αποθηκευτικά οχήματα, σωληνώσεις υψηλής πίεσης και θαλάσσιες κατασκευές (π.χ. πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου).

Το πρόβλημα της γένεσης των ρωγμών δεν εξετάστηκε διεξοδικά στην παρούσα εργασία. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε, όμως, κάποια θεωρητικά στοιχεία, που μπορούν να φανούν χρήσιμα, αν όχι στην αποφυγή της έναρξης της ρωγμής, στην πρόληψη της αστοχίας της κατασκευής.

Σύμφωνα με τον A.H. Priest [29], η αρχική ελαστική ενέργεια που ενυπάρχει στο υλικό μειώνεται λόγω της απορροφούμενης ενέργειας θραύσης που αναπτύσσεται, καθώς μια ρωγή δημιουργείται και διαδίδεται στο υλικό. Μια προτεινόμενη σχέση που δίνει την ελάχιστη ενέργεια R_s που απαιτείται για τη διάδοση ρωγμής μήκους a_p είναι η εξής:

$$R_s > \frac{\sigma_i^2 L}{2E(1 + a_p / W)}$$

όπου σ_i η τάση που αναπτύσσεται, L το μήκος της κατασκευής, a_p το μήκος της ρωγμής, W το πλάτος της ρωγμής και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Με βάση αυτή τη σχέση, προκύπτουν σχέσεις για τον συντελεστή έντασης τάσης K_s που επικρατεί στο σημείο έναρξης της ρωγμής. Με βάση αυτές τις σχέσεις μπορεί να γίνει μία προσεγγιστική πρόβλεψη του μήκους της ρωγμής που θα προκύψει, καθώς και της θερμοκρασίας στην οποία θα γίνει η έναρξη, με την προϋπόθεση ότι το υλικό έχει ελαστική συμπεριφορά. Οι παραπάνω σχέσεις βέβαια, έχουν νόημα για κατασκευές με μικρό μήκος L , και δεν μπορούν να εφαρμοσθούν στο σύνολο μίας ναυπηγικής κατασκευής, όπως ένα πλοίο. Επίσης, ο A.H Priest ασχολήθηκε με την επίδραση των διαστάσεων της κατασκευής στη σύλληψη και διάδοση μιας ρωγμής, μέσω πειραμάτων σε δοκίμια διαφορετικού πάχους και μηχανικών ιδιοτήτων.

Σε συγκολλητές κατασκευές η έναρξη της ρωγμής συνήθως αποφεύγεται, βεβαιώνοντας ότι η δυσθραυστότητα του υλικού στη Θ.Ε.Ζ (Heat Affected Zone) είναι αρκετά υψηλή. Μια άλλη μέθοδος με την οποία μπορούμε να αποφύγουμε την έναρξη

ρωγμών που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε θραύση είναι ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας έναρξης ρωγμής, η οποία είναι χαμηλότερη της υπηρεσιακής θερμοκρασίας του πλοίου.

3.11.4 Διάδοση ρωγμών (crack propagation)

Οι κρίσιμοι παράγοντες που καθορίζουν αν θα συμβεί ψαθυρή θραύση είναι το επίπεδο των τάσεων, το μήκος της ρωγμής και η δυσθραυστότητα του υλικού, με το τελευταίο να εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον ρυθμό της παραμόρφωσης. Το επίπεδο των τάσεων περιλαμβάνει τις επιδράσεις της συγκέντρωσης τάσης και των παραμενουσών τάσεων, που δημιουργούνται στο στάδιο της κατασκευής.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες η θραύση των μεταλλικών υλικών της κατασκευής και των συγκολλήσεων γίνεται με «σκίσιμο». Όταν ξεπεραστεί η οριακή δυσθραυστότητα για την έναρξη της ρωγμής, τότε η ενέργεια που απαιτείται για την εξάπλωση της ρωγμής είναι τόσο μικρή, ώστε μπορεί να προκύψει από την απελευθέρωση της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας του συστήματος. Αν η έναρξη της θραύσης δεν αποφευχθεί, τότε η κατασκευαστική αστοχία είναι καταστροφική για την κατασκευή.

Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η διάδοση των ρωγμών γίνεται μόνο υπό την αύξηση φορτίου ή της μετατόπισης. Η θερμοκρασία κατά την οποία αρχίζει η μετάβαση στο στάδιο της θραύσης ονομάζεται θερμοκρασία μετάβασης (transition temperature).

Η ακριβής πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο θα διαδοθεί η ρωγμή, είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει πολύ τους ερευνητές, και τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί αρκετά προσεγγιστικά μοντέλα. Σύμφωνα με τους Dexter et al. [30, 31], ο συντελεστής έντασης τάσης K παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόβλεψη της διάδοσης ρωγμής, εάν ληφθεί υπόψη η ελαστοπλαστική θεωρία θραυστομηχανικής, καθώς και οι παραμένουσες τάσεις που πιθανότατα υπάρχουν στα τμήματα της κατασκευής.

Στα περισσότερα πλοία είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθούν πολύ μακριές κοπωτικές ρωγμές, οι οποίες αυξάνονται με βραδύ και σταθερό ρυθμό, χωρίς να καταλήγουν σε αστοχία της κατασκευής. Αυτό οφείλεται, κυρίως, στο γεγονός ότι υπάρχει περίσσεια του υλικού στην κατασκευή, εκατέρωθεν της ρωγμής, καθώς και στο ότι το υλικό έχει επαρκή δυσθραυστότητα κατ'εγκοπή. Σύμφωνα με τους Dexter et al. [30, 31], λόγω της στιβαρότητας της γύρω κατασκευής, επιβραδύνεται η διάδοση της

κοπωτικής ρωγμής και κατά συνέπεια μειώνονται και οι τάσεις που επικρατούν στην περιοχή της ρωγμής.

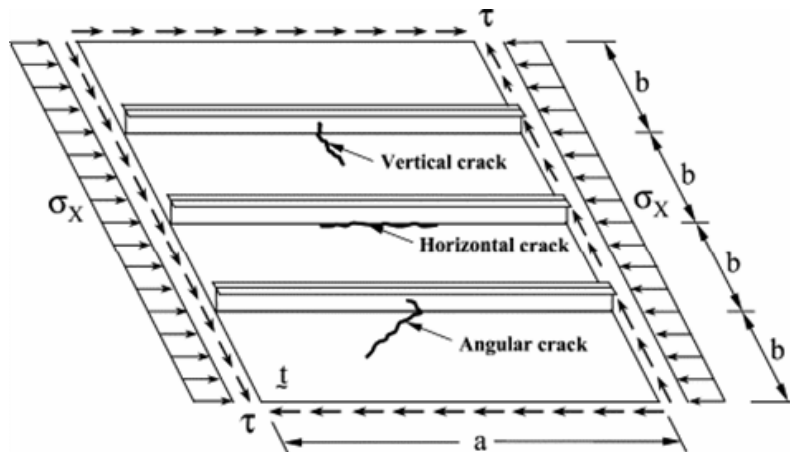
Είναι πολύ σημαντική η προσεγγιστική πρόβλεψη του ρυθμού διάδοσης των κοπωτικών ρωγμών, έτσι ώστε κάθε ορατή ρωγμή στην επιφάνεια του πλοίου να λαμβάνεται υπόψη στον προγραμματισμό των επισκευών.

3.11.5 Διάδοση ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα

Όσον αφορά στη διάδοση ρωγμών σε ενισχυμένα (stiffened) ελάσματα, που είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, πειράματα που έχουν διεξαχθεί σε ενισχυμένα ελάσματα αλουμινίου, έχουν αποδείξει την ευεργετική επίδραση που έχουν τα ενισχυτικά, καθώς η ρωγμή διανύει την πλάκα του ελάσματος, [10]. Η θετική επίδραση έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ αρχικά το ασκούμενο φορτίο μεταφέρεται από το έλασμα και τα ενισχυτικά, στη συνέχεια μεταφέρεται στα ενισχυτικά, κατά τη διάδοση της ρωγμής. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η παρουσία ενισχυτικών στην πορεία διάδοσης των ρωγμών, αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη διάδοση και σύλληψη των ρωγμών συνεισφέροντας στην αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά πως τα ενισχυτικά συμβάλλουν στην παράταση της υπηρεσιακής ζωής του πλοίου, προτού απαιτηθεί επισκευή της μεταλλικής κατασκευής λόγω ρωγμών.

Γενικά, η ύπαξη ενισχυτικών προκαλεί μείωση στο ρυθμό διάδοσης των ρωγμών, εκτός από την περίπτωση στην οποία η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα σε μετωπική συγκόλληση κατά συμβολή. Σε αυτή την περίπτωση, η συμπεριφορά του ελάσματος είναι ίδια με αυτήν ενός μη ενισχυμένου ελάσματος.

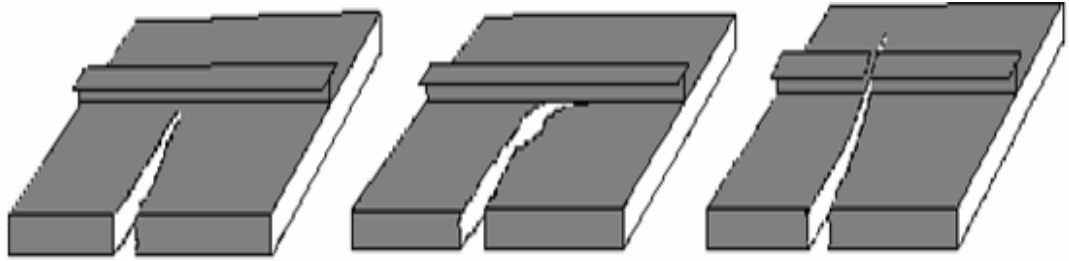
Στην περίπτωση συγκολλητών ή εξελασμένων ενισχυτικών η διάδοση της ρωγμής μπορεί να γίνει κατά τρεις διευθύνσεις: κάθετα, οριζόντια ή υπό γωνία, (Paik et al., [28]), Σχήμα 3-11.



Σχήμα 3-11: Τρία είδη προσανατολισμού των ρωγμών ως προς τα ενισχυτικά. Ρωγμές κάθετες, οριζόντιες και υπό γωνία

Τα διάφορα χαρακτηριστικά στοιχεία των ενισχυτικών, όπως οι διαστάσεις τους, η μορφή τους, η διάταξή τους και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με την κατεύθυνση διάδοσης των ρωγμών, αποτελούν βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν, σε συνάρτηση με το είδος και την ένταση της επιβαλλόμενης φόρτισης, κατά σύνθετο τρόπο τη συμπεριφορά των ρωγμών. Όμως, είναι ακόμη άγνωστο η δράση ποιας παραμέτρου κατά τη σχεδίαση (αντοχή της συγκόλλησης, το πάχος του γυμνού ελάσματος σε σχέση με το πάχος του ενισχυτικού, το ύψος του ενισχυτικού, ο διαχωρισμός (υποδιαίρεση) της γάστρας) επηρεάζει τη συμπεριφορά της ρωγμής.

Όσον αφορά στα συγκολλητά και τα εξελασμένα ενισχυτικά, παρατηρούνται τρία διαφορετικά μοντέλα συμπεριφοράς των ρωγμών οι οποίες είναι προσανατολισμένες κάθετα σε σχέση με τα ενισχυτικά, Σχήμα 3-12. Η πρώτη περίπτωση είναι το ενισχυτικό να σταματήσει τη διάδοση της ρωγμής και να οδηγήσει στην οριστική σύλληψή της. Η δεύτερη περίπτωση είναι να αλλάξει κατεύθυνση διάδοσης η ρωγμή εξαιτίας της παρουσίας του ενισχυτικού και να συνεχίσει την πορεία της παράλληλα με το ενισχυτικό χωρίς να το διαπεράσει. Τέλος, η τρίτη περίπτωση είναι η ρωγμή να υπερνικήσει το ενισχυτικό και να το διαπεράσει κάθετα, συνεχίζοντας από την άλλη πλευρά του ενισχυτικού την πορεία της στο έλασμα. Η ρωγμή θα διαπεράσει το ενισχυτικό με περίπου την ίδια ταχύτητα με το έλασμα, [11]. Σε αυτήν την περίπτωση, έχουμε πλήρη αστοχία του ενισχυτικού και οι τάσεις μεταφέρονται στην υπολοιπούμενη πλάκα.



Σχήμα 3-12: Η συμπεριφορά των ρωγμών ως προς τα ενισχυτικά. Σύλληψη της ρωγμής από το ενισχυτικό (αριστερά), η ρωγμή αλλάζει κατεύθυνση (κέντρο), η ρωγμή διαπερνά το ενισχυτικό (δεξιά), [11]

Σύμφωνα με τους Dexter and Pilarski [30, 31], οι ρωγμές σε συγκολλητά ενισχυμένα ελάσματα διαδίδονται με σταθερό τρόπο και οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τη διάδοσή τους είναι οι παραμένουσες τάσεις της συγκόλλησης, η ύπαρξη ή μη μετωπικών συγκολλήσεων (butt welds) και οπών (drain holes) στα ενισχυτικά. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν πολύ περισσότερο τον τρόπο διάδοσης της ρωγμής, από ότι το είδος του μετάλλου που θα χρησιμοποιηθεί.

Σε ενισχυμένα ελάσματα έχει αποδειχθεί ότι οι παραμένουσες τάσεις της συγκόλλησης προκαλούν υψηλές εφελκυστικές τάσεις στην περιοχή κοντά στη συγκόλληση (στη βάση του ενισχυτικού) και θλιπτικές τάσεις μικρότερου μεγέθους στην περιοχή μεταξύ των ενισχυτικών. Έτσι, αυτές οι τάσεις προκαλούν αύξηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής κοντά στο ενισχυτικό, και μείωση μεταξύ των ενισχυτικών. Επίσης, όσον αφορά κατασκευαστικές διαμορφώσεις των ενισχυτικών όπως οπές (drain holes), αποδείχθηκε ότι δεν εμποδίζουν σημαντικά τη διάδοση της ρωγμής, σε σύγκριση με τα ενισχυτικά χωρίς ανοίγματα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η στιβαρότητα του ελάσματος της γειτονικής περιοχής της ρωγμής μειώνεται καθώς η ρωγμή διαδίδεται μέσα σε αυτό, ενώ ταυτόχρονα ο ρυθμός διάδοσής της γίνεται μικρότερος. Η συμπεριφορά αυτή είναι γνωστή και ως “load shedding” και μπορεί να προκαλέσει μείωση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής σε ενισχυμένα ελάσματα, σε αντίθεση με μη ενισχυμένα ελάσματα. Ο ρόλος της ολκιμότητας, επίσης, είναι πολύ σημαντικός, διότι καθώς η ρωγμή διαπερνά το

έλασμα μειώνεται η επάρκειά του σε αντοχή. Εάν, όμως, ένα στοιχείο του ελάσματος είναι επαρκώς όλκιμο, μπορεί να δεχθεί ρωγμές αρκετά μεγάλες, έτσι ώστε το εξασκώμενο φορτίο να ξεπεράσει την ονομαστική και αναμενόμενη τάση διαρροής του ελάσματος και να επέλθει πλαστικός λυγισμός στο επόμενο στοιχείο του ελάσματος.

Όσον αφορά στη διαμόρφωση των ενισχυτικών, πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σε ελάσματα με ενισχυτικά τύπου T και βολβολάμας, απέδειξαν πως ο τύπος του ενισχυτικού δεν επηρεάζει σημαντικά τη διάδοση της ρωγμής σε αυτά.

Συνήθως, υποτίθεται ότι η πορεία των ρωγμών είναι γνωστή ή αναμενόμενη είτε από τις θεωρητικές εκτιμήσεις είτε από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, αλλά παρ' όλες τις έρευνες μέχρι σήμερα, οι παράγοντες που ελέγχουν και καθορίζουν την πορεία που ακολουθείται από μια ρωγμή δεν είναι ακόμα εντελώς κατανοητοί. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει συμφωνία μεταξύ των θεωρητικά προβλεπόμενων και πειραματικά καθορισμένων κατευθύνσεων της πορείας των ρωγμών, γεγονός που κάνει το έργο της πρόβλεψης της διάδοσης των ρωγμών ακόμα πιο περίπλοκο.

3.11.6 Μέθοδοι πρόληψης και επισκευής ρωγμών

Η επισκευή των ρωγμών είναι βασικό θέμα που αφορά στην πρόληψη της διάδοσης των ρωγμών μιας κατασκευής, οι οποίες ενδεχομένως να αποτελέσουν κίνδυνο για την επιβιωσιμότητά της. Η επισκευή μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, από την τοποθέτηση απλών επιθεμάτων, έως τον πλήρη τοπικό επανασχεδιασμό της κατασκευής στην περιοχή της ζημιάς. Πολλές φορές οι ρωγμές συγκολλούνται, αλλά συχνά επαναλαμβάνεται η ίδια μορφή ζημιάς. Επίσης, μπορεί να γίνει και τοποθέτηση ενισχύσεων, έτσι ώστε να αποφευχθεί περαιτέρω διάδοση της ρωγμής

Λόγω του υψηλού κόστους που απαιτούν, κάποιες ριζικές και ακριβές μέθοδοι επισκευών αποφεύγονται από τον πλοιοκτήτη, ο οποίος επιδιώκει βέλτιστο τρόπο επισκευής από πλευράς κόστους και διάρκειας. Δεν προτιμούνται, όμως, ούτε οι πιο απλές μέθοδοι, λόγω της πιθανής επανάληψης της ζημιάς στο μέλλον. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για κάθε περίπτωση χρειάζεται πείρα και κατανόηση της προέλευσης της ζημιάς, καθώς και της απόκρισης της κατασκευής σε τοπικό επίπεδο.

Επίσης, εξαρτάται και από τη θέση της ρωγμής και την αναμενόμενη υπόλοιπη διάρκεια ζωής του πλοίου.

Οι ρωγμές σε στοιχεία της πρωτεύουσας κατασκευής (primary structure), η οποία συμβάλλει στη διαμήκη αντοχή του πλοίου, όπως για παράδειγμα τα ελάσματα και τα ενισχυτικά των κύριων καταστρωμάτων, μπορούν να επισκευασθούν προσωρινά με τοποθέτηση επιθεμάτων ή με αφαίρεση του υλικού και συγκόλληση στην περιοχή της ρωγμής. Συνήθως, όμως, η αντοχή της κατασκευής μετά από μια τέτοια επισκευή είναι μειωμένη σε σχέση με την αρχική της κατάσταση και η επισκευασμένη συγκόλληση μπορεί να δημιουργήσει νέες πηγές ρωγμών.

Από την άλλη πλευρά, η επέκταση των ρωγμών που συναντώνται στη δευτερεύουσα κατασκευή (η οποία δε συμβάλλει στην αντοχή του πλοίου στο σύνολό του, αλλά ούτε και στη στεγανότητα των διαφόρων χώρων, όπως οι φρακτές) μπορεί να περιορισθεί προσωρινά με άνοιγμα οπών που έχουν διάμετρο ίση με το πάχος του συγκεκριμένου ελάσματος, σε μία απόσταση ίση με το διπλάσιο του πάχους του ελάσματος από το ορατό άκρο της ρωγμής κατά μήκος του άξονα της αναμενόμενης επέκτασης της ρωγμής.

Παρακάτω γίνεται αναφορά στους βασικότερους τρόπους επισκευής ρωγμών σε μια μεταλλική κατασκευή:

1. Άνοιγμα οπής πέραν του άκρου της ρωγμής (προσωρινή επισκευή)

Η μετάδοση των ρωγμών μπορεί να «αναχαιτισθεί» προσωρινά με το άνοιγμα οπής με διάμετρο ίση με το πάχος του ελάσματος, σε απόσταση διπλάσια του πάχους από το ορατό άκρο της ρωγμής και κατά μήκος της αναμενόμενης κατεύθυνσης επέκτασης της ρωγμής. Τέτοιες επισκευές γίνονται για να μπορέσει το πλοίο να φθάσει σε χώρο όπου θα γίνει πλήρης αποκατάσταση της ζημιάς. Μπορεί, επίσης, να γίνει σε περιοχές της δευτερεύουσας κατασκευής που δε συμβάλλουν στη διαμήκη αντοχή, όπως οι φρακτές και διάφορα καταστρώματα.

2. Συγκόλληση της ρωγμής

Η αφαίρεση υλικού στην περιοχή της ρωγμής και η συγκόλλησή της είναι μία σχετικά εύκολη και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Η αντοχή, όμως, της κατασκευής στην περιοχή τέτοιων επισκευών είναι κατά κανόνα μικρότερη της αρχικής. Η

επισκευασμένη ρωγμή θα αποτελέσει εστία γένεσης νέων ρωγμών που θα παρουσιασθούν σύντομα.

3. Συγκόλληση της ρωγμής με τρόχισμα της συγκόλλησης

Η επισκευή αυτή δε διαφέρει ουσιαστικά από την προηγούμενη, εκτός του ότι η συγκόλληση τροχίζεται ώστε να είναι λεία. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της κοπωτικής αντοχής της. Έχει βρεθεί ότι με αυτόν τον τρόπο η διάρκεια ζωής της επισκευής αυξάνεται σημαντικά.

4. Μετατροπή της κατασκευής με πρόσθεση αγκώνα, ενισχυτικού ή επιθέματος

Ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος επισκευής μίας ρωγμής είναι η αλλαγή της μορφολογίας της κατασκευής σε τοπικό επίπεδο, έτσι ώστε να ελαττωθούν οι συγκεντρώσεις τάσεων. Η προσθήκη ενός νέου στοιχείου, χωρίς την αφαίρεση υπάρχοντος τμήματος της κατασκευής, μπορεί να είναι ο καλύτερος τρόπος επισκευής, διότι περιορίζονται οι συγκεντρώσεις τάσεων αυξάνοντας σε σημαντικό βαθμό την κοπωτική ζωή της κατασκευής.

5. Αλλαγή της διάταξης της κατασκευής σε τοπικό επίπεδο

Αλλαγές της διάταξης της κατασκευής επιτυγχάνονται με διαμόρφωση των άκρων των αγκώνων, αύξηση της ακτίνας, αύξηση των ανοιγμάτων κ.α. Ο τρόπος αυτός επίσης αποβλέπει στον περιορισμό των συγκεντρώσεων τάσεων και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη εάν απαιτείται επέκταση της διάρκειας ζωής του πλοίου.

6. Αύξηση των διαστάσεων (κατά το εμβαδόν ή το πάχος)

Η αύξηση των διαστάσεων ενός στοιχείου της κατασκευής (μπρακέτο) κρίνεται γενικά ως μία καλή μέθοδος, όμως η αύξηση του πάχους μπορεί να επιφέρει νέα προβλήματα εάν δημιουργηθεί ασυνέχεια στο έλασμα, τμήμα του οποίου αντικαθίσταται. Σε αυτή την περίπτωση, η ασυνέχεια θα πρέπει να προκύψει σε περιοχή μακριά της συγκέντρωσης τάσεων.

3.12 Η Επιλογή και η Χρήση των Ενισχυτικών στη Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου

3.12.1 Τύποι ενισχυτικών στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου

Η κατασκευαστική δομή των πλοίων μπορεί να θεωρηθεί ως μια πολύπλοκη και σύνθετη κατασκευή, η οποία αποτελείται από ένα άθροισμα συνεχών και ενισχυμένων ελασμάτων με διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά, τοποθετημένα περίπου σε ίση απόσταση μεταξύ τους, ανάλογα με το σύστημα ενίσχυσης που ακολουθείται.

Ο συνδυασμός ελάσματος-ενισχυτικού είναι ο βασικότερος κατασκευαστικός τύπος μιας ναυπηγικής κατασκευής, ώστε αυτή να αντέχει τις τοπικές και ολικές φορτίσεις. Η απλούστερη μορφή αυτού του τύπου είναι μία απλή δοκός προσαρμοσμένη σε μία πλάκα. Πολλοί παράλληλοι δοκοί που στηρίζουν μια πλάκα αποτελούν ένα πλέγμα με μονοκατευθυνσιακή ενίσχυση. Δοκοί οι οποίες διασταυρώνονται σε ορθές γωνίες αποτελούν ένα ορθογώνια ενισχυμένο πλέγμα. Αυτές οι διάφορες μονάδες μπορεί αρχικά να είναι επίπεδες ή καμπύλες, φορτισμένες κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση και διαθέτουν μια ποικιλία σχημάτων και συνοριακών συνθηκών.

Τα ελάσματα του πλοίου ενισχύονται με δοκούς, έτσι ώστε να αποκτήσει μεγαλύτερη ακαμψία και να αυξηθεί η αντοχή στις κάθετα προς το επίπεδο του ελάσματος φορτίσεις και να αποφευχθεί ο λυγισμός του ελάσματος.

Πρέπει να σημειωθεί, πως η αύξηση του πάχους του ελάσματος είναι πολύ λιγότερο αποδοτική από τη χρήση αντίστοιχου ενισχυμένου ελάσματος, λόγω της συγκριτικά μεγαλύτερης αύξησης του βάρους της κατασκευής. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η χρήση ενισχυτικών είναι η απλούστερη και οικονομικότερη λύση.

Τα ναυπηγικά ελάσματα κατά κανόνα ενισχύονται με τις παρακάτω ανοικτές λεπτότοιχες διατομές :

- Απλές λάμες.
- Ανισοσκελείς διατομές.
- Βολβολάμες.
- Συναρμοσμένες διατομές

και φέρουν ομοεπίπεδες ή και κάθετες φορτίσεις οι οποίες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε κατανεμημένες ή σημειακές.

Για να μελετηθεί σωστά τη συμπεριφορά των ενισχυμένων ελασμάτων χρησιμοποιούνται μέθοδοι που μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε τα φορτία αστοχίας για διάφορες περιπτώσεις. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ελασμάτων σε ολόκληρο το πεδίο φόρτισης και που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι :

- Η γεωμετρία και οι διαστάσεις της διατομής.
- Η φορά της φόρτισης.
- Ο τρόπος στήριξης της κατασκευής.
- Οι ιδιότητες και η ποιότητα του υλικού κατασκευής.
- Η φύση και τα μεγέθη των αρχικών ατελειών (μετατοπίσεων και παραμενουσών τάσεων).

Έμφαση πρέπει να δοθεί στις αρχικές ατέλειες που μπορεί να υπάρχουν στο έλασμα και στο ενισχυτικό, ή και μεταξύ τους. Αυτές οι ατέλειες μπορεί να συμβάλλουν στην πρόωρη αστοχία μιας μεταλλικής κατασκευής, και θα αναλυθούν περισσότερο παρακάτω.

3.12.2 Τα συστήματα ενίσχυσης της γάστρας του πλοίου

Τα συστήματα ενίσχυσης των συμβατικών ναυπηγικών κατασκευών είναι το διάμηκες, το εγκάρσιο και το μικτό. Έχει μεγάλη σημασία να εξετασθεί η επάρκεια της αντοχής των τμημάτων της μεταλλικής κατασκευής στις διάφορες καταστάσεις φόρτισης. Ένα έλασμα συνήθως δε φέρει φορτίο σε μία μόνο κατεύθυνση, αλλά σε διάφορες κατευθύνσεις, γεγονός που κάνει την επιλογή του συστήματος ενίσχυσης πολυσύνθετο πρόβλημα.

Στη μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης στα καταστρώματα και τον πυθμένα, εφόσον οι κύριες φορτίσεις σε αυτά τα σημεία οφείλονται σε ορθές τάσεις που μπορούν να προκαλέσουν λυγισμό, και εγκάρσιο για τις πλευρές του πλοίου, όπου η φόρτιση δρα κάθετα στο επίπεδο του ελάσματος. Στα σύγχρονα εμπορικά και επιβατηγά πλοία ακολουθείται αυτή

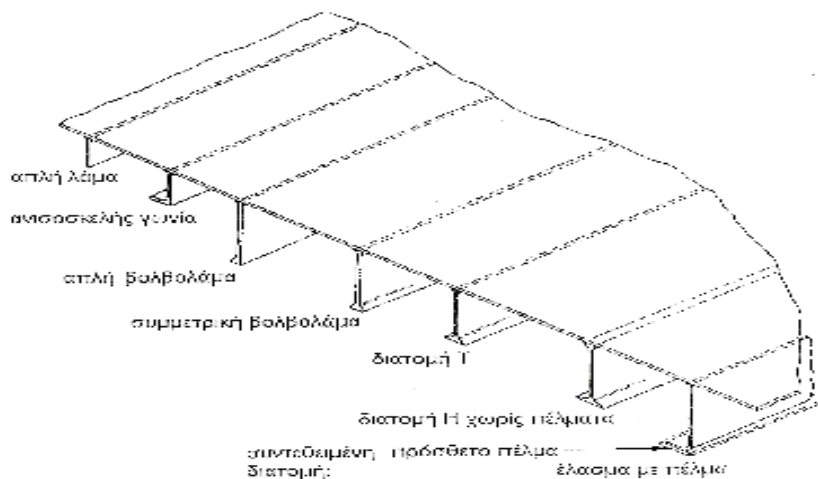
η μέθοδος, ενώ στα πολεμικά πλοία, επειδή το κύριο κριτήριο σχεδιασμού είναι το ελάχιστο βάρος, χρησιμοποιείται παντού το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης.

Τα τελευταία χρόνια, έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται το μονοαξονικό σύστημα ενίσχυσης, δηλαδή εφαρμογή ενισχυτικών προς μία μόνο κατεύθυνση, με σκοπό τη μείωση του κόστους ανέγερσης. Αυτό το σύστημα μπορεί να εφαρμοσθεί σε πλοία με απλές διατάξεις, όπως είναι τα δεξαμενόπλοια και τα φορτηγά ξηρού φορτίου χύδην. Η αντοχή της κατασκευής εξαρτάται εξολοκλήρου από τα διαμήκη στοιχεία και έτσι μειώνονται οι συγκεντρώσεις τάσεων και το κόστος συντήρησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διατομές των εξελασμένων ενισχυτικών που χρησιμοποιούνται για την πρωτεύουσα ενίσχυση (εξωτερικό περίβλημα, καταστρώματα, πυθμένας) της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου:

- Απλή λάμα
- Ανισοσκελής γωνία
- Απλή βολβολάμα
- Συμμετρική βολβολάμα
- Διατομή T
- Διατομή H χωρίς πέλματα,

οι οποίες παρουσιάζονται και στο παρακάτω Σχήμα 3-13.



Σχήμα 3-13: Οι βασικότερες διατομές ενισχυτικών που χρησιμοποιούνται σήμερα σε ναυπηγικές κατασκευές

Εκτός από εξελασμένα (χυτά) ενισχυτικά, χρησιμοποιούνται και διατάξεις συγκολλητών ενισχυτικών, κυρίως διατομής T, που προσδίδουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη από τις απλές βολβολάμες και τις ανισοσκελείς δοκούς, λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζουν.

Εκτός από τα βασικά κριτήρια επιλογής του τύπου του ενισχυτικού πρέπει να γίνει και σωστή επιλογή των διαστάσεών τους. Με βάση τις απαιτήσεις του Νηογνώμονα, και αφού καθοριστεί η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης της διατομής του ενισχυτικού, γίνεται η επιλογή των διαστάσεων των συμμετρικών ή μη διατομών.

3.12.3 Σχέση και αλληλεπίδραση ελάσματος – ενισχυτικού

Ο καθορισμός των σχέσεων αλληλεπίδρασης ελάσματος – ενισχυτικού στη μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα, καθώς οι σχέσεις αυτές εξαρτώνται από τη γεωμετρία του ενισχυτικού και του ελάσματος, τις οριακές συνθήκες, το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου, και άλλους παράγοντες. Είναι πολύ σημαντικό, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του ενισχυτικού πάνω στο έλασμα να γίνει, έτσι ώστε αυτό να δέχεται τις μέγιστες φορτίσεις πριν αυτές περάσουν στο έλασμα και η διατομή φτάσει στο όριο αντοχής της. Εάν, όμως, η αντοχή λυγισμού του ενισχυτικού είναι μεγαλύτερη από αυτή του ελάσματος, τότε το πιο πιθανό σενάριο είναι τα φορτία να περάσουν πρώτα στο έλασμα, το οποίο θα αστοχήσει, και στη συνέχεια στο ενισχυτικό. Το σημαντικό από εκείνο το σημείο και μετά είναι αν το ενισχυτικό είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορέσει να παραλάβει αυτό το πρόσθετο φορτίο, και να αποφευχθεί η αστοχία ολόκληρης της διατομής.

Η πολυπλοκότητα της συμπεριφοράς των ελασμάτων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου ωθεί τον μελετητή να αναζητήσει λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόκρισή τους. Μια σημαντική αρχική απλούστευση του προβλήματος γίνεται με τη θεώρηση του ενισχυμένου ελάσματος ως δοκού-κολόνας. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, η διαρροή αρχίζει από τα άκρα του ελάσματος, όπου στη συνέχεια αναπτύσσονται πλαστικές αρθρώσεις, οι οποίες μεταδίδονται προς το κέντρο του ελάσματος, με τελικό αποτέλεσμα την πλαστικοποίηση και κατάρρευση της διατομής.

Η απλουστευμένη αυτή παραδοχή, όμως, παρέχει λύσεις μόνο στις περιπτώσεις ολικού λυγισμού και όχι στην περίπτωση τοπικών αστοχιών των στοιχείων του ενισχυμένου ελάσματος.

3.12.3.1 Ενισχυμένο έλασμα υπό καμπτικές φορτίσεις

Όταν ένα έλασμα με ενισχυτικά υπόκειται σε καμπτική φόρτιση αναπτύσσονται και στα δύο στοιχεία καμπτικές τάσεις. Ένα τμήμα της φόρτισης παραλαμβάνεται από τα ενισχυτικά, έτσι ώστε η κατασκευή να δέχεται λιγότερες φορτίσεις και να είναι λιγότερο πιθανό να οδηγηθεί σε αστοχία.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η αντοχή ενός ενισχυτικού μειώνεται σημαντικά στην περίπτωση που η κατασκευή έχει υποστεί φθορά λόγω διάβρωσης, εφόσον εξ' ορισμού προκαλεί ελάττωση του πάχους της κατασκευής. Έτσι, για το ίδιο καμπτικό φορτίο, το έλασμα δέχεται μεγαλύτερες μετατοπίσεις και μπορεί πιο γρήγορα να φτάσει η κατασκευή στο κρίσιμο όριό της. Επίσης, το ίδιο συμβαίνει και εξαιτίας της επίδρασης της κόπωσης στην κατασκευή και των μόνιμων παραμορφώσεων που προκαλούν οι επαναλαμβανόμενες φορτίσεις στα ενισχυτικά. Οι μόνιμες παραμορφώσεις αυξάνουν κατά πολύ την πιθανότητα να προκύψει ρωγμή στο έλασμα, γεγονός που μπορεί να αποβεί μοιραίο για την κατασκευή.

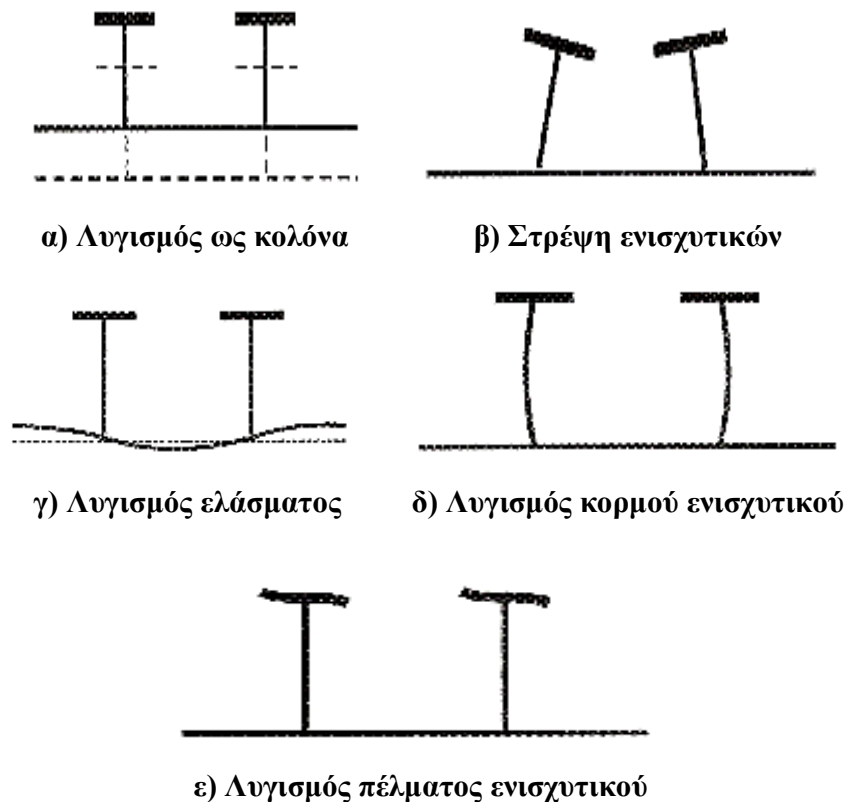
Είναι φανερό ότι η χειροτέρευση της κατάστασης της μεταλλικής κατασκευής δεν αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο, αλλά με αυξανόμενους ρυθμούς. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι χρειάζεται συνεχής και προσεκτική συντήρηση για να διατηρείται σε αποδεκτό επίπεδο η κατασκευή, ώστε να αποφευχθούν τα παραπάνω φαινόμενα, καθώς και το δυσανάλογο υψηλό κόστος των απαιτούμενων επισκευών στη συνέχεια.

3.12.3.2 Ενισχυμένο έλασμα υπό θλιπτικές φορτίσεις

Όπως και στην περίπτωση καμπτικών φορτίσεων, έτσι και στις θλιπτικές φορτίσεις όταν ένα έλασμα φέρει ενισχυτικά, αυξάνεται σημαντικά η αντοχή του σε θλίψη. Ειδικότερα στην περίπτωση θλίψης, όταν τα ενισχυτικά είναι παράλληλα με την επιβαλλόμενη φόρτιση, η αντοχή του ελάσματος αυξάνεται ακόμα περισσότερο, σε σχέση με την περίπτωση ενισχυτικών κάθετων στη φόρτιση. Για αυτόν ακριβώς το λόγο η διαμήκης ενίσχυση είναι από πλευράς αντοχής η αποδοτικότερη μέθοδος και για αυτό

εφαρμόζεται σε μεγάλα πλοία. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι κατά την κατάρρευση ενός ενισχυμένου ελάσματος, η συμβολή του στην αντοχή της διατομής εξαρτάται από την ικανότητα παραλαβής πρόσθετων φορτίων του ενισχυτικού και όχι στη μεταφορική του ικανότητα.

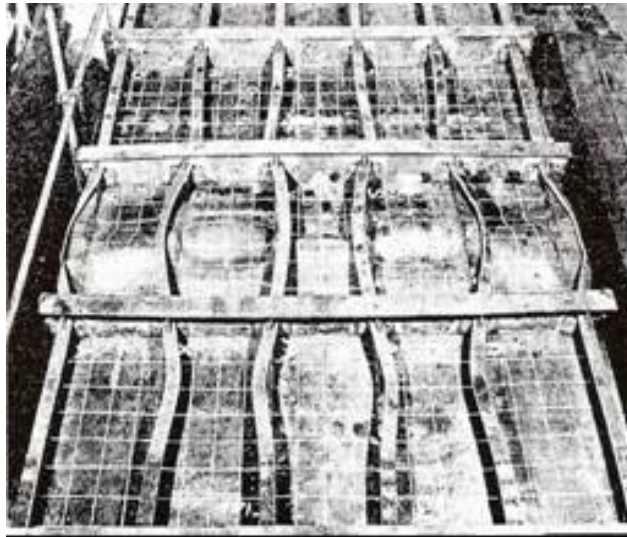
Στο παρακάτω Σχήμα 3-14 φαίνονται διάφοροι τύποι αστοχίας ενισχυμένων ελασμάτων, όπου η αστοχία συμβαίνει είτε στο έλασμα, είτε στο ενισχυτικό.



Σχήμα 3-14: Μορφές αστοχίας σε ενισχυμένα ελάσματα

Στις περιπτώσεις (α) και (β) του Σχήματος 3-14, η αστοχία περιλαμβάνει και τα δύο στοιχεία της κατασκευής και καλείται πρωτεύουσα ή κύρια αστοχία. Όταν η αστοχία περιορίζεται σε τμήμα στοιχείου, όπως στις περιπτώσεις (γ), (δ) και (ε) του ίδιου σχήματος, τότε καλείται δευτερεύουσα. Η δευτερεύουσα αστοχία δεν προκαλεί ολική κατάρρευση της κατασκευής, αλλά, αν προηγηθεί της πρωτεύουσας, μειώνεται το φορτίο τελικής κατάρρευσης.

Στην Εικόνα 3-2, φαίνεται ένα παράδειγμα ορθογώνιου συστήματος ενίσχυσης που έχει υποστεί ελαστοπλαστική κατάρρευση λόγω μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης. Η κατασκευή, όπως φαίνεται είναι σε οριακή κατάσταση και είναι πλέον πολύ πιθανό να προκύψουν ρωγμές απο τοπικές αστοχίες που, αν προχωρήσουν, μπορεί να οδηγήσουν μέχρι και σε αποκοπή της κατασκευής σε δύο τμήματα. Ένα παράδειγμα τέτοιου είδους κατάρρευσης και κοπής της κατασκευής του πλοίου σε δύο τμήματα είναι η βύθιση του Δ/Ξ Κατίνα Π, σε συνθήκες σφοδρής θαλασσοταραχής. Στην Εικόνα 3-3, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κατάρρευσης ενισχυμένου ελάσματος υπό θλιπτική μονοαξονική φόρτιση.



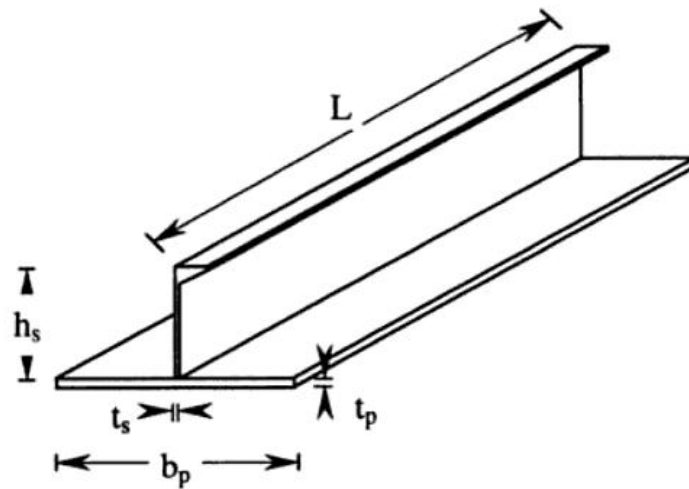
Εικόνα 3-2: Ελαστοπλαστικός λυγισμός και κατάρρευση ενισχυμένου ελάσματος υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση



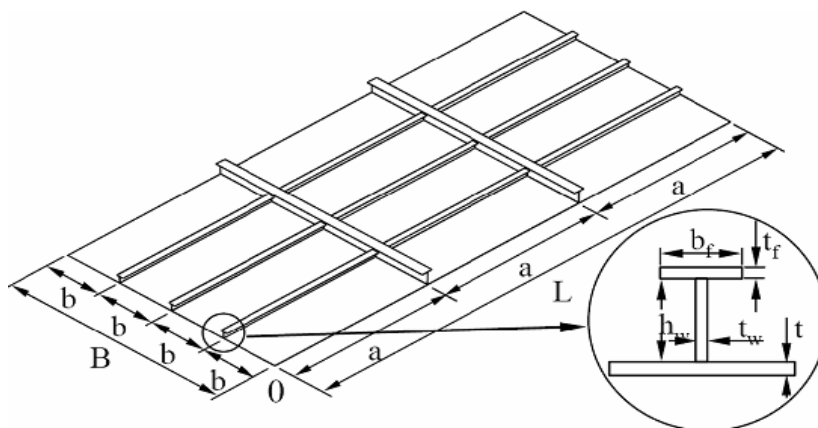
Εικόνα 3-3: Κοπή σε δύο τμήματα και βύθιση του Δ/Ξ Κατίνα

3.12.4 Οι τύποι ενισχυτικών που εξετάστηκαν

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκε η διάδοση της θραύσης σε δοκίμια κράματος αλουμινίου 1561 με ακραία αρχική διαμπερή ρωγή στα οποία υπήρχαν εξελασμένα ενισχυτικά βολβολάμας (Σχήμα 3-15) και έγινε σύγκριση με πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκίμια με εξελασμένα ενισχυτικά «τύπου T» [8], (Σχήμα 3-16).



Σχήμα 3-15: Τυπική κατασκευαστική διαμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος πλοίου με ενισχυτικό τύπου βολβολάμας.



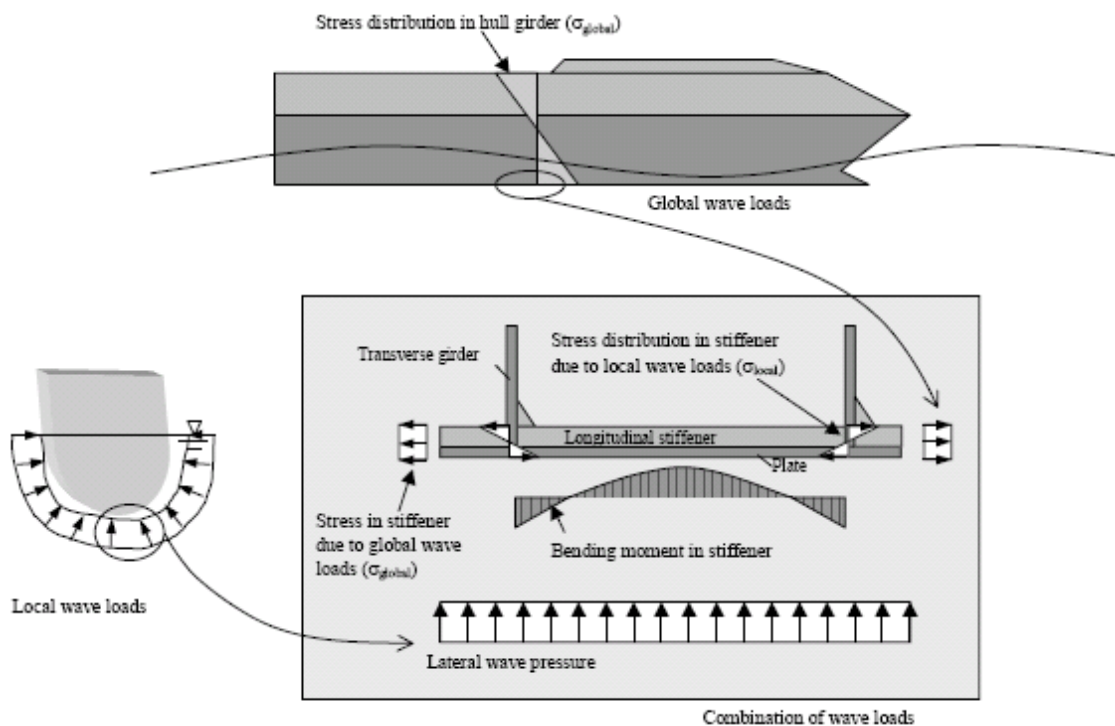
Σχήμα 3-16: Τυπική κατασκευαστική διαμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος με ενισχυτικό «τύπου T»

3.12.5 Συμπεριφορά αλουμινένιων ενισχυμένων ελασμάτων

Σε προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε αναλυτική αναφορά των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η κατασκευή πλοίων από κράματα αλουμινίου, σε σχέση με τις χαλύβδινες κατασκευές. Όπως είναι λογικό, η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο υλικών σε θραύση είναι ένα εύλογο πρόβλημα που πρέπει να εξετασθεί. Στόχος είναι να αναπτυχθούν και να εφαρμοσθούν νέες μέθοδοι για τον έλεγχο της θραύσης των κατασκευών από αλουμίνιο, καθώς και να δημιουργηθούν νέες βελτιστοποιημένες ναυπηγικές κατασκευές με αυξημένη αντοχή σε θραύση.

Τα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων από κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται, όπως και τα χαλύβδινα, σε ποικίλες ναυπηγικές κατασκευές ως κύρια κατασκευαστικά στοιχεία. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα χαλύβδινα ελάσματα λόγω του υψηλού λόγου αντοχής/βάρος και την ανθεκτικότητά τους, καθώς και για την πολύ καλή αντίσταση σε διάβρωση που τα χαρακτηρίζει. Ο συνδυασμός αυτών των ιδιοτήτων, μαζί με την υψηλή αντίσταση σε λυγισμό και σε καμπτικά φορτία, κάνουν την εφαρμογή ενισχυμένων ελασμάτων κραμάτων αλουμινίου στα πλοία ολοένα και πιο ελκυστική.

Στο Σχήμα 3-17, φαίνονται οι υψηλές καμπτικές φορτίσεις που αναπτύσσονται στα ενισχυμένα διαμήκη ελάσματα ενός πλοίου από κράμα αλουμινίου, στη συγκεκριμένη περίπτωση καταμαράν, σε μία κατάσταση φόρτωσής του [19].



Σχήμα 3-17: Ασκούμενα φορτία και τάσεις σε πλοίο τύπου καταμαράν από κράμα αλουμινίου

Μέχρι σήμερα, οι περισσότεροι κανονισμοί που αφορούν ενισχυμένα ελάσματα κραμάτων αλουμινίου στηρίζονται κυρίως στην υπάρχουσα εμπειρία από τις χαλύβδινες κατασκευές. Αυτό δεν είναι πάντοτε σωστό, διότι τα δύο υλικά έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, οπότε οι προσεγγίσεις αυτές μπορεί να είναι αβέβαιες και να οδηγήσουν στην εξαγωγή λάθος συμπερασμάτων.

Στη σημερινή εποχή, υπάρχει διαθέσιμη ποικιλία μεθόδων και υπολογιστικών κωδικών και μοντέλων για την ανάλυση της μέγιστης αντοχής των ενισχυμένων ελασμάτων από τα οποία αποτελούνται. Οι μέθοδοι αυτοί κυμαίνονται από απλά μοντέλα και τύπους, έως τις πιο περίπλοκες αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες ξεφεύγουν από τα όρια που θα εξετασθούν στην παρούσα εργασία.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

4.1 Σκοπός Πειραματικής Διαδικασίας

Η εξέταση της διάδοσης των ρωγμών σε ναυπηγικές κατασκευές αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, καθώς το φαινόμενο αυτό μπορεί να εμφανιστεί σε πολλές κλίμακες μεγέθους από εμφάνιση μικροσκοπικών κενών στη μεταλλική κατασκευή, τη δημιουργία μεγάλων ρωγμών, μέχρι και τη θραύση ναυπηγικών κατασκευών εξ' αιτίας της ύπαρξης αρχικής ρωγμής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εξετάστηκε η θραύση αλουμινένιων δοκιμίων, ενισχυμένων και μη, με προϋπάρχουσα ρωγμή με στόχο να ληφθούν και να αξιολογηθούν τα πειραματικά δεδομένα, έτσι ώστε να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για τις ναυπηγικές κατασκευές από αλουμίνιο. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είχε σκοπό τον προσδιορισμό και την ποιοτική ανάλυση των κανόνων που διέπουν τη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών και την εξέταση της έναρξης, διάδοσης και σύλληψης ρωγμών σε αυτές.

Έτσι, γίνεται γνωστό το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας των ρωγμών και γίνεται ταξινόμηση των ρωγμών ανάλογα με το πόσο γρήγορα διαδίδονται και το πόσο επικίνδυνες είναι για την κατασκευή. Κατ'επέκταση, μπορούμε να πούμε πως, γνωρίζοντας τον τρόπο διάδοσης των ρωγμών σε κάθε δοκίμιο -και φαινομενικά σε μια ναυπηγική κατασκευή- μπορεί να γίνει πρόβλεψη της θραύσης, δηλαδή της αστοχίας τους, γεγονός απαραίτητο και πολύ σημαντικό στη ναυπηγική.

Προκειμένου να μελετηθεί αποτελεσματικά και διεξοδικά το φαινόμενο αυτό μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων, έπρεπε να ληφθούν υπόψη και να μελετηθούν πολλοί παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση του πειράματος και στη λήψη των αποτελεσμάτων. Τέτοιοι παράγοντες είναι το κόστος των υλικών που εξετάστηκαν, ο χρόνος διεξαγωγής των πειραμάτων, και η σωστή χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού, οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα, κ.α.

Στο πειραματικό πρόγραμμα που εκπονήθηκε, πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών εφέλκυσμού σε σειρές αλουμινένιων δοκιμίων ποικίλων διατάξεων και διαφορετικής γεωμετρίας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την επιτυχή διεξαγωγή των πειραμάτων εμπεριέχει τη σωστή επιλογή του υπό εξέταση κατασκευαστικού υλικού, τα

χαρακτηριστικά του, την κατάλληλη διαμόρφωση των δοκιμίων, την προετοιμασία και μηχανουργική επεξεργασία τους, τα χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων (αν υπάρχουν), τη σωστή χρήση των πειραματικών διατάξεων, τον έλεγχο των υπαρχουσών συνθηκών, τα χαρακτηριστικά των φορτίσεων που επιβλήθηκαν, την προσεκτική παρατήρηση των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και, τέλος, την προσεκτική λήψη, καταγραφή, επεξεργασία και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Επίσης, εξετάστηκαν οι παράγοντες που συνέβαλαν στη διάδοση των προϋπαρχουσών ρωγμών των ενισχυμένων και μη δοκιμίων, όπως οι ιδιότητες του υλικού, η διαμόρφωση του δοκιμίου, το είδος και το μέγεθος της επιβαλλόμενης φόρτισης, οι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπως η περιοχή της συγκόλλησης, καθώς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, κ.α.

Η ύπαρξη ρωγμών αποτελεί τη σημαντικότερη αιτία αστοχίας της μεταλλικής κατασκευής μιας ναυπηγικής κατασκευής. Είναι πολύ σημαντικό, όμως, να γίνεται σωστή αξιολόγηση των υπαρχουσών ρωγμών σε μια ναυπηγική κατασκευή, για να αναγνωρίζονται οι ρωγμές που βρίσκονται σε επικίνδυνες περιοχές της κατασκευής. Τέτοιες μπορεί να είναι περιοχές υψηλών φορτίσεων, περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, περιοχές που έχουν υποστεί σημαντική διάβρωση, κ.α. Αφού αναγνωριστούν οι επικίνδυνες περιοχές μπορεί να καθοριστεί ποιες ρωγμές αποτελούν κίνδυνο για την κατασκευή, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για την επισκευή της περιοχής και προληπτικά μέτρα για μελλοντικές όμοιες κατασκευές.

4.2 Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας

Ο σχεδιασμός των πειραμάτων είναι μια πολυσύνθετη διαδικασία, κατά την οποία προσδιορίζονται οι σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών και ανεξάρτητων μεταβλητών, με στόχο να λάβουμε όσο το δυνατόν πιο έγκυρα και ακριβή αποτελέσματα.

Είναι γνωστό, ότι κάθε πειραματική μελέτη εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, οι οποίοι όμως είναι πολύ δύσκολο να ληφθούν όλοι υπόψη κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Είναι σαφές, ότι μια πειραματική διαδικασία που θα συμπεριλαμβάνει μια πλήρη και πολυάριθμη ομάδα δοκιμίων για την απόλυτα ακριβή αξιολόγηση όλων των επιδράσεων των μεταβλητών στα πειραματικά αποτελέσματα, θα ήταν αναποτελεσματική, και από άποψη χρόνου και κόστους. Είναι, επομένως, απαραίτητη

μια επιλογή των σημαντικότερων παραγόντων και μεταβλητών που επηρεάζουν το πείραμα, έτσι ώστε να διεξαχθεί ένα πείραμα που να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό της πραγματικής ναυπηγικής κατασκευής. Επίσης, πρέπει να λάβουμε υπόψη και τους απαραίτητους περιορισμούς των μεταβλητών του πειράματος.

Μια ναυπηγική κατασκευή υπόκειται σε πληθώρα πιέσεων και φορτίσεων κατά τη λειτουργία της στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα ενισχυμένα και μη πλαίσια ελασμάτων υποβάλλονται σε ένα συνδυασμό πλευρικών και ομοεπίπεδων φορτίων. Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στις ομοεπίπεδες φορτίσεις και ειδικότερα σε αυτή του μονοαξονικού εφελκυσμού. Η δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της αντοχής, της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας, και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού υπό εξέταση. Στο πειραματικό μέρος, η πειραματική δοκιμή παρέχει πολύ χρήσιμα στοιχεία για τη συμπεριφορά του δοκιμίου υπό εφελκυσμό, όπως το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, το όριο διαρροής και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και το μέτρο παραμόρφωσης του υλικού.

4.2.1 Επιλογή εξεταζόμενου υλικού

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων είναι δύο κράματα αλουμινίου και πιο συγκεκριμένα τα 5083 και 1561. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε ναυπηγικό κράμα 5083 εν ψυχρώ κατεργασίας H111 και H321. Από τη συγκόλληση των δύο κραμάτων κατασκευάστηκαν τα υβριδικά δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

- **Κράμα αλουμινίου 5083**

Το κράμα αλουμινίου 5083, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, είναι ένα από τα ισχυρότερα κράματα χωρίς θερμική κατεργασία, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ναυπηγικές εφαρμογές. Χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, παρουσιάζει υψηλή μηχανική αντοχή, καλή συγκολλητότητα και πολύ καλή αντίσταση σε διάβρωση. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει την υψηλότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με τα λοιπά μη θερμικώς κατεργαζόμενα κράματα αλουμινίου, και διατηρεί σημαντικά υψηλή αντοχή και μετά τη συγκόλληση. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος που το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή υβριδικών δοκιμίων.

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τα κράματα αλουμινίου 5083-H111 και 5083-H321. Οι κωδικοποιήσεις που ακολουθούν τον τύπο του κράματος, αναφέρονται στο είδος της κατεργασίας την οποία έχουν υποστεί. Το κράμα αλουμινίου 5083-H111, έχει υποστεί μόνο ενδοτράχυνση σε κράμα ελάχιστης σκληρότητας. Από την άλλη, το κράμα αλουμινίου 5083-H321 έχει υποστεί ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης [5].

Η χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 5083, ή AlMg4.5Mn δίνεται στον πίνακα 4-1 [39].

Πίνακας 4-1: Χημική σύσταση κράματος αλουμινίου 5083

Στοιχείο	Περιεκτικότητα %
Si	0.4%
Fe	0.4%
Cu	0.1%
Mn	0.4-1.0%
Mg	4.0-4.9%
Zn	0.25%
Ti	0.15%
Cr	0.05-0.25%
Al	το υπόλοιπο

Στους Πίνακες 4-2, 4-3 αναγράφονται οι βασικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου 5083/H111 και 5083/H321 [39].

Πίνακας 4-2: Μηχανικές ιδιότητες κράματος 5083/H111 και 5083/321

5083/H111	
Ιδιότητα	Τιμή
Όριο Διαρροής σ_y	145 (MPa)
Μέγιστη αντοχή σε εφεκλισμό σ_{TS}	300 (MPa)
Αντοχή σε διάτμηση	175 (MPa)
Σχετική επιμήκυνση θραύσης κατά μήκος ινών δ_R	23 (%)
Σκληρότητα Vickers	75 (HV)
5083/H321	
Ιδιότητα	Τιμή
Όριο Διαρροής σ_y	240 (MPa)
Μέγιστη αντοχή σε εφεκλισμό σ_{TS}	330 (MPa)
Αντοχή σε διάτμηση	185 (MPa)
Σχετική επιμήκυνση θραύσης κατά μήκος ινών δ_R	17 (%)
Σκληρότητα Vickers	95 (HV)

Πίνακας 4-3: Φυσικές ιδιότητες κράματος 5083

Ιδιότητα	Τιμή
Πυκνότητα	2.65 g/cm ³
Σημείο Βρασμού	570°C
Μέτρο Ελαστικότητας	72 GPa
Ηλεκτρική Αντίσταση	0.058x10 ⁻⁶ Ω.m
Θερμική Αγωγιμότητα	121 W/m.K
Μέτρο Θερμικής Διαστολής	25x10 ⁻⁶ /K

- **Κράμα αλουμινίου 1561**

Το ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 1561 ή ισοδύναμα AlMg6MnZr ή AMr61 σύμφωνα με το πρότυπο ISO 209-1 [46], το οποίο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή σύγχρονων πολεμικών πλοίων και σε άλλες εφαρμογές, είναι ένα μέσης αντοχής μη θερμικά σκληρυνόμενο κράμα αλουμινίου. Η επί τοις εκατό περιεκτικότητα των στοιχείων πρόσμιξης του ναυπηγικού κράματος αλουμινίου 1561 παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-4 [9].

Πίνακας 4-4: Σύσταση κραμάτος αλουμινίου 1561

Στοιχείο	Περιεκτικότητα %
Mg	5.5-6.5
Be	0.0001-0.003
Zr	0.02-0.12
Mn	0.7-1.1
Al	το υπόλοιπο

Επίσης, μπορεί να περιέχει μικρές προσμίξεις των στοιχείων του Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-5: Προσμίξεις στοιχείων στο κράμα αλουμινίου 1561

Στοιχείο	Περιεκτικότητα %
Fe	0.4
Si	0.4
Zn	0.2
Cu	0.1
Άλλα στοιχεία	0.05
Σύνολο άλλων στοιχείων	0.1

Τα τμήματα του κράματος αλουμινίου 1561 που χρησιμοποιήθηκαν κόπηκαν από ενισχυμένο πλαίσιο ναυπηγικού ελάσματος, με διαστάσεις 3.6 x 700 x 700 (πάχος x

μήκος x πλάτος σε mm). Τα δοκίμια απλού ελάσματος (μη ενισχυμένου) κόπηκαν από πλαίσιο ελάσματος 1561 με διαστάσεις 3.6 x 800 x 800 (πάχος x μήκος x πλάτος σε mm). Η πυκνότητα του υλικού είναι $\rho = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-6 [9].

Πίνακας 4-6: Βασικές μηχανικές ιδιότητες κράματος 1561

Κράμα αλουμινίου 1561	
Ιδιότητα	Τιμή
Όριο Διαρροής σ_Y	186.2 (MPa)
Μέγιστη αντοχή σε εφεκλυσμό σ_{TS}	332.2 (MPa)
Σχετική επιμήκυνση θράυσης κατά μήκος ινών δ_R	11.0 (%)

4.2.2 Επιλογή πειραματικών δοκιμίων και οι ομάδες των πειραμάτων

Η επιλογή των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν έγινε με βάση το υπάρχον και διαθέσιμο υλικό, καθώς και τον σκοπό που θέλαμε να επιτύχουμε. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έμφαση δόθηκε στη διάδοση ρωγμών σε δοκίμια αλουμινίου στα οποία υπήρχε συγκόλληση ή ενισχυτικό βολβοάμας. Γενικότερα, η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε στις εξής τρεις ομάδες πειραμάτων:

1. Πειραματικός υπολογισμός των βασικών χαρακτηριστικών του συγκολλητού υλικού 1561-5083, με χρήση υβριδικών δοκιμίων “dogbone”.
2. Πειράματα μικρής κλίμακας σε συγκολλητά μη ενισχυμένα CT δοκίμια
3. Πειράματα μικρής κλίμακας σε συγκολλητά ενισχυμένα CT δοκίμια, με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου βολβοάμας.

Παρακάτω, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά οι τρεις ομάδες πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1. Η πρώτη ομάδα πειραμάτων περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που ελήφθησαν μετά από εφαρμογή εφεκυσμού σε συγκολλητά δοκίμια τύπου “dogbone”. Χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκίμια “dogbone”, εκ των οποίων τα 4 αποτελούνταν από το υλικό 1561-5083/H111 και το τελευταίο από 1561-5083/H321. Λόγω των υψηλών παραμορφώσεων στις οποίες υποβλήθηκαν οι πλάκες κατά τη συγκόλληση και τη

μετέπειτα κατεργασία τους, δεν ήταν δυνατή η παραγωγή περισσότερων δοκιμίων “dogbone”.

Τα δοκίμια “dogbone” που εξετάσθηκαν εμπεριείχαν συγκόλληση στο μέσο, έτσι ώστε να διαπιστωθούν πιθανές διαφορές στα χαρακτηριστικά του υλικού κατά τον εφελκυσμό του, σε σχέση με απλά “dogbone” δοκίμια. Το μήκος των δοκιμίων ήταν περίπου 150 mm και το μέγιστο πλάτος στα άκρα ήταν 40 mm. Η διατομή στο μέσο ήταν 12.5 mm και το πάχος του δοκιμίου περίπου 36 mm. Στην παράγραφο 4.4.2 περιγράφονται αναλυτικά οι διαστάσεις των δοκιμίων που εξετάσθηκαν. Μετά τη διεξαγωγή και καταγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων, έγινε σύγκριση τους με τα ήδη υπολογισμένα στοιχεία των υλικών που βρέθηκαν είτε στη βιβλιογραφία είτε σε παλαιότερες μελέτες για τα ίδια υλικά.

2. Η δεύτερη ομάδα πειραμάτων έγινε με βάση το διεθνές πρότυπο ISO12135:2002 (Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasi-static fracture toughness), που ισχύει για τα μεταλλικά υλικά. Χρησιμοποιήθηκαν συγκολλητά συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT (compact tension), με προϋπάρχουσα ρωγμή τύπου U. Επιλέχθηκε ως άκρο της ρωγμής αυτό του τύπου U, λόγω της ευκολίας διαμόρφωσης/κατεργασίας του. Τα δοκίμια αποτελούνταν από δύο τμήματα διαφορετικού υλικού (1561, 5083) συγκολλημένα μεταξύ τους. Στη μία πλευρά του υλικού δημιουργήθηκε ρωγμή ημικυκλικού άκρου. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 6 δοκίμια, στα οποία η ρωγμή βρισκόταν στην πλευρά του κράματος 5083/H321. Το έλασμα πίσω από τη συγκόλληση αποτελούταν από το κράμα 1561. Τα δοκίμια που κατασκευάσθηκαν ήταν μήκους 125 mm, ύψους 120 mm περίπου και πάχους 4 mm. Η προϋπάρχουσα ακραία διαμπερής ρωγμή βρισκόταν στο μέσο του ύψους του δοκιμίου, ήταν μήκους περίπου 61 mm στα δοκίμια χωρίς έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, και 51 mm στα δοκίμια με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν ιδιοκατασκευές (αρπάγες για τη στερέωση και συγκράτηση των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων), σχεδιασμένες για να αντέχουν την επιβολή εφελκυστικών φορτίων ± 250 kN. Με βάση τα πειράματα μικρής κλίμακας, έγινε παρατήρηση της διαδικασίας κατά την οποία οι ρωγμές ξεκινούν, διαδίδονται και συμπεριφέρονται σε

συγκολλητά υβριδικά δοκίμια. Επίσης, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των απλών συμπαγών δοκιμίων που εξετάστηκαν σε προηγούμενες μελέτες [10].

3. Η τρίτη ομάδα πειραμάτων αποτελείται από ενισχυμένα CT δοκίμια του κράματος 1561. Κάθε δοκίμιο περιέχει εξελασμένο ενισχυτικό βολβολάμας, τοποθετημένο σε προκαθορισμένο σημείο κάθε φορά. Συνολικά έγιναν δοκιμές εφελκυσμού σε 12 συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού με ενισχυτικό βολβολάμας, εκ των οποίων τα 6 δεν είχαν έλασμα πίσω από το ενισχυτικό (“rear plate”), ενώ τα υπόλοιπα 6 είχαν έλασμα πίσω από το ενισχυτικό σε διαφορετικά μήκη, τα οποία θα αναφερθούν στη συνέχεια. Σκοπός των πειραμάτων αυτών ήταν όχι μόνο να διαπιστωθεί ποσοτικά και ποιοτικά ο ρόλος του ενισχυτικού στη διάδοση των ρωγμών, αλλά και πώς αυτή επηρεάζεται από τη θέση του ενισχυτικού και την ύπαρξη ή όχι του “rear plate”.

Για κάθε ομάδα πειραμάτων, ανάλογα με τη μορφή και το μέγεθος των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε από μια ποικιλία εξαρτημάτων της μηχανής (αρπάγες), το κατάλληλο κάθε φορά για τη συγκράτηση των δοκιμίων. Τα ειδικά προσαρτήματα εφελκυστικών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α της εργασίας.

4.2.3 Ύπαρξη προϋπάρχουσας διαμετρούς ρωγμής

Στις περισσότερες περιπτώσεις αστοχίας μιας μεταλλικής κατασκευής, η έναρξη της θραύσης γίνεται από την επιταχυνόμενη διάδοση μίας προϋπάρχουσας ρωγμής της κατασκευής. Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται με την πάροδο του χρόνου και από τις συνεχείς εναλλασσόμενες και μη φορτίσεις που ασκούνται στην κατασκευή, όπως τις κοπωτικές φορτίσεις.

Με σκοπό να προσεγγισθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η πραγματική συμπεριφορά σε θραύση μιας κατασκευής από αλουμίνιο, διαμορφώθηκαν αρχικές ρωγμές σε όλα τα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού (CT δοκίμια) που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Οι ρωγμές μπορούν να διαμορφωθούν σε όλες τις πιθανές παραλλαγές και να αποκτήσουν μια ποικιλία γεωμετρίας και μορφών. Η γεωμετρία των ρωγμών (αρχικό μήκος, τύπος άκρης ρωγμής) έχει πολύ σημαντική επίδραση στη διάδοση των ρωγμών και τη σύλληψή τους σε ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων. Σύμφωνα με τον O’Dowd [37],

η ολκιμότητα των υλικών εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες του εντατικού πεδίου και τον περιορισμό των άκρων των ρωγμών.

Οι μορφές του άκρου των ρωγμών που διαμορφώνονται συνήθων σε δοκίμια είναι οι εξής δύο:

(i) Ημικυκλικό άκρο ρωγμής (αμβλεία εγκοπή τύπου U)

(ii) Τριγωνικό άκρο ρωγμής (οξεία εγκοπή τύπου V)

Η διαμόρφωση μιας εγκοπής στο άκρο της ρωγμής ενός δοκίμιου, προκαλεί τοπικά ανακατανομή του εντατικού πεδίου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται τοπική τριαξονική εντατική κατάσταση στο άκρο της εγκοπής. Μετά τη διαμόρφωση υπάρχουν σημαντικές παραμένουσες τάσεις στη ρίζα της εγκοπής, που αποτελούν ατέλειες από τις οποίες ξεκινά συνήθως η διάδοση της ρωγμής κατά την επιβολή εφελκυστικού φορτίου στο δοκίμιο.

Οι παραμένουσες τάσεις είναι πολύ πιο αυξημένες στην περίπτωση της ρωγμής τριγωνικού άκρου τύπου V, καθώς αυτή απαιτεί μεγαλύτερη δυσκολία στη διαμόρφωσή της. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε η διαμόρφωση ρωγμών ημικυκλικού άκρου στα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία [11]. Το αρχικό μήκος της ρωγμής που προϋπήρχε στα δοκίμια επιλέχθηκε ως παράμετρος, προκειμένου να αξιολογηθεί κάθε πιθανή απόκλιση και ποικιλομορφία στην πορεία που ακολούθησε η ρωγή κατά τη διάρκεια του πειράματος, μέχρι να φτάσει στο πέγμα του ενισχυτικού.

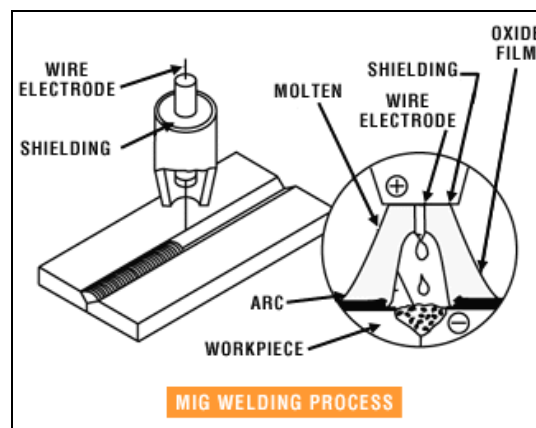
4.2.4 Διατάξεις συγκολλήσεων των δοκιμίων του πειράματος

Για την κατασκευή των δοκιμίων, η οποία έγινε στις εγκαταστάσεις των Ναυπηγείων Ελευσίνας, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος GMAW (Gas Metal Arc Welding), δηλαδή συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστατευτικό αέριο. Η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε για την ένωση των δύο κραμάτων αλουμινίου (5083 και 1561) με σκοπό τη δημιουργία υβριδικών δοκιμίων.

Η μέθοδος GMAW χρησιμοποιείται ευρέως για τη συγκόλληση τόσο επίπεδων όσο και καμπύλων ελασμάτων, όπως για παράδειγμα κατά τη συναρμολόγηση του εσωτερικού της γάστρας ενός πλοίου. Επίσης, χρησιμοποιείται και για την ένωση των εξωτερικών ελασμάτων κατά την τελική συναρμολόγηση του πλοίου. Έτσι παρατηρούμε πως η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου για τη συγκόλληση των ελασμάτων

αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία, μπορεί να μας δώσει ενδιαφέρουσες πληροφορίες για την συμπεριφορά τους σε μια πραγματική κατασκευή.

Στη μέθοδο συγκόλλησης GMAW η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηγόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων, καθώς η προστασία του τηγμένου μετάλλου γίνεται με χρήση αδρανούς ή ενεργού αερίου. Βασικός σκοπός της μεθόδου, όταν αυτή άρχισε να χρησιμοποιείται, ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου, για αυτό και χρησιμοποιείται έως και σήμερα. Μία απεικόνιση της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Μέθοδος Συγκόλλησης GMAW (MIG)

Η μέθοδος GMAW, χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως τα εξής:

- Πολλές επιλογές θέσης συγκόλλησης
- Υψηλότερα ποσοστά εναπόθεσης από τη συγκόλληση GTAW
- Μικρότερη απαιτούμενη πείρα συγκολλητή
- Μπορούν να δημιουργηθούν συγκολλήσεις μεγάλου μήκους χωρίς κενά
- Χρειάζονται λιγότερες διαδικασίες καθαρισμού της συγκολλητής επιφάνειας μετά τη συγκόλληση.

Τα προστατευτικά αέρια και οι τύποι των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση αλουμινίου παρατίθενται στη συνέχεια, [44].

- **Προστατευτικά αέρια:** Για τη συγκόλληση αλουμινίου με τη μέθοδο GMAW χρησιμοποιούνται τα εξής αέρια:
 - (1) Αργό για μικρά πάχη (έως 25 mm)
 - (2) Μίγμα 75% He + 25% Ar για πάχη από 25 μέχρι 76 mm
 - (3) 90% He + 10% Ar για πολύ μεγάλα πάχη

- **Τύποι ηλεκτροδίων:** Τα συμπαγή ηλεκτρόδια για συγκόλληση GMAW έχουν συνήθως ίδια σύνθεση με το προς συγκόλληση βασικό μέταλλο (base metal). Οι κυριότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή του καταλληλότερου ηλεκτροδίου είναι η μικρή ευαισθησία σε ρωγμάτωση, η αντοχή του τηκόμενου μετάλλου, η ολκιμότητα της συγκόλλησης, η λειτουργία του σε υψηλή θερμοκρασία (μπορεί να φτάσει και τους 2000°C στο τόξο της συγκόλλησης), και η αντίστασή του σε διάβρωση.
 Πιο συγκεκριμένα, για το κράμα αλουμινίου 5083, χρησιμοποιούνται 3 τύποι ηλεκτροδίων από τα κράματα αλουμινίου 5183, 5356 ή 5556. Οι τρεις αυτοί τύποι ηλεκτροδίων προσφέρουν πολύ υψηλή αντοχή σε αυχενικές συγκολλήσεις, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε μαγνήσιο (Mg).

Συγκεκριμένα, για τη συγκόλληση των δοκιμίων κράματος αλουμινίου 1561 και 5083 που εξετάστηκαν στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής, [45]:

- **Μέταλλο συγκόλλησης:** SG-AlMg4.5Mn κατά DIN1732 classification (SFA5,10: ER5183 κατά AWS), ή αλλιώς κράμα 5183, του οποίου η χημική σύσταση δίνεται στον Πίνακα 4-7, και οι μηχανικές του ιδιότητες στον Πίνακα 4-8.

Πίνακας 4-7: Χημική σύσταση μετάλλου συγκόλλησης (κράμα 5183)

Mg: 4.3-5.2%	Mn: 0.6-1%	Cr: 0.05-0.25%	Ti < 0.15%
--------------	------------	----------------	------------

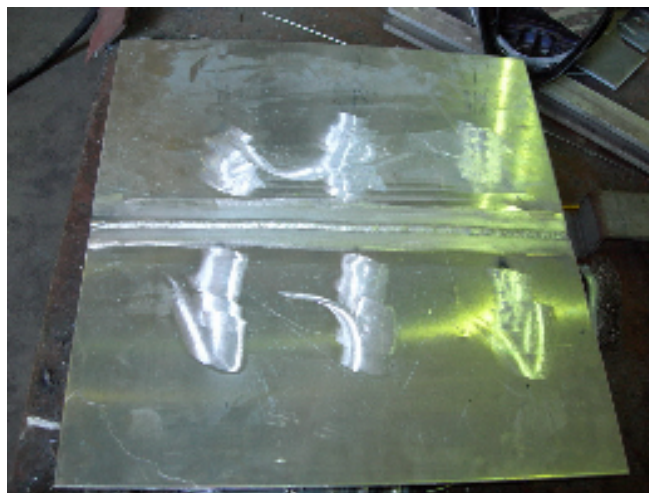
Πίνακας 4-8: Μηχανικές ιδιότητες μετάλλου συγκόλλησης (κράμα 5183)

Όριο Διαρροής 0.2% N/mm ²	Όριο Θραύσης N/mm ²	Επιμήκυνση (%)	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (Sm/mm ²)
125	275	16	15-19

- **Αέριο Συγκόλλησης:** Καθαρό Αργό, Ar (EN439)I
- **Σύρμα συγκόλλησης** διαμέτρου 1.2 mm

Το τηκόμενο ηλεκτρόδιο (σύρμα), δηλαδή το μέταλλο εναπόθεσης της συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε, ήταν το 5183 λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας του σε Mg, με την οποία επιτυγχάνεται μικρότερη επιφάνεια συγκόλλησης, καθώς και μεγαλύτερη αντοχή. Επίσης, αυτό το μέταλλο εναπόθεσης προσφέρει καλύτερη πρόσφυση με τις επιφάνειες των δοκιμίων, καθώς και μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση, που αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα.

Τα συγκολλητά δοκίμια κόπηκαν από δύο συγκολλημένες πλάκες κραμάτων 5083/111-1561 και από δύο πλάκες 5083/H321-1561, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-1.



Εικόνα 4-1: Συγκολλητή πλάκα 1561-5083, από την οποία κόπηκαν τα δοκίμια CT

4.2.5 Συστήματα ενίσχυσης των δοκιμίων

Όπως προαναφέρθηκε, οι πιο συνηθισμένοι τύποι ενισχυτικού που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές κατασκευές είναι οι απλές λάμες, τα ενισχυτικά τύπου T, οι απλές συμμετρικές και απλές βολβολάμες, και οι ανισοσκελείς γωνίες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι απλές βολβολάμες. Τα εξελασμένα δοκίμια του υλικού 1561 κόπηκαν απευθείας από ήδη ενισχυμένα ελάσματα αλουμινίου που έχουν χρησιμοποιηθεί σε πραγματικές ναυπηγικές κατασκευές. Επίσης, έγινε σύγκριση με τα

αποτελέσματα των δοκιμών της διπλωματικής του Αθανασάτου Ιωάννη [8], που πραγματοποιήθηκαν σε ελάσματα με εξελασμένα ενισχυτικά «τύπου T».

Στο κεφάλαιο της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται αναλυτικά οι διατάξεις και οι διαστάσεις των ενισχυτικών των CT δοκιμών. Σημειώνεται, ότι κατά τη διαξαγωγή του πειράματος δεν λήφθηκε υπόψη κάθε πιθανή αλλαγή των διαστάσεων των ενισχυτικών, και θεωρήθηκε ότι το πάχος τους –όπως και αυτό των ελασμάτων- παρέμεινε σταθερό κατά τη διάρκεια του πειράματος.

4.2.5.1 Κατασκευαστική διαμόρφωση της ενίσχυσης

Είναι προφανές ότι κατά την διαδικασία της συγκόλλησης ενός δοκιμίου, το υλικό υπόκειται σε παραμορφώσεις και μείωση της αντοχής του στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (Θ.Ε.Ζ.) της συγκόλλησης. Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία χαρακτηρίζονται από καλή συγκολλητότητα και συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο ακριβής προσδιορισμός και η πρόβλεψη των παραμορφώσεων είναι πολύ δύσκολος, καθώς εξαρτώνται από πληθώρα συνθηκών και παραμέτρων [48]. Για αυτό το λόγο, οι αρχικές παραμορφώσεις λόγω της συγκόλλησης θεωρήθηκαν αμελητέες.

4.2.6 Παρουσίαση πειραματικής διάταξης

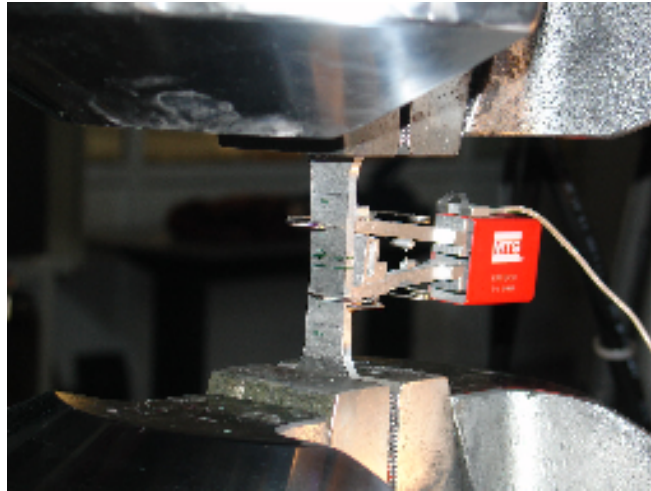
Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης, και θα γίνει αναφορά στις βασικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Οι δοκιμές εφεκλισμού εκτελέστηκαν στην πειραματική μηχανή εφεκλισμού MTS του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, η οποία παρέχει μέγιστη δυνατότητα επιβαλλόμενης φόρτισης ± 250 kN, Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-2: Η διάταξη της μηχανής εφελκυσμού MTS με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τα πειράματα με δοκίμια τύπου “dogbone” είναι η εξής: αρχικά γίνεται στερέωση του δοκιμίου τύπου “dogbone” στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού (βλ. Παράρτημα Α), στη συνέχεια προσαρμόζεται κατάλληλα στο μέσον του ελεύθερου τμήματος του ένα επιμηκυσιόμετρο το οποίο μετράει κάθε μεταβολή στο μήκος του δοκιμίου κατά τον εφελκυσμό του και αρχίζει η φόρτιση. Για τα διάφορα φορτία που επιβάλλονται καταγράφονται οι ενδείξεις που παίρνουμε από τις άντυγκες του επιμηκυσιομέτρου ώστε να καταγραφεί η προκαλούμενη παραμόρφωση σε σχέση με τη φόρτιση έως τη θραύση του δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του υπό εξέταση υλικού, Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3: Πειραματική διάταξη εφελκυσμού στην οποία φαίνεται το δοκίμιο τύπου “dogbone”, καθώς και το συνδεδεμένο επιμηκυσιόμετρο

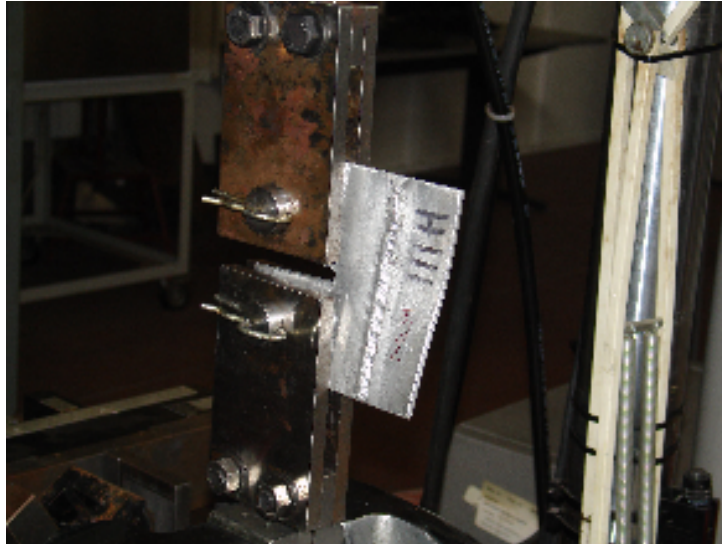
Στην περίπτωση που κατά τη διάρκεια του πειράματος εξαντληθούν οι ενδείξεις την άντυνας, σταματάμε τη φόρτιση, μηδενίζουμε το επιμηκυσιόμετρο (επανάταξη), και μετά συνεχίζουμε το πείραμα, φροντίζοντας στις καινούριες ενδείξεις να προσθέτουμε την τελευταία ανάγνωση πριν την επανάταξη. Οι μετρήσεις που προέκυπταν από κάθε πείραμα αποθηκεύονται σε έναν προσωπικό υπολογιστή που είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη συσκευή καταγραφής των μετρήσεων της μηχανής MTS. Με αυτόν τον τρόπο, τα στοιχεία των μετρήσεων είναι έτοιμα για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με την οποία καταγράφηκαν τα διαδοχικά στάδια των πειραμάτων, από την αρχή του εφελκυσμού μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Ο ρυθμός φωτογράφισης ήταν 1 φωτ. ανά 5 sec. Με αυτόν τον τρόπο, απεικονίζεται ευκολότερα η παραμόρφωση των δοκιμίων, καθώς και τα χαρακτηριστικά της ανάπτυξης των ρωγμών κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Για τα πειράματα CT δοκιμίων εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε η ίδια μηχανή εφελκυσμού MTS, με μεγαλύτερο ρυθμό απομάκρυνσης σιαγόνων. Στη διάταξη αυτή δεν υπήρχε επιμηκυσιόμετρο, αλλά ελήφθησαν οι τιμές φορτίου-απομάκρυνσης, οι οποίες στη συνέχεια αποθηκεύθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Μεγάλη σημασία δόθηκε στην ευθυγράμμιση της διάταξης, έτσι ώστε να εξαλειφθεί όσο είναι δυνατό η επιρροή των εξωτερικών σφαλμάτων στα πειραματικά

αποτελέσματα. Στην Εικόνα 4-4, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη ενός CT ενισχυμένου δοκιμίου στη μηχανή.



Εικόνα 4-4: Πειραματική διάταξη συγκολλητού CT δοκιμίου

Ρυθμός παραμόρφωσης

Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαξαγωγή ενός πειράματος εφεκλυσμού. Σε μια πραγματική ναυπηγική κατασκευή, ο ρυθμός παραμόρφωσης δεν είναι ένα μέγεθος που παραμένει σταθερό, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των επιβαλλόμενων φορτίσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Γενικά, κατά τη λειτουργική ζωή μιας ναυπηγικής κατασκευής, αυτή μπορεί να υποβληθεί σε σημαντικούς ρυθμούς φόρτισης σε σχέση με αυτούς που συναντάμε σε ημιστατικές δοκιμές ($\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). Η επιβολή της φόρτισης μπορεί να κυμαίνεται από μεσαίο ρυθμό φόρτισης ($\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$), στην περίπτωση για παράδειγμα σφυρόκρουσης, έως και σημαντικά μεγαλύτερους ρυθμούς φόρτισης ($\dot{\epsilon} = 2 \text{ s}^{-1}$) στην περίπτωση δυναμικών φορτίσεων, όπως σε μια σύγκρουση.

Η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητα ενός υλικού είναι ιδιότητες ιδιαίτερα συσχετισμένες με τον ρυθμό παραμόρφωσης. Σε μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν σε συμπαγή δοκίμια εφεκλυσμού, τα οποία υποβλήθηκαν σε ποικίλους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης, που κυμαίνονταν από 0.5 mm/min έως 2 mm/min, έχει

αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει άμεσος συσχετισμός μεταξύ της έναρξης θραύσης και του ρυθμού απομάκρυνσης [10]. Στην εν λόγω πειραματική διαδικασία, όλα τα πειράματα σε δοκίμια εφελκυσμού CT πραγματοποιήθηκαν σε ρυθμό επιβαλλόμενης φόρτισης 1.0 mm/min, η οποία επιλέχθηκε ως η πιο αντιπροσωπευτική τιμή. Στα δοκίμια τύπου “dogbone”, η ταχύτητα απομάκρυνσης ήταν μικρότερη, της τάξης των 0.5 mm/min. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη χαμηλού ρυθμού παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό των δοκιμίων, έτσι ώστε αυτές να θεωρηθούν ημιστατικές δοκιμές.

Διαμόρφωση δοκιμίων πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας

Είναι πολύ σημαντικό, πριν την έναρξη οποιουδήποτε πειράματος, τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται να έχουν υποστεί την κατάλληλη μηχανουργική επεξεργασία. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διαμόρφωση των άκρων των ρωγμών, που παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διάδοση της ρωγμής, και στη σωστή προετοιμασία και λείανση της επιφάνειας του δοκιμίου, ώστε να παρουσιάζει όσο λιγότερες ατέλειες γίνεται. Οι παράλληλες πλευρές του ανοίγματος της ρωγμής σε όλα τα δοκίμια είχαν απόσταση 5 mm μεταξύ τους και ήταν κάθετες ως προς το ημικυκλικό άκρο της ρωγμής.

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική είναι η σωστή μέτρηση και καταγραφή των διαστάσεων του δοκιμίου (μήκος, πλάτος, πάχος, μήκος και πλάτος ρωγμής, γεωμετρία ενισχυτικών κ.α) πριν την έναρξη του πειράματος, ώστε να αποφευχθούν τυχόν λάθη στη συνέχεια. Προκειμένου να μετρηθούν οι διαστάσεις της ρωγμής και του άκρου της με ακρίβεια χρησιμοποιήθηκε το στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.

4.3 Μεταλλογραφική Παρατήρηση Επιφάνειας Συγκολλητών Δοκιμίων Εφελκυσμού

Πριν την έναρξη των πειραμάτων, κρίθηκε απαραίτητη η μεταλλογραφική παρατήρηση της επιφάνειας της συγκόλλησης των δύο κραμάτων αλουμινίου, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η έκταση της Θερμικά Επηρεαζόμενης Ζώνης, καθώς και οι ατέλειες της συγκόλλησης (πόροι, εγκλείσματα), που μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στα πειραματικά αποτελέσματα.

Αρχικά, έγινε κοπή, εγκιβωτισμός και λείανση των δοκιμίων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η χημική τους προσβολή και η εύκολη παρατήρησή τους στο οπτικό

μικροσκόπιο. Στη μεταλλογραφική παρατήρηση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 8 δοκίμια εγκιβωτισμού, εκ των οποίων τα 4 εμπεριείχαν το υλικό 5083/H111 και τα υπόλοιπα 4 το υλικό 5083/H321. Παρακάτω ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας και των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία των δοκιμίων, καθώς και για την οπτική μικροσκοπία. Πιο αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία των δοκιμίων εγκιβωτισμού και για τη μεταλλογραφική παρατήρηση βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

4.3.1 Μέθοδοι προετοιμασίας και παρατήρησης εξεταζόμενων δοκιμίων

4.3.1.1 Προετοιμασία δειγμάτων

➤ Κοπή

Αρχικά πραγματοποιήθηκε κοπή της εκάστοτε συγκόλλησης κάθετα σε αυτήν. Η κοπή γίνεται σε δύο σημεία της συγκόλλησης. Αρχικά, σε σημείο που εμφανίζει επιφανειακή ατέλεια και στη συνέχεια σε σημείο όπου δεν υπάρχει επιφανειακή ατέλεια, ώστε να παρατηρηθεί η μικροδομή. Η κοπή πραγματοποιήθηκε σε δισκοτόμο Struers Discotom 50, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 4-5.



Εικόνα 4-5: Διάταξη δισκοτόμου Struers Discotom 50

➤ Εγκιβωτισμός

Πραγματοποιείται ψυχρός εγκιβωτισμός, ο οποίος γίνεται σε ειδικά καλούπια με ρητίνη ταχείας πήξεως.

➤ Λείανση (grinding) και Στίλβωση

Η λείανση γίνεται για την παρατήρηση της επιφάνειας των δοκιμίων. Πραγματοποιείται με μηχανική μέθοδο, όπου χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά με σκληρούς κόκκους SiC, των οποίων η αποξεστική δράση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του μέσου μεγέθους των λειαντικών κόκκων. Επίσης, γίνεται χρήση νερού ως ψυκτικό μέσο, αλλά και για λίπανση. Χρησιμοποιούνται χαρτιά με ολοένα μικρότερους κόκκους, ώστε η λείανση να γίνεται πιο λεπτομερής. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει τη στίλβωση, όπου γίνεται λείανση σε ειδικά βελούδα με τη βοήθεια κολλοειδούς διαλύματος.

Αναλυτικά, τα στάδια λείανσης και στίλβωσης έχουν ως εξής:

- 120 Grit (περίπου 125 μm)
Λιπαντικό/Ψυκτικό: Νερό
- 220 Grit
Λιπαντικό/Ψυκτικό: Νερό
- 320 Grit
Λιπαντικό/Ψυκτικό: Νερό
- 800 Grit
Λιπαντικό/Ψυκτικό: Νερό
- 1000 Grit
Λιπαντικό/Ψυκτικό: Νερό
- 1200 Grit (περίπου 14 μm)
Λιπαντικό/Ψυκτικό: Νερό

Τα δείγματα μετά το τέλος της διαδικασίας, ξεπλένονται με νερό.

➤ Στίλβωση

Η στίλβωση πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

1° Στάδιο:

α) Στιλβωτικό μέσω: Αιώρημα αλούμινας κοκκομετρίας 1 μm .

β) Λειαντικός δίσκος: Βελούδο DPNA.

2° Στάδιο:

α) Στιλβωτικό μέσω: Αιώρημα αλούμινας κοκκομετρίας 0.1 μm .

β) Λειαντικός δίσκος: Βελούδο DPNA.

Μετά από κάθε στάδιο της στίλβωσης, τα δοκίμια ξεπλένονται με νερό, αιθανόλη, για να αποφευχθεί η οξείδωση και στεγνώνονται με ζεστό αέρα. Το μηχάνημα λείανσης και στίλβωσης που χρησιμοποιήθηκε (Struers LABOPOL-5) παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-6.



Εικόνα 4-6: Διάταξη λείανσης τύπου Struers LABOPOL-5

➤ Χημική προσβολή

Για την προσβολή τους, τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν για 3 δευτερόλεπτα στο εξής χημικό διάλυμα:

- 20 ml αντιδραστήριο Poulton's,
- 10ml HNO₃,
- 16 ml διαλύματος 3gr Cr₂O₃/10ml H₂O (αντί των 3gr HCr /10ml H₂O, σύμφωνα με το ASM handbook [51])
- Τα 20 ml αντιδραστηρίου Poulton's αποτελούνται από 12 ml HCl, 6 ml HNO₃, 1 ml HF και 1ml H₂O. Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η παρατήρηση των κόκκων, αφού το συγκεκριμένο αντιδραστήριο προσβάλλει επιλεκτικά τους κόκκους ανάλογα με τον προσανατολισμό τους.

4.3.2 Οπτική μικροσκοπία και στερεοσκοπία

Μέσω του οπτικού μικροσκοπίου είναι δυνατή η παρατήρηση και ερμηνεία της μικροδομής των υλικών. Χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο που έχει για πηγή ακτινοβολίας λευκό φως, του οποίου η διακριτική ικανότητα είναι περίπου 200 nm και το βάθος του πεδίου της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα, το ανάστροφο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο (inverted metallographic microscope) που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Leica DMICM μεγεθυντικής ικανότητας 100, Εικόνα 4-7. Ελήφθησαν, επίσης, φωτογραφίες της επιφάνειας των δοκιμίων με ψηφιακή βιντεοκάμερα Leica 541016.



Εικόνα 4-7: Οπτικό μικροσκόπιο τύπου Leica DMICM

Το στερεοσκόπιο εφαρμόζεται για την παρατήρηση σε μεγέθυνση της εξωτερικής μορφολογίας ενός αντικείμενου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρήθηκε η επιφάνεια συγκόλλησης των δύο διαφορετικών κραμάτων αλουμινίου, μετά από την προσβολή τους από ειδικό διάλυμα, έτσι ώστε να είναι εμφανής η μικροδομή των υλικών. Πιο αναλυτικά, έγινε χρήση στερεοσκοπίου τύπου Leica MZ6, Εικόνα 4-8, για την παρατήρηση της επιφάνειας της συγκόλλησης, καθώς και για την παρατήρηση της επιφάνειας των λειασμένων δοκιμίων, όπου γίνεται εμφανής η ζώνη ανάδευσης.

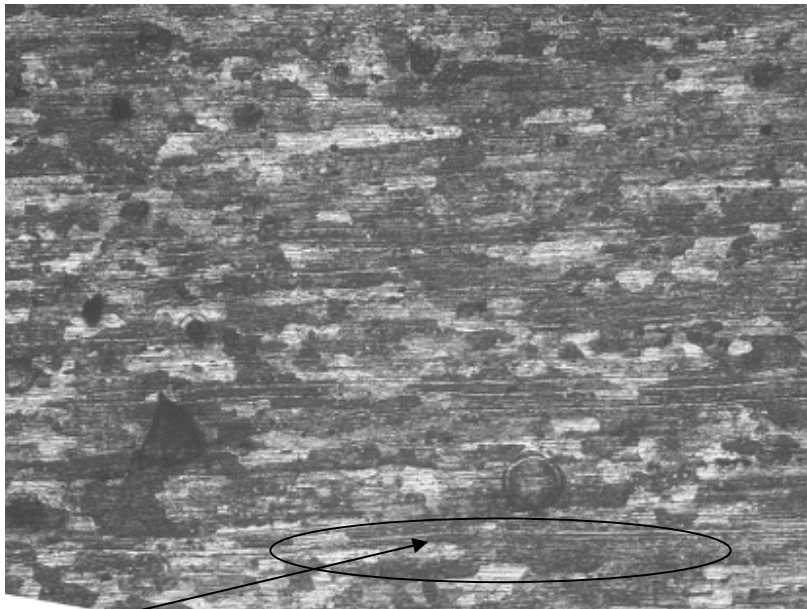


Εικόνα 4-8: Στερεοσκόπιο τύπου Leica MZ6

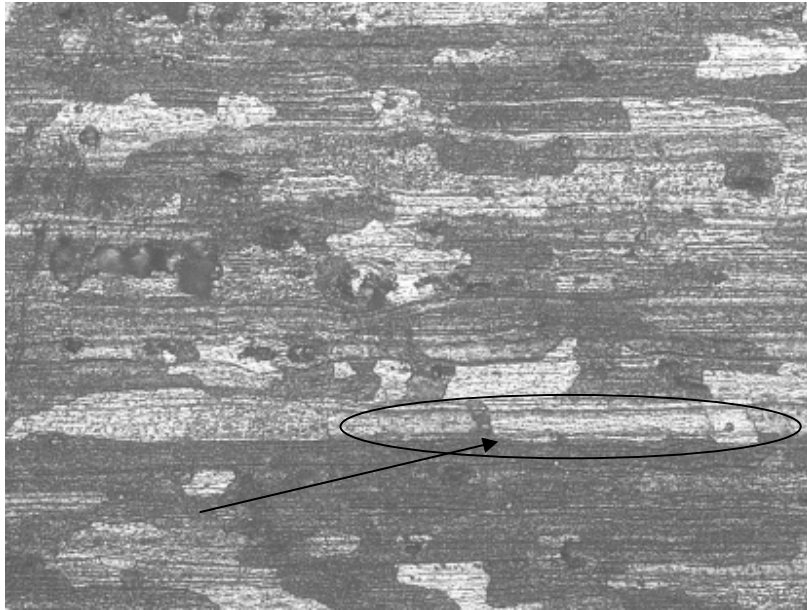
4.3.3 Η μικροδομή του εξεταζόμενου υλικού

Η μικροδομή του βασικού μετάλλου

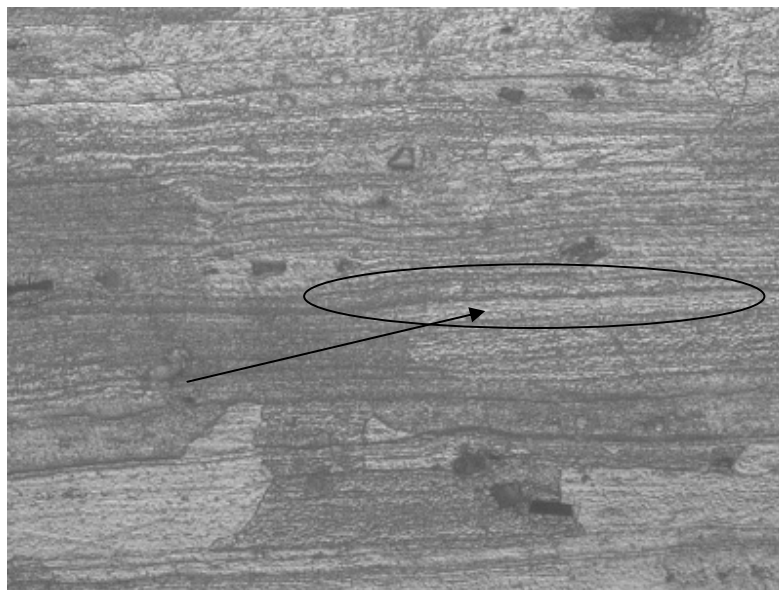
Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4-9 έως 4-14, η μικροδομή αποτελείται από μερικούς επιμηκυμένους κόκκους εξαιτίας της κατεργασίας ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί. Ευδιάκριτες είναι γενικά και οι γραμμές πλαστικής παραμόρφωσης λόγω ακριβώς της κατεργασίας αυτής. Μάλιστα στην περίπτωση του υλικού 1561, οι γραμμές αυτές είναι πιο έντονες, όπως άλλωστε και ο προσανατολισμός των κόκκων, γεγονός που υποδεικνύει μεγαλύτερο βαθμό ενδοτράχυνσης για το κράμα αυτό σε σύγκριση με τα 5083-H111 και 5083-H321.



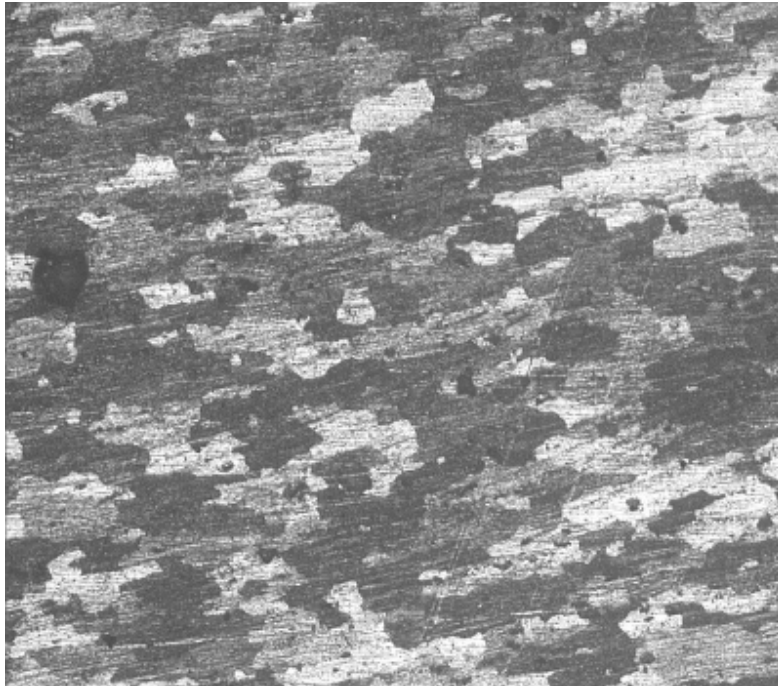
Εικόνα 4-9: Κράμα 1561 σε μεγένθυση x 100: στην περιοχή του βέλους διακρίνεται γραμμη πλαστικής παραμόρφωσης



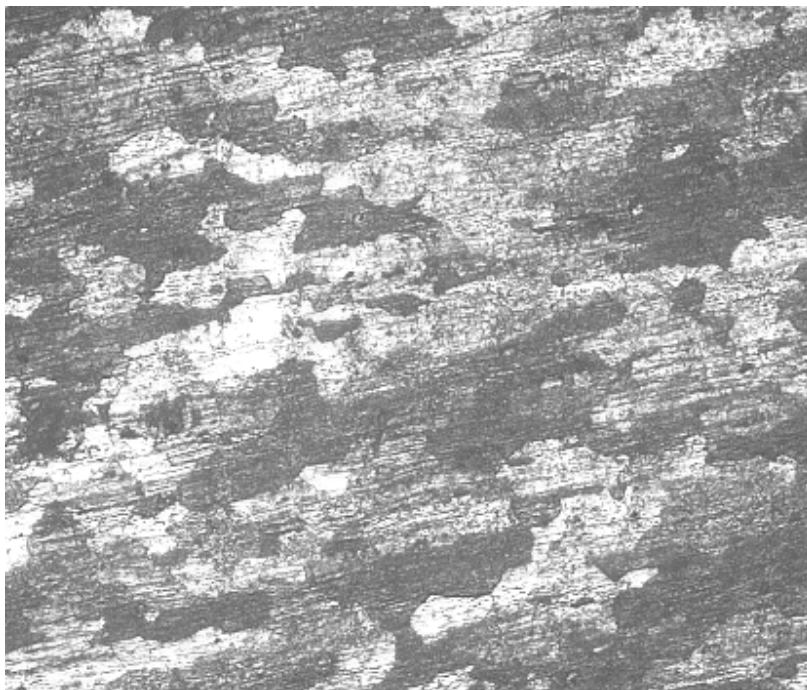
Εικόνα 4-10: Κράμα 1561 σε μεγένθυση x 200: στην περιοχή του βέλους διακρίνεται γραμμη πλαστικής παραμόρφωσης



Εικόνα 4-11: Κράμα 1561 σε μεγένθυση x 500: στην περιοχή του βέλους διακρίνεται γραμμη πλαστικής παραμόρφωσης



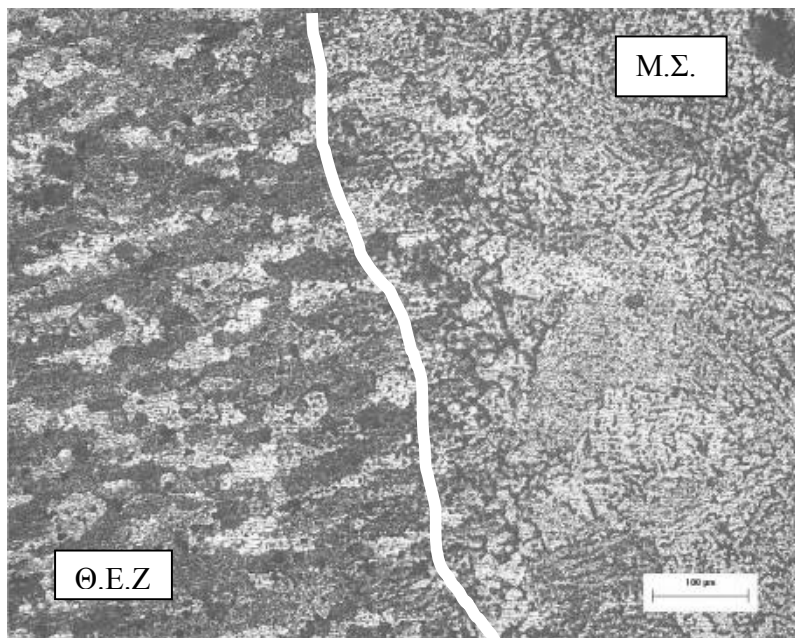
Εικόνα 4-12: Κράμα 5083/H321 σε μεγένθυση x 100



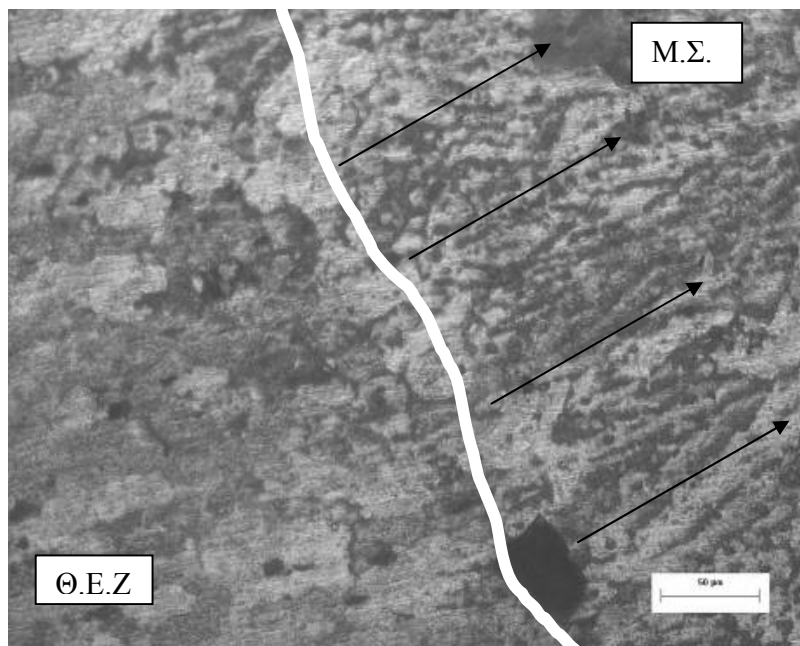
Εικόνα 4-13: Κράμα 5083/H111 σε μεγένθυση x 100

Καθώς η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης μειώνεται, παρατηρείται ανακρυστάλλωση των κόκκων. Στην αρχική μικροδομή του βασικού μετάλλου εμφανίζεται ελάχιστος αριθμός ισοαξονικών κόκκων. Καθώς, όμως, η απόσταση από τον άξονα συγκόλλησης συνεχίζει να μειώνεται, το ποσοστό αυτό σταδιακά αυξάνει ορίζοντας τη Θ.Ε.Ζ. Στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ., πολύ κοντά στη ζώνη σύνδεσης με το μέταλλο συγκόλλησης (Μ.Σ.), οι κόκκοι εμφανίζονται ισοαξονικοί, υποδηλώνοντας πλήρη ανακρυστάλλωση.

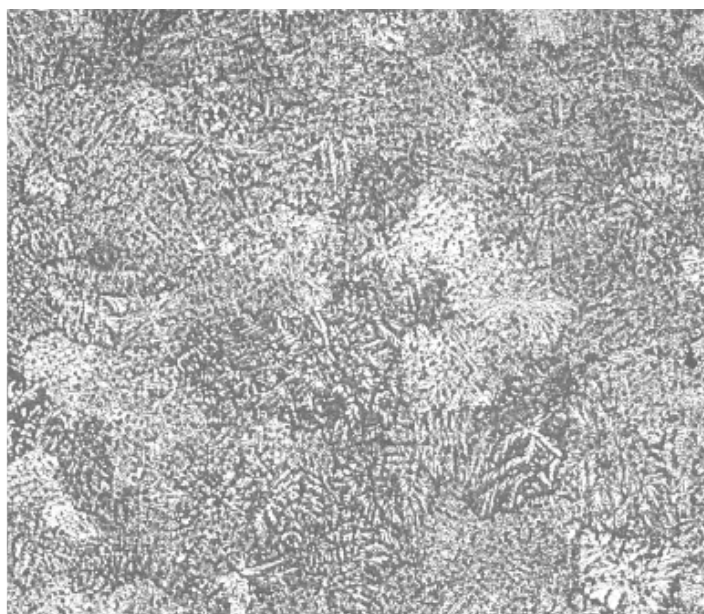
Σε ότι αφορά στο Μ.Σ., στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης με τη Θ.Ε.Ζ. παρατηρούνται κολονοειδούς μορφής κόκκοι, επιμήκεις, κυψελοειδούς δενδριτικής ανάπτυξης. Η ανάπτυξή τους εμφανίζεται κάθετη στα όρια της ζώνης στερεοποίησης, ακολουθώντας προφανώς την κατεύθυνση της μέγιστης θερμοκρασιακής μεταβολής. Στο κέντρο του Μ.Σ., οι κόκκοι εμφανίζονται ευμεγέθεις και ισοαξονικοί κυτταροειδούς μορφής και δενδριτικής ανάπτυξης. Κατά την παρατήρηση της μικροδομής, δεν παρατηρήθηκαν σε καμιά περιοχή μικρορωγμές, ενώ στο μέταλλο συγκόλλησης δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική συγκέντρωση μικροπόρων, καθώς όπου αυτοί παρατηρήθηκαν ήταν μεμονωμένοι και διασκορπισμένοι σε τυχαίες περιοχές.



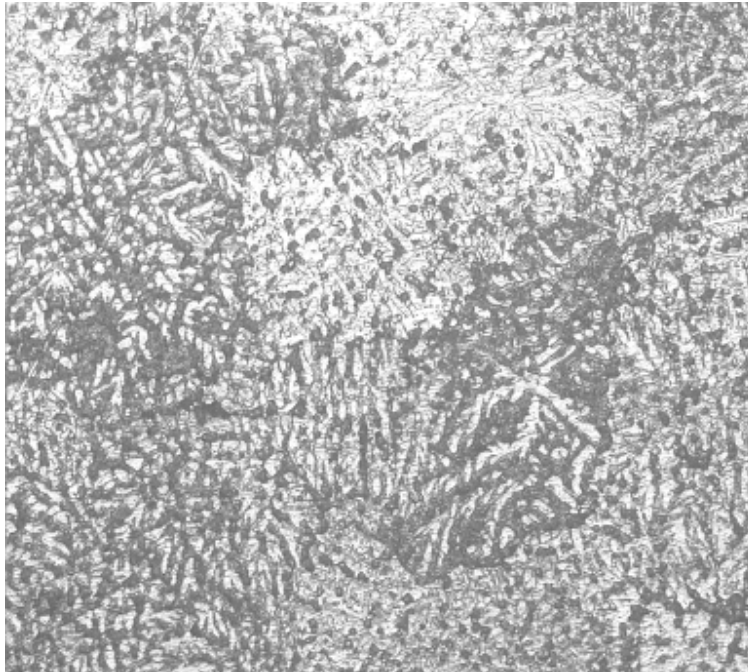
Εικόνα 4-14: Μέταλλο συγκόλλησης, στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης (λευκή έντονη γραμμή) με τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, σε μεγένθυση x 100 (αντιπροσωπευτικό για όλες τις συγκολλήσεις και για τα δύο υλικά)



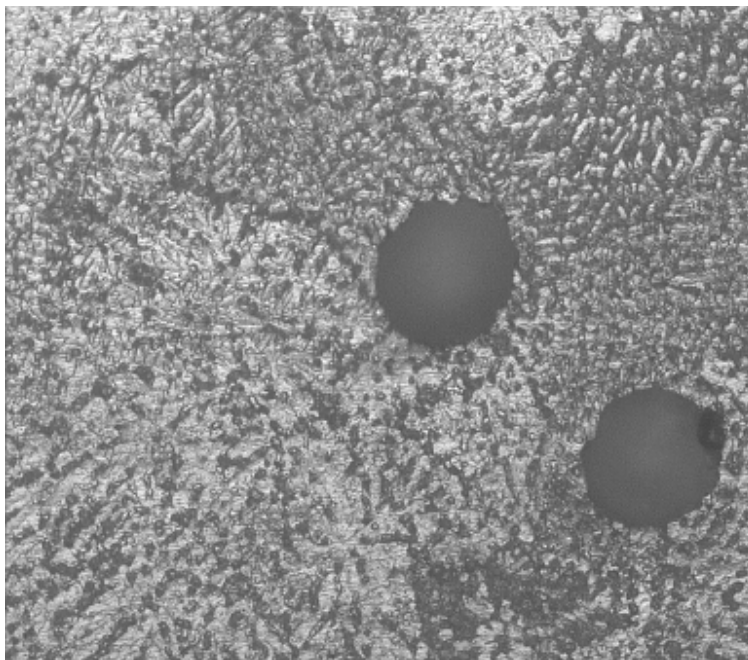
Εικόνα 4-15: Μέταλλο συγκόλλησης, στην περιοχή της ζώνης σύνδεσης (λευκή έντονη γραμμή) με τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Με μαύρα βέλη φαίνεται η κατεύθυνση της μέγιστης θερμοκρασιακής μεταβολής κατά τη στερεοποίηση σε μεγένθυση x 200 (αντιπροσωπευτικό για όλες τις συγκολλήσεις και για τα δύο υλικά)



Εικόνα 4-16: Κέντρο μετάλλου συγκόλλησης x 100 (αντιπροσωπευτικό για όλες τις συγκολλήσεις)



Εικόνα 4-17: Κέντρο μετάλλου συγκόλλησης x 200 (αντιπροσωπευτικό για όλες τις συγκολλήσεις)



Εικόνα 4-18: Πόροι που παρατηρήθηκαν στη ΘΕΖ σε μεγένθυση x 200 (αντιπροσωπευτικό για όλες τις συγκολλήσεις)

4.4 1^H Ομάδα Πειραμάτων: Πειραματικός προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού με χρήση δοκιμίων “dogbone”

Η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών είναι θεμελιώδης όσον αφορά στη σωστή επιλογή και χρήση τους σε ναυπηγικές κατασκευές. Ειδικότερα, προκειμένου να μπορεί να γίνει σωστή χρήση του υλικού αυτού σε μία κατασκευή, είναι απαραίτητη η γνώση τόσο των φυσικών όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχθεί ένα συγκεκριμένο υλικό χωρίς να αστοχήσει.

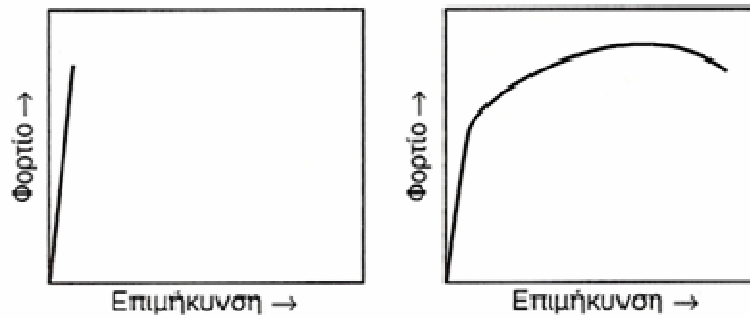
Στη μηχανική, δεν είναι επικίνδυνα μόνο τα οριακά φορτία που μπορούν να επιφέρουν θραύση στο υλικό, αλλά έχουν μεγάλη σημασία και τα φορτία στα οποία το υλικό αρχίζει και παρουσιάζει έντονες παραμορφώσεις, οι οποίες σε μεγάλο βαθμό προκαλούν μη αναστρέψιμες αλλαγές στη γεωμετρία του.

4.4.1 Βασικές μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών

Μια μηχανική δοκιμή από την οποία μπορούμε να λάβουμε μια ικανοποιητική εικόνα της συμπεριφοράς ενός υλικού, με τη μόνη εξαίρεση της εξαρτημένης από το χρόνο συμπεριφοράς τους, είναι το πείραμα του μονοαξονικού εφελκυσμού, από το οποίο προσδιορίζεται το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του. Οι παρακάτω παράμετροι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά των διαφόρων ναυπηγικών μεταλλικών υλικών όσον αφορά στην αντοχή τους:

1. Η ακαμψία, δηλαδή η επιμήκυνση (σύντμηση) ανά μονάδα φορτίου, που υπολογίζεται με το μέτρο ελαστικότητας.
2. Η τάση διαρροής, σ_Y , η οποία είναι το όριο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική περιοχή.
3. Η μέγιστη τάση εφελκυσμού, σ_{TS} , η οποία και ορίζει το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η κατασκευή.

Η καταγραφή της καμπύλης $F = f(\Delta l)$ ή $\sigma = f(\epsilon)$ είναι χαρακτηριστική του κάθε μεταλλικού υλικού. Στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζονται οι καμπύλες εφελκυσμού που αντιστοιχούν στα δύο κύρια είδη δυνατής συμπεριφοράς των υλικών σε εφελκυσμό.



Σχήμα 4-219: Χαρακτηριστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό. Συμπεριφορά ψαθυρού (αριστερά) και όλκιμου (δεξιά) υλικού

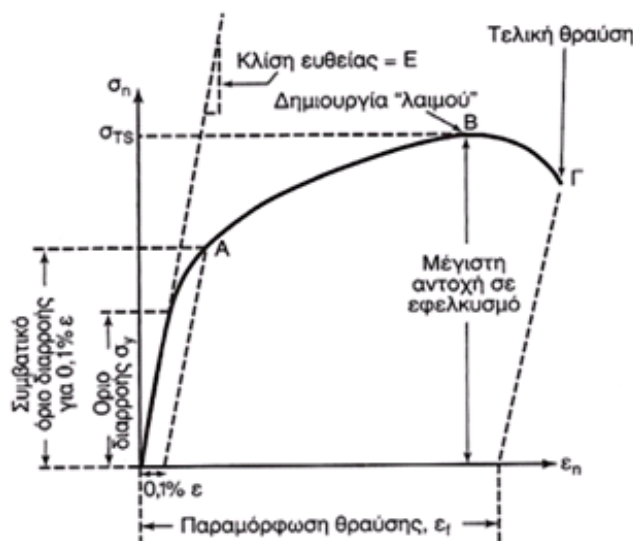
➤ **Συμπεριφορά ψαθυρού υλικού.**

Στην περίπτωση του ψαθυρού υλικού δεν υπάρχει πλαστική περιοχή, διότι η θραύση επέρχεται πριν την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης.

➤ **Συμπεριφορά όλκιμου υλικού.**

Η μόνιμη παραμόρφωση, συνήθως, συνοδεύεται από σκλήρυνση του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζει την πλειονότητα των μετάλλων και κραμάτων, καθώς και των κραμάτων αλουμινίου που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Πιο αναλυτικά, η καμπύλη μεταβολής φόρτισης σε σχέση με την επιβαλλόμενη αξονική μετάθεση των άκρων ενός δοκιμίου που υφίσταται μονοαξονικό εφελκυσμό έχει τη γενική μορφή, Σχήμα 4-3.

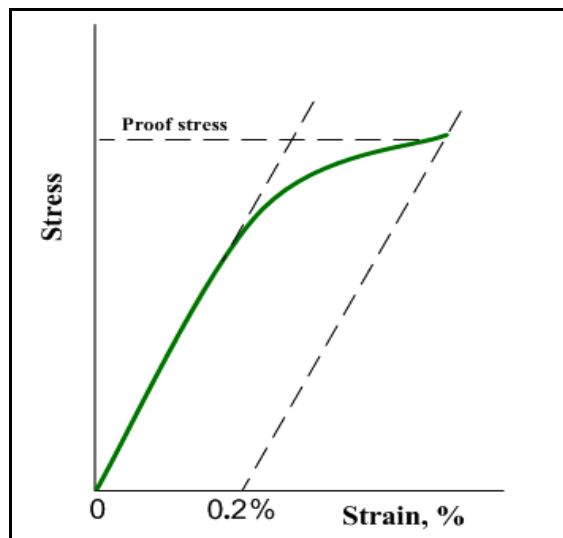


Σχήμα 4-3: Διάγραμμα σ - ϵ κατά τη δοκιμή εφελκυσμού

Τα στάδια από τα οποία αποτελείται η απόκριση του υλικού στον μονοαξονικό εφελκυσμό από μηδενικό αρχικό φορτίο έως την τελική θραύση του, χαρακτηρίζονται από ορισμένα βασικά μεγέθη, των οποίων οι ορισμοί δίνονται παρακάτω.

➤ **σ_y : Όριο διαρροής.** Είναι η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται η πλαστική παραμόρφωση. Η περιοχή διαρροής (yielding) χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων στο υλικό. Από την περιοχή αυτή και μετά το υλικό αρχίζει να «ρέει». Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο όριο ελαστικότητας E το υλικό έχει εξαντλήσει τις δυνατότητες του για ελαστικές (αντιστρεπτές) παραμορφώσεις και μικρή επιπλέον αύξηση των τάσεων οδηγεί τους στοιχειώδεις δομικούς λίθους του υλικού σε θέσεις ισορροπίας από τις οποίες δεν μπορούν να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση, έστω και αν αφαιρεθούν οι εξωτερικές τάσεις. Για τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής, οι παραμορφώσεις του υλικού είναι ελαστικές. Για τιμές μεγαλύτερες του ορίου διαρροής, οι συνολικές παραμορφώσεις του υλικού είναι το άθροισμα των ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων. Μετά την περιοχή διαρροής η παραμόρφωση αυξάνει πολύ πιο γρήγορα από την τάση και η καμπύλη σ - ϵ τείνει να γίνει σχεδόν οριζόντια. Αυτό παρατηρείται μέχρι το σημείο B του διαγράμματος του Σχήματος 4-3, μετά το οποίο η τάση αρχίζει να ελαττώνεται.

Όσον αφορά στο αλουμίνιο, η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή δεν πραγματοποιείται στιγμιαία, όπως στα κράματα σιδήρου, αλλά προοδευτικά, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να μετρηθεί με ακρίβεια το όριο διαρροής του. Έτσι έχει οριστεί συμβατικά, το όριο διαρροής να αντιστοιχεί στην καταπόνηση που επιφέρει μόνιμη παραμόρφωση 0.2%. Η τιμή $\sigma_{0.2\%}$, λαμβάνεται ως τομή της ευθείας παράλληλης προς την ευθεία της ελαστικής περιοχής ή της εφαπτόμενης στην αρχή της καμπύλης σ - ϵ για παραμόρφωση 0.2% και της καμπύλης εφελκυσμού: $\sigma=f(\epsilon)$, Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-4: Υπολογισμός συμβατικού ορίου διαρροής (proof stress), [49]

➤ **σ_{TS} : Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό.** Είναι η μέγιστη τάση στο διάγραμμα σ - ϵ , κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, πάνω από την οποία εμφανίζεται η δημιουργία λαιμού. Το σημείο B αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο, δηλαδή στη μέγιστη τάση, σ_{TS} , του υλικού, η οποία λέγεται και αντοχή του υλικού.

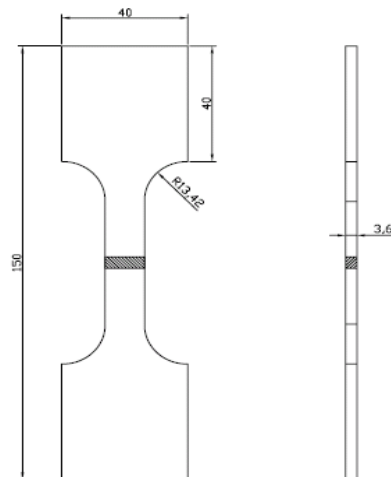
➤ **ϵ_f : Παραμόρφωση θραύσης.** Είναι η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά τη θραύση του υλικού. Η περιοχή μετά το σημείο B, όπου η συμβατική τάση ελαττώνεται και η συμβατική παραμόρφωση αυξάνει, τερματίζεται στο σημείο Γ, όπου το δοκίμιο αποχωρίζεται σε δύο κομμάτια, με αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού. Στην περιοχή αυτή έχουμε εμφανή σμίκρυνση της διατομής του δοκιμίου σε μια περιοχή του, δηλαδή δημιουργία λαιμού. Ακριβώς η σμίκρυνση αυτή της διατομής οδηγεί στη μείωση της συμβατικής τάσεως μετά το σημείο B, πράγμα που δεν ισχύει για την πραγματική τιμή

της. Η συμβατική τάση σ_f που αντιστοιχεί στο σημείο Γ λέγεται τάση θραύσης του υλικού και η αντίστοιχη παραμόρφωση, ϵ_f , παραμόρφωση θραύσης, ενώ η επί τοις εκατό έκφρασή της ονομάζεται ολκιμότητα του υλικού και είναι μέτρο της δυνατότητας παραμόρφωσης του υλικού στην πλαστική περιοχή.

➤ **E : Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young.** Η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης αποτελεί μέτρο της ακαμψίας του υλικού, είναι δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας του υλικού (modulus of elasticity ή Young’s modulus) ή αλλιώς συντελεστής αναλογίας, E, μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων. Προφανώς, το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται πειραματικά ως το πηλίκο σ/ϵ που αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο του ευθυγράμμου τμήματος.

4.4.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Βασικός σκοπός των δοκιμών που έγιναν με τυποποιημένα δοκίμια [56] τύπου “dogbone” είναι ο καθορισμός των βασικών ιδιοτήτων του νέου υβριδικού υλικού που προέκυψε από τη συγκόλληση των δύο κραμάτων αλουμινίου 1561 και 5083, και η σύγκρισή του με τα απλά δοκίμια “dogbone”, ενός υλικού. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν είχαν τις διαστάσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-5.



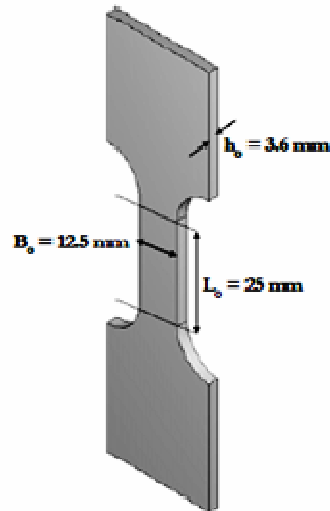
Σχήμα 4-5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις των ορθογώνιων δοκιμίων τύπου “dogbone” τα οποία εξετάστηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υβριδικού υλικού αλουμινίου 1561-5083 (διαστάσεις σε mm)

Από μία τυπική δοκιμή εφελκυσμού μπορούν να εξαχθούν τα διαγράμματα συμβατικών τάσεων - παραμορφώσεων (engineering stress-strain curve) και πραγματικών τάσεων - παραμορφώσεων (true stress-strain curve) του εξεταζόμενου υλικού. Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, το ένα άκρο του δοκιμίου είναι πακτωμένο, ενώ το άλλο εφελκύεται. Ταυτόχρονα, καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση του υλικού η οποία μετράται με τη βοήθεια επιμηκυνσιόμετρου, τοποθετημένου στο μέσον του δοκιμίου. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου. Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία θα συγκρατηθεί στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, έχουν ισχυρότερη διατομή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χαράχθηκαν και δύο γραμμές οι οποίες σηματοδοτούν την περιοχή της συγκόλλησης, όπου αναμένεται να επέλθει η θραύση.

Ο προσανατολισμός και η σωστή τοποθέτηση του ορθογωνικής διατομής δοκιμίου τύπου “dogbone” για την πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω των δοκιμών εφελκυσμού, μπορούν να επηρεάσουν τις μετρούμενες ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού. Πολλά πρότυπα του ASTM, όπως τα A370 [54], E8 [55] και B557 [56], παρέχουν τις απαραίτητες οδηγίες και την απαιτούμενη πληροφόρηση για την κατάλληλη επιλογή του προσανατολισμού των δοκιμίων σε σχέση με την κατεύθυνση εξέλασης του ελάσματος από το οποίο αυτά κόπηκαν ή με βάση τον κύριο άξονα διαμόρφωσης και επεξεργασίας των δοκιμίων με άλλους τρόπους παραγωγής. Επίσης, στα προαναφερθέντα πρότυπα, διευκρινίζονται επακριβώς και όλες οι τυποποιημένες διαστάσεις που πρέπει να έχουν τα δοκίμια εφελκυσμού τα οποία χρησιμοποιούνται στα πειράματα αυτά, όπως αυτές φαίνονται στο Σχήμα 4-5.

Για τον υπολογισμό των συμβατικών –και κατ’επέκταση και των πραγματικών– τάσεων και παραμορφώσεων που ασκούνται στο δοκίμιο είναι απαραίτητο να είναι γνωστές οι διαστάσεις, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-6. Αυτές είναι το αρχικό πάχος, h_0 και το αρχικό πλάτος, B_0 , και μήκος, L_0 , των δοκιμίων. Πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι το μήκος L_0 δεν είναι ούτε το μήκος όλου του δοκιμίου, έτσι όπως το τοποθετούμε στη συσκευή δοκιμών, ούτε το ελεύθερο μήκος του, το μήκος δηλαδή του τμήματός του που

βρίσκεται πέραν των αρπάγων της μηχανής. Το αρχικό μήκος μετρήσεως για τα δοκίμια εφελκυσμού, καθορίζεται σύμφωνα με κάποιους διεθνείς κανονισμούς [54, 55, 56].



Σχήμα 4-6: Οι απαιτούμενες διαστάσεις (αρχικό εμβαδό και μήκος μέτρησης) των δοκιμίων τύπου “dogbone” για τον υπολογισμό των πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων

Τα δεδομένα που εξήχθησαν από την πειραματική συσκευή για κάθε δοκιμή εφελκυσμού χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία, δίνουν κατευθείαν μια σχέση ανάμεσα στη μετατόπιση, δ , και τη δύναμη, P , όπου $P = P(\delta)$. Η συμβατική τάση και παραμόρφωση, σ_{eng} και ε_{eng} , υπολογίζονται αναλυτικά στη συνέχεια με βάση τις πρότυπες σχέσεις :

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\delta}{L_0}$$

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{A_0}$$

όπου A_0 και L_0 είναι το αρχικό εμβαδόν και μήκος μετρήσεως του δοκιμίου αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκε. Στη συνέχεια, υπολογίζονται η αντίστοιχη πραγματική τάση (true stress) και πραγματική παραμόρφωση (true strain) με βάση τις ακόλουθες σχέσεις :

$$\sigma_{tr} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng})$$

$$\varepsilon_{tr} = \ln(1 + \varepsilon_{eng})$$

Στην παρούσα εργασία, έγιναν πειράματα εφελκυσμού σε συνολικά 5 συγκολλητά δοκίμια “dogbone”, εκ των οποίων τα 4 αποτελούνταν από τα κράματα 1561-5083/H111 και το τελευταίο από τα κράματα 1561-5083/H321.

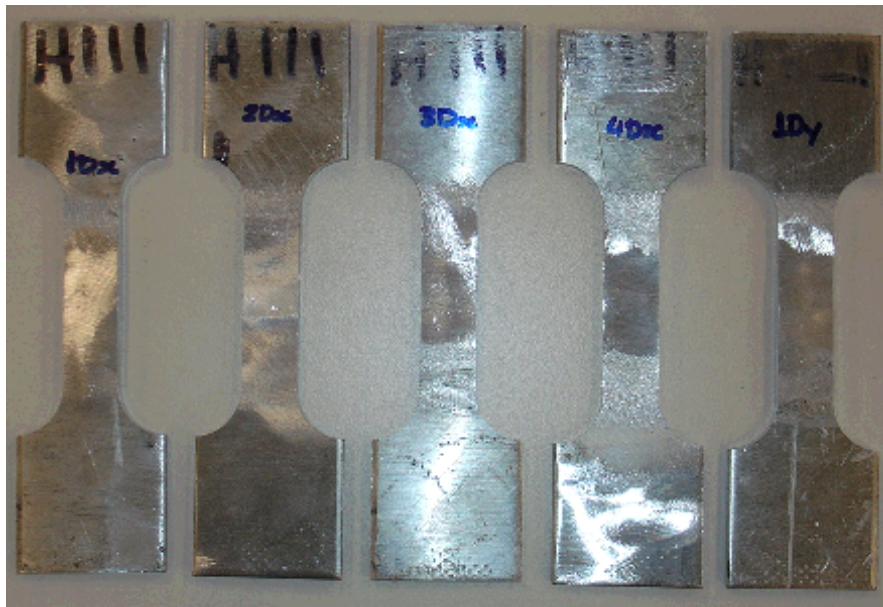
Η ονομασία των δοκιμίων είναι η εξής: κDx, όπου κ=1,2,3,4

x=H111

κDy, όπου κ=1

x=H321

Στην Εικόνα 4-19 φαίνεται η αρχική μορφή των δοκιμίων πριν τη θραύση.



Εικόνα 4-19: Δοκίμια dogbone πριν την έναρξη των πειραμάτων

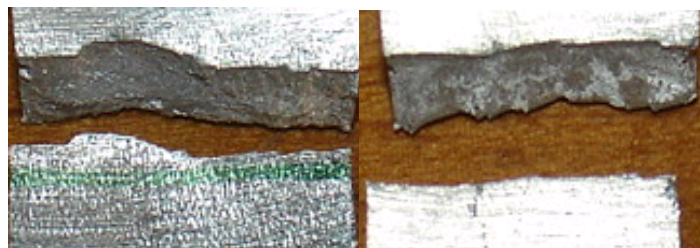
Στον Πίνακα 4-9, παρατίθενται αναλυτικά οι διαστάσεις των δοκιμίων “dogbone” που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά στο πάχος, ελήφθησαν μετρήσεις σε 4 σημεία κατά το μήκος του «λαιμού» του δοκιμίου, λόγω της ανομοιομορφίας του πάχους που υπήρχε στα περισσότερα δοκίμια. Έτσι, η τιμή του πάχους που αναφέρεται στη συνέχεια είναι ο μέσος όρος των παραπάνω τιμών.

Πίνακας 4-9: Κύριες διαστάσεις δοκιμίων “dogbone” που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑΤΟΣ [mm]	ΜΗΚΟΣ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑΤΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ ΣΤΗ ΜΕΣΗ [mm]	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ [mm]
1Dx	150	40	37	15	3.94
2Dx	150	39	37	15	3.98
3Dx	150	40	37	15	3.86
4Dx	150	40	36.5	15	3.88
1Dy	151	39.5	37	15	3.90

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, και μετά από παρατήρηση της επιφάνειας των δοκιμίων μετά τη θραύση, ήταν προφανές ότι όλα τα δοκίμια “dogbone” δεν ακολούθησαν την ίδια συμπεριφορά. Ύστερα από παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης, σε ορισμένα δοκίμια, έγινε αντιληπτή η ύπαρξη σημαντικού ποσοστού πορώδους στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυτές οι ατέλειες είναι πολύ πιθανόν να επηρέασαν τα πειραματικά αποτελέσματα και να κατέστησαν ορισμένα από τα δοκίμια ακατάλληλα για τον υπολογισμό του ορίου διαρροής και της τάσης θραύσης του εξεταζόμενου υλικού. Επίσης, υπήρχε ανομοιομορφία στο πάχος του λαιμού των δοκιμίων, καθώς και προϋπάρχουσες παραμορφώσεις από την κατεργασία τους, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ασφαλή διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου, δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα όλων των δοκιμίων στη διεξαγωγή ενός μέσου όρου αποτελεσμάτων της τάσης θραύσης και του ορίου διαρροής των υβριδικών υλικών.

Πιο αναλυτικά, τα δοκίμια που παρουσίασαν ομαλή επιφάνεια θραύσης και «σωστή» σχέση τάσης-παραμόρφωσης ήταν τα 3Dx και 1Dy, των οποίων οι επιφάνειες φαίνονται στις Εικόνες 4-20 έως 4-22.



Εικόνα 4-20: Τρόπος θραύσης που παρατηρήθηκε στα δοκίμια 3Dx (αριστερά), 1Dy (δεξιά)



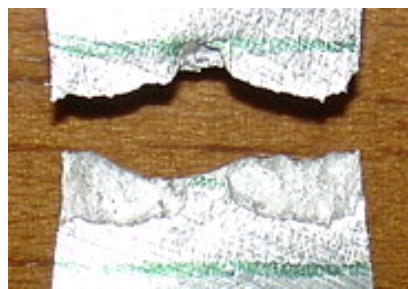
Εικόνα 4-21: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 3Dx



Εικόνα 4-22: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 1Dy

Τα αποτελέσματα των δύο αυτών δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συμβατικών και πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων για το συγκολλητό υλικό 1651-5083 (H111-H321), καθώς και για τον υπολογισμό του ορίου διαρροής και του μέτρου ελαστικότητας του υλικού.

Επίσης, για τον υπολογισμό του ορίου διαρροής και μέτρου ελαστικότητας του υλικού 1561-5083/H111, χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα του δοκιμίου 1Dx, το οποίο εμφάνισε σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά με το δοκίμιο 3Dx στην ελαστική περιοχή. Από την πλαστική περιοχή και έπειτα, όμως, η συμπεριφορά του σε θραύση ήταν κατώτερη του δοκιμίου 3Dx, για αυτό και δεν συνυπολογίσθηκε στην τάση θραύσης του υλικού. Το γεγονός αυτό, φαίνεται και από απλή παρατήρηση της επιφάνειας θραύσης που φαίνεται στην Εικόνα 4-23.



Εικόνα 4-23: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 1Dx

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, τα υπόλοιπα δύο -2Dx, 4Dx- εκ των πέντε δοκιμίων δεν παρουσίασαν τον «αναμενόμενο» τρόπο θραύσης, και έτσι δε συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του μέσου όρου τάσης και

παραμόρφωσης του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, στο δοκίμιο 2Dx, παρατηρήθηκε ύπαρξη σημαντικού ποσοστού πορώδους στην περιοχή της συγκόλλησης, όπου και έγινε η θραύση, Εικόνα 4-24. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πρόωρη θραύση του δοκιμίου, λίγο μετά την έξοδο από την ελαστική περιοχή. Στο δοκίμιο 4Dx, η θραύση συνέβη αρκετά νωρίτερα σε σχέση με το δοκίμιο 3Dx, και η επιφάνεια θραύσης παρουσίασε πλήθος ανωμαλιών, που την καθιστά ακατάλληλη για τη διεξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων, Εικόνα 4-25.



Εικόνα 4-24: Τρόπος θραύσης δοκιμίου 2Dx (δεξιά), ύπαρξη πορώδους στην περιοχή της θραύσης, λόγω της συγκόλλησης (αριστερά)



Εικόνα 4-25: Τρόπος θραύσης δοκιμίου 4Dx (δεξιά), ανώμαλη επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 4Dx (αριστερά)

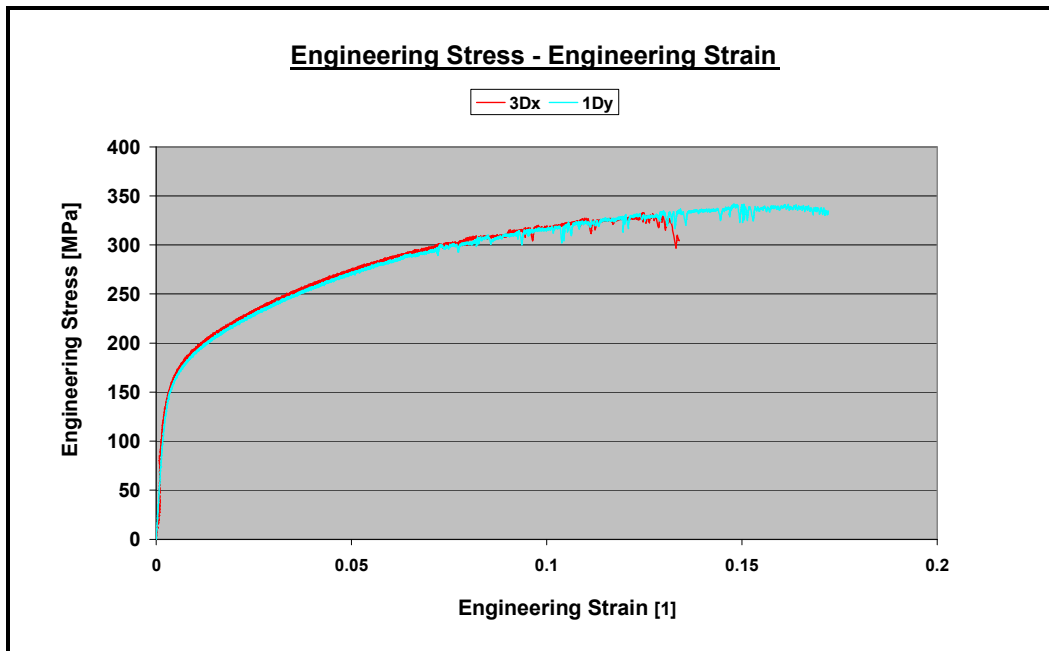
Στον Πίνακα 4-10 συνοψίζονται οι τιμές τάσεων-παραμορφώσεων μετά από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων εφελκυσμού στα συγκολλητά δοκίμια “dogbone” 3Dx και 1Dy, μέσω των σχέσεων που περιγράφηκαν παραπάνω.

Πίνακας 4-10: Αποτελέσματα συμβατικών και πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων υβριδικών δοκιμίων εφελκυσμού τύπου “dogbone” κατά τη θραύση

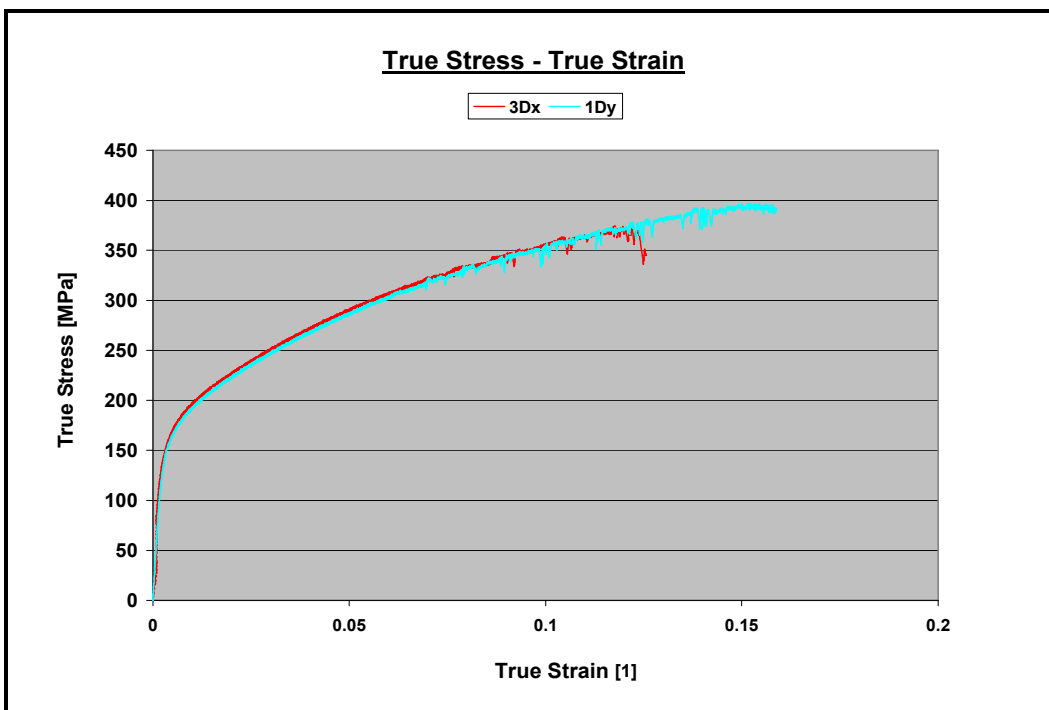
ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ/ ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ
	ϵ_{eng}	σ_{eng}	ϵ_{true}	σ_{true}
	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
1561-5083/H111: 3Dx	12.50	332.17	11.78	373.70
1561-5083/H321: 1Dy	15.06	340.32	14.02	391.58

Είναι γεγονός ότι η καμπύλη συμβατικών τάσεων-παραμορφώσεων που προκύπτει από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού δεν δίνει μια αληθινή ένδειξη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης ενός μεταλλικού υλικού, λόγω του ότι είναι βασισμένη μόνο στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου, οι οποίες όμως δεν παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του πειράματος, αλλά μεταβάλλονται συνεχώς. Για αυτό το λόγο, υπολογίζουμε τις τιμές των πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων, οι οποίες δίνουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, όσον αφορά στη συμπεριφορά και τις ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού μέσω της πειραματικής διαδικασίας. Έτσι, οι καμπύλες αυτές αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της πλαστικής ροής του υλικού.

Στα Σχήματα 4-7, 4-8 παρουσιάζονται οι καμπύλες συμβατικών και πραγματικών τάσεων παραμορφώσεων των δοκιμίων 3Dx και 1Dy, όπως προέκυψαν, αντίστοιχα.

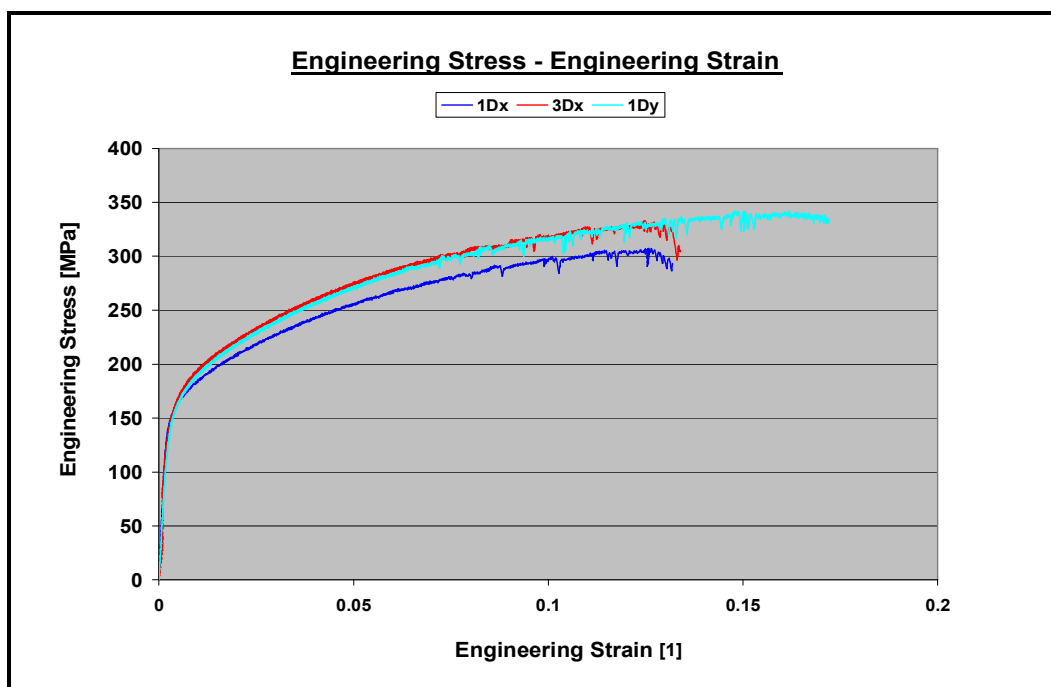


Σχήμα 4-7: Διάγραμμα συμβατικών τάσεων (Engineering Stress) – παραμορφώσεων (Engineering Strain) δοκιμίων 3Dx, 1Dy



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα πραγματικών τάσεων (true stress) – παραμορφώσεων (true strain) δοκιμίων 3Dx, 1Dy

Στη συνέχεια, με χρήση των αριθμητικών αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων συμβατικών τάσεων και παραμορφώσεων, υπολογίστηκε το όριο διαρροής των δοκιμίων “dogbone”, με σκοπό να γίνει σύγκριση με τα διαθέσιμα τεκμηριωμένα στοιχεία των ιδιοτήτων των κραμάτων 1561 [9] και 5083, καθώς και του κράματος της συγκόλλησης, 5183 [44]. Για τον υπολογισμό του ορίου διαρροής του υλικού 1561-5083/H321 χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο 1Dy, και για το 1561-5083/H111 τα δοκίμια 1Dx και 3Dx, που παρουσίασαν όμοια συμπεριφορά μέχρι και την ελαστική περιοχή, όπως φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα του Σχήματος 4-9.



Σχήμα 4-9: Διάγραμμα συμβατικών τάσεων (Engineering Stress) – παραμόρφωσεων (Engineering Strain) δοκιμίων 1Dx, 3Dx και 1Dy

Επίσης, με βάση το παραπάνω διάγραμμα, υπολογίστηκε και το μέτρο ελαστικότητας E (ή μέτρο Young). Πειραματικά το μέτρο ελαστικότητας, ορίζεται ως το πηλίκο σ/ϵ , το οποίο αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμικής ελαστικής περιοχής (ευθύγραμμο τμήμα), της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων. Έτσι, μετά από επεξεργασία τιμών του παραπάνω διαγράμματος, προέκυψε ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας για το υλικό 1561-5083/H111, ίσο με $E = 68.235 \text{ GPa}$. Αντίστοιχα, για το

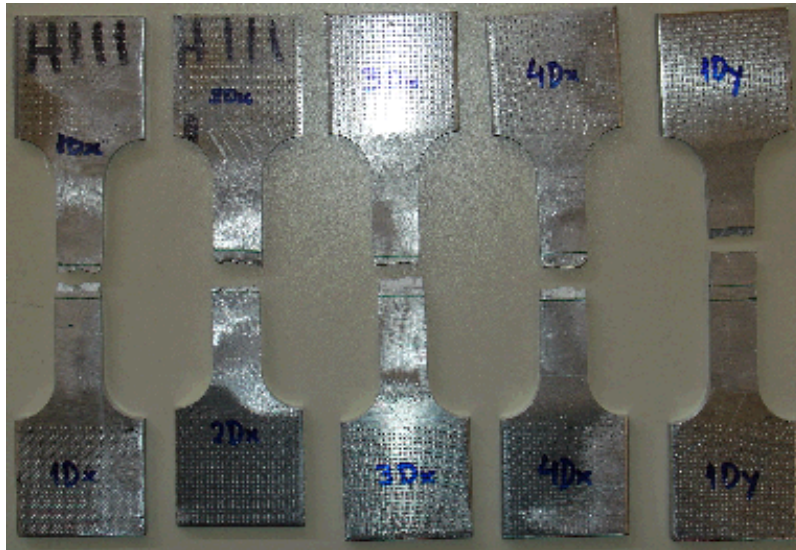
υλικό 1561-5083/H321, από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του 1Dy, προέκυψε μέτρο ελαστικότητας ίσο με $E = 64.86 \text{ GPa}$. Το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε βρίσκεται κοντά στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας του κράματος 1561 (65 GPa), αλλά χαμηλότερο από το μέσο μέτρο ελαστικότητας του ναυπηγικού κράματος 5083 (72 GPa).

Όσον αφορά στο όριο διαρροής, αυτό υπολογίσθηκε συμβατικά, στο σημείο τομής της παράλληλης στην ελαστική περιοχή στο σημείο παραμόρφωσης 0.2%, με την καμπύλη εφελκυσμού $\sigma = f(\epsilon)$. Τα αποτελέσματα παρατίθενται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 4-11, μαζί με τη σύγκριση με τεκμηριωμένα στοιχεία απλών κραμάτων αλουμινίου.

Πίνακας 4-11: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων υβριδικού υλικού 1561-5083, όπως προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα, με ήδη τεκμηριωμένα στοιχεία γνωστών κραμάτων

ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ
	σ_{TS}	σ_Y
	[MPa]	[MPa]
1561-5083/H111	332.17	159.24
1561-5083/H321	340.32	162.05
Απλό κράμα 1561	332.20	186.20
Κράμα συγκόλλησης 5183	275	125
5083/H111	300	125
5083/H321	330	215

Στην Εικόνα 4-26 φαίνεται η τελική μορφή των δοκιμίων “dogbone”, μετά τη θραύση. Είναι φανερό, πως στα περισσότερα δοκίμια η θραύση έγινε στην περιοχή της συγκόλλησης (στη ΘΕΖ), όπως και ήταν αναμενόμενο, λόγω των παραμενουσών τάσεων και ατελειών της συγκόλλησης. Το τελευταίο δοκίμιο 1Dy, καταστράφηκε («έσπασε») σε διαφορετικό σημείο, πάνω από την περιοχή της συγκόλλησης.



Εικόνα 4-26: Δοκίμια “dogbone” μετά τη θραύση

4.5 2^η Ομάδα Πειραμάτων: Εφελκυστικές Δοκιμές σε Συγκολλητά CT Δοκίμια με Προϋπάρχουσα Ρωγμή

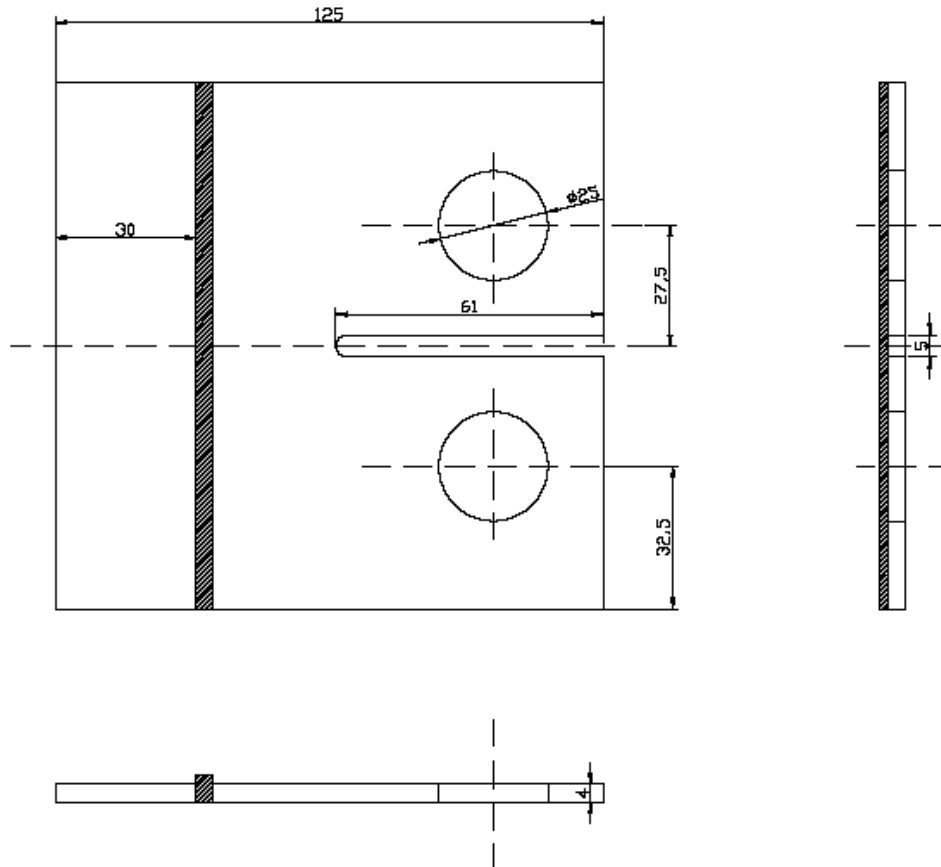
4.5.1 Συγκολλητά CT δοκίμια δύο κραμάτων αλουμινίου

Στη δεύτερη πειραματική ομάδα, πραγματοποιήθηκαν εφελκυστικές δοκιμές σε συγκολλητά CT δοκίμια, που αποτελούνταν από δύο κράματα αλουμινίου: 5083/H321 και 1561. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε 6 CT δοκίμια μήκους 125 mm και πλάτους 120 mm, στα οποία είχε κατασκευαστεί τεχνητή ρωγμή μήκους 60 mm, στη μεριά του ναυπηγικού κράματος 5083. Το υπόλοιπο έλασμα αποτελείτο από το κράμα 1561.

Σκοπός των πειραμάτων είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά του υβριδικού υλικού 5083-1561 σε εφελκυσμό, να παρατηρηθεί ο τρόπος διάδοσης της ρωγμής σε αυτό και να εκτιμηθεί ο ρόλος της συγκόλλησης ως ενίσχυση έναντι της διάδοσης της ρωγμάτωσης. Επίσης, μέσω της πειραματικής διαδικασίας κατέστη δυνατό να γίνει σύγκριση με αντίστοιχα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο άλλης διπλωματικής

εργασίας, στα οποία η προϋπάρχουσα ρωγμή βρισκόταν στο τμήμα του κράματος 1561 [8].

Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζονται οι διαστάσεις και τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.



Σχήμα 4-10: Σκαριφηματική απεικόνιση συγκολλητών δοκιμίων CT κράματων 5083, 1561. Η τεχνητή ρωγμή βρίσκεται στην πλευρά του υλικού 5083

Ως ονομασία των παραπάνω δοκιμίων επιλέχθηκε η εξής: **wCTabi**

όπου a: υλικό που έχει τη ρωγμή, (a=y για το υλικό 5083/H321, a=z για το 1561)

b: υλικό πίσω τμήματος, (b=y για το υλικό 5083/H321, b=z για το 1561)

i: (1,2,...,6), ο αριθμός των δοκιμίων

w: welded (χαρακτηρισμός συγκολλητού δοκιμίου)

Όπως συμπεραίνουμε από τα παραπάνω, τα δοκίμια που εξετάστηκαν θα έχουν την ονομασία **wCTyz_i**, $i: (1,2,\dots,6)$.

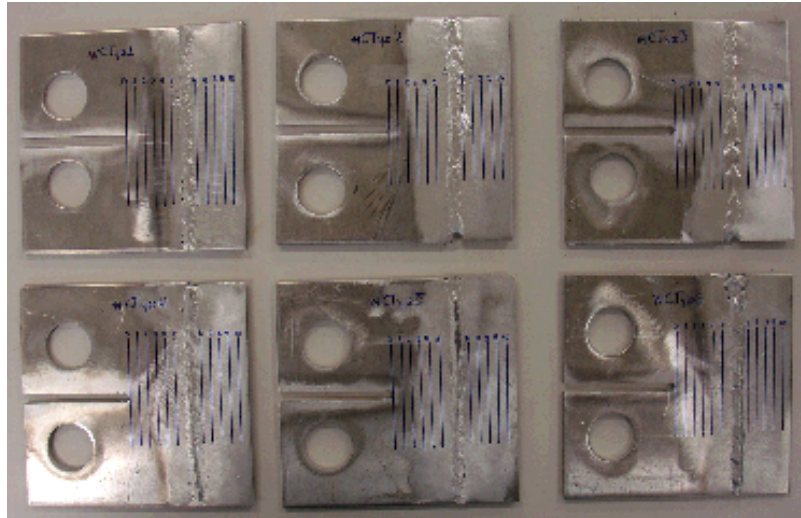
Οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων αυτής της υποομάδας, καθώς και τα χαρακτηριστικά των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν, παρατίθενται στον Πίνακα 4-12:

Πίνακας 4-12: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συγκολλητών μη ενισχυμένων συμπαγών δοκιμίων εφέλκυσμού CT και των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΠΑΧΟΣ [mm]	ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΗΣ [mm]	ΑΝΟΙΓΜΑ ΡΩΓΜΗΣ [mm]
wCTyz1	124	119	4.0	60	5.3
wCTyz2	124	119	4.1	60	4.9
wCTyz3	125	120	4.0	60	5.0
wCTyz4	124	120	4.0	60	5.0
wCTyz5	125	120	4.0	60	4.7
wCTyz6	125	120	4.0	60	4.7

Η εκτέλεση των δοκιμών έγινε διατηρώντας σταθερό ρυθμό μεταβολής μετατόπισης (ταχύτητα απομάκρυνσης σιαγόνων) ίσο με 1.0 mm/min. Η δειγματοληψία της μηχανής πραγματοποιήθηκε με ρυθμό 1 τιμή/sec. Κατά την πειραματική διαδικασία, γινόταν λήψη φωτογραφιών ανά 5 δευτερόλεπτα. Για κάθε δοκίμιο θα παρατίθεται σειρά φωτογραφιών, στις οποίες απεικονίζονται τα βασικά στάδια διάδοσης της ρωγμής.

Στην Εικόνα 4-27, φαίνεται η αρχική μορφή των έξι δοκιμίων πριν την έναρξη των πειραμάτων.



Εικόνα 4-27: Εικόνα των συγκολλητών δοκιμίων wCTyzi ($i=1, \dots, 6$) πριν την έναρξη των δοκιμίων

Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή της πορείας διάδοσης της ρωγμής ξεχωριστά για κάθε δοκίμιο και σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων για όλα τα δοκίμια. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα δοκίμια έχουν χαραχθεί ευθείες παράλληλες στη συγκόλληση, ανά 5 mm, που ξεκινούν από την επαφόμενη του άκρου της ρωγμής, έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερα η παρατήρηση της διάδοσης της ρωγμής καθώς και η σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμίων μεταξύ τους.

- **Δοκίμιο wCTyzi1**

Στο πρώτο δοκίμιο που εξετάστηκε η ρωγμή κατάφερε να διαπεράσει τη συγκόλληση και να διαδοθεί και στο πίσω έλασμα. Πιο αναλυτικά, η έναρξη της θράυσης έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης, [12.20 kN, 3.55 mm]. Αρχικά, παρατηρήθηκε πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο, χωρίς να έχει γίνει ορατή η έναρξη διάδοσης της ρωγμής. Η ρωγμή ξεκίνησε να διαδίδεται στο σημείο [10.77 kN, 7.14 mm], υπό γωνία προς τη συγκόλληση και με φορά προς τα άνω. Στη συνέχεια, η ρωγμή ευθυγραμμίζεται και συνεχίζει με καθοδική φορά μέχρι την ευθεία 1 (5 mm). Με τον ίδιο ρυθμό και την ίδια διεύθυνση συνεχίζει μέχρι την ευθεία 2, και στη συνέχεια συνεχίζει κάθετα προς τη συγκόλληση μέχρι την ευθεία 5. Από εκείνο το σημείο και έπειτα

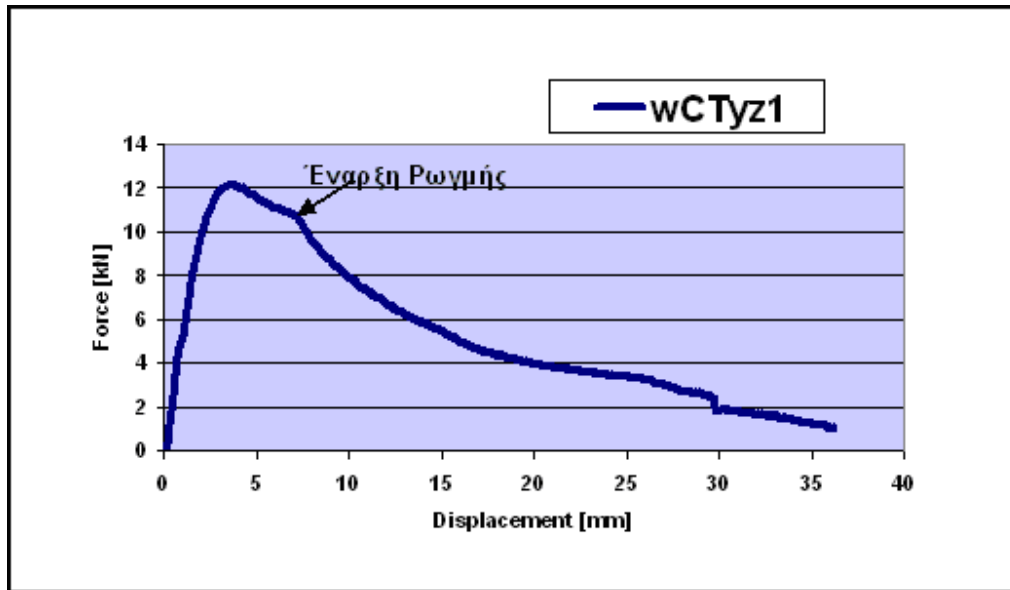
συνεχίζει με «ανοδική» φορά μέχρι τη ραφή της συγκόλλησης, όπου και συναντά μεγάλη δυσκολία στη διάδοση. Μόλις φθάσει στη συγκόλληση [3.4 kN], συνεχίζει με «ανοδική» πορεία έως ότου τη διαπεράσει εντελώς. Μετά τη συγκόλληση συνεχίζει διαγώνια προς τα πάνω στο πίσω έλασμα του υλικού 1561.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-28 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-28: Στάδια διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο wCTyz1: (α) έναρξη ρωγμής αρχικά προς τα άνω και μετά προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, (γ) αλλαγή φοράς κοντά στη ραφή της συγκόλλησης, (δ) άφιξη ρωγμής στη συγκόλληση, (ε) η ρωγμή διαπερνά τη συγκόλληση υπό γωνία, (στ) συνέχιση διάδοσης υπό γωνία στο πίσω έλασμα και ολοκλήρωση του πειράματος

Στο Σχήμα 4-11 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου wCTyz1, στο οποίο είναι φανερό το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης, καθώς και το σημείο έναρξης της ρωγμής.

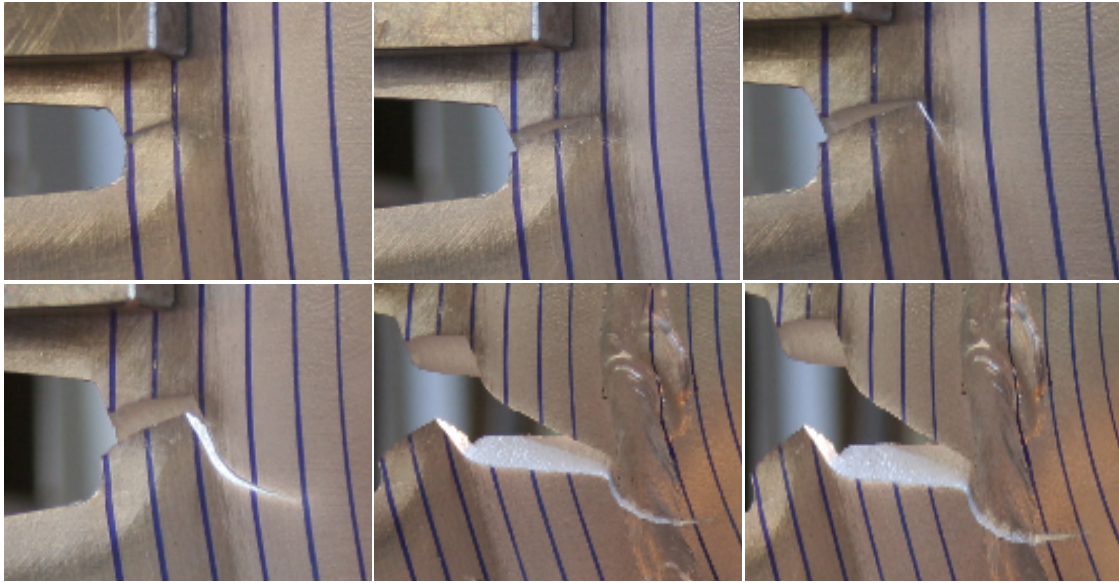


Σχήμα 4-11: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του συγκολλητού δοκιμίου wCTyz1

▪ Δοκίμιο wCTyz2

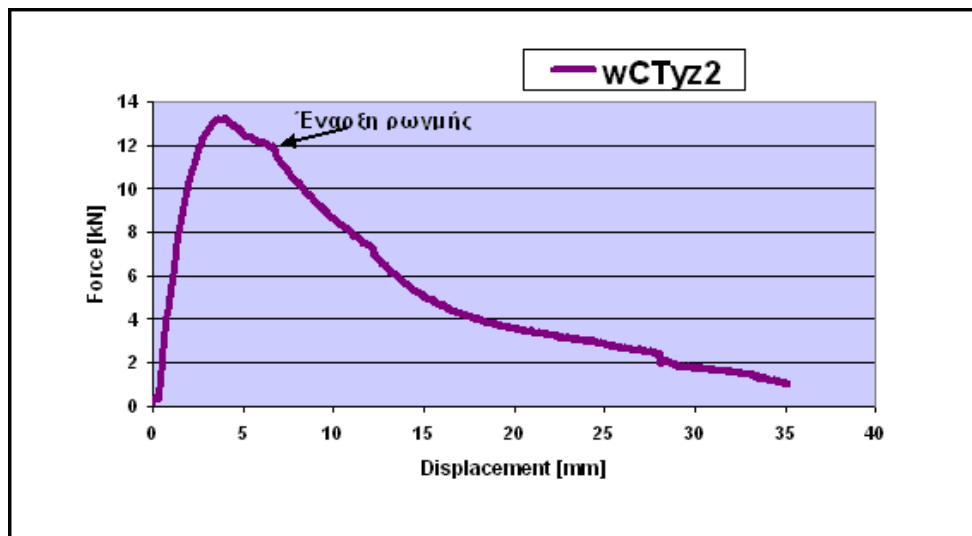
Το δεύτερο δοκίμιο που εξετάστηκε επέδειξε παρόμοια συμπεριφορά με το wCTyz1, καθώς και σε αυτό η ρωγή διαπέρασε τη συγκόλληση. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης ήταν στα [13.22 kN, 3.93 mm], όπου όλο το φορτίο λήφθηκε ως πλαστική παραμόρφωση. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο [12.07 kN, 6.29 mm], διαγώνια προς τα πάνω μέχρι την ευθεία 1. Στη συνέχεια, η ρωγή ευθυγραμμίστηκε και στην ευθεία 2 παίρνει απότομη κλίση προς τα κάτω. Στη συνέχεια, διαδίδεται υπό μικρότερη κλίση σε σχέση την προηγούμενη, με καθοδική φορά. Με τον ίδιο τρόπο διαδίδεται έως την ευθεία 5. Κοντά στη ραφή της συγκόλλησης συναντά σημαντικό εμπόδιο, έως ότου φθάνει στο άκρο της ραφής [3.15 kN]. Σε εκείνο το σημείο διαδίδεται προς τα κάτω και στη συνέχεια υπό γωνία προς τη ραφή. Έπειτα, περνά απότομα τη συγκόλληση και συνεχίζει να διαδίδεται στο πίσω έλασμα σχεδόν κάθετα σε αυτή.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-29 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-29: Στάδια διάδοσης ρωγμής wCTyz2: (α) έναρξη ρωγμής με φορά προς τα άνω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα άνω, (γ) απότομη αλλαγή φοράς ρωγμής προς τα κάτω, (δ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής υπό γωνία προς τη συγκόλληση, (ε) η ρωγή διαπερνά τη συγκόλληση υπό γωνία, (στ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής στο πίσω έλασμα και ολοκλήρωση του πειράματος

Στο Σχήμα 4-12 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου wCTyz2, στο οποίο είναι φανερό το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης, καθώς και το σημείο έναρξης της ρωγμής.

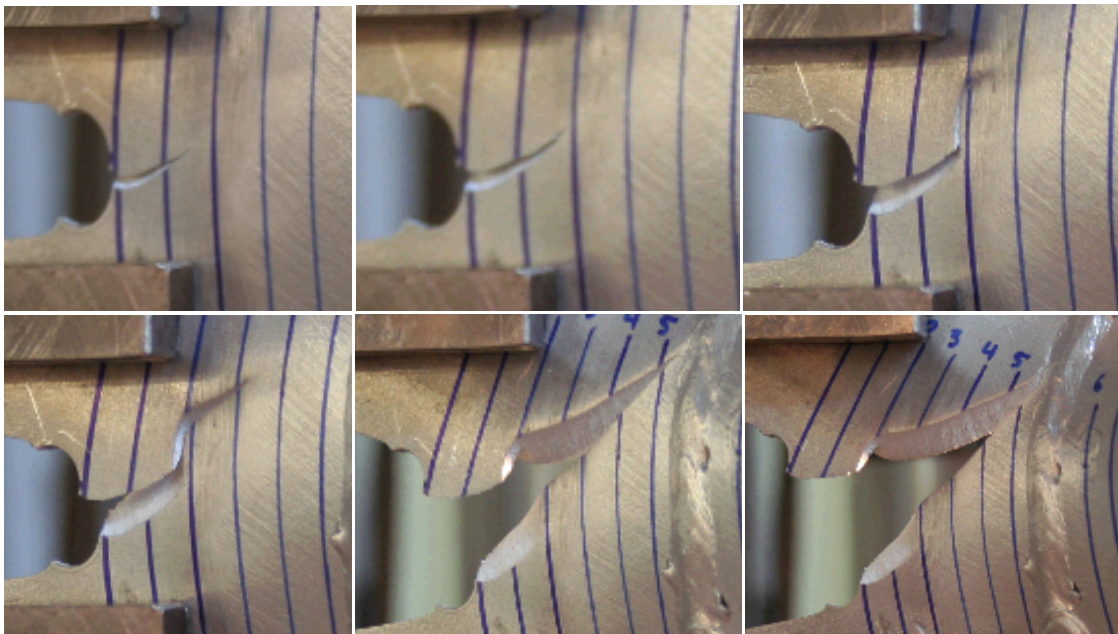


Σχήμα 4-12: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του συγκολλητού δοκιμίου wCTyz2

▪ **Δοκίμιο wCTyz3**

Στο τρίτο δοκίμιο αυτής της ομάδας που εξετάστηκε, η ρωγμή δεν κατάφερε να διαπεράσει τη συγκόλληση. Πιο αναλυτικά, το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης ήταν στα [11.98 kN, 3.19 mm], όπου όλο το φορτίο λήφθηκε ως πλαστική παραμόρφωση. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο [9.82 kN, 8.51 mm], σε μικρότερο φορτίο σε σχέση με τα προηγούμενα δύο δοκίμια. Η ρωγμή ξεκίνησε από το μέσο της τεχνητής ρωγμής διαγώνια με φορά προς τα πάνω. Μεταξύ των ευθειών 1 και 2 διαδόθηκε απότομα προς τα πάνω, παράλληλα προς τη συγκόλληση. Έπειτα, γύρισε πάλι διαγώνια σε σχέση με τη συγκόλληση και συνέχισε με αυξημένη κλίση μέχρι τις ευθείες 4 και 5. Σε φορτίο 2.95 kN η ρωγμή φθάνει στη ραφή της συγκόλλησης και, μετά από σημαντική καθυστέρηση, αρχίζει να διαδίδεται παράλληλα προς τη συγκόλληση, χωρίς να τη διαπεράσει [2.6 kN]. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε πως το περισσότερο φορτίο λήφθηκε υπό τη μορφή πλαστικής παραμόρφωσης στο δοκίμιο, γεγονός το οποίο είναι φανερό και από την τελική μορφή του μετά τη ολοκλήρωση της δοκιμής.

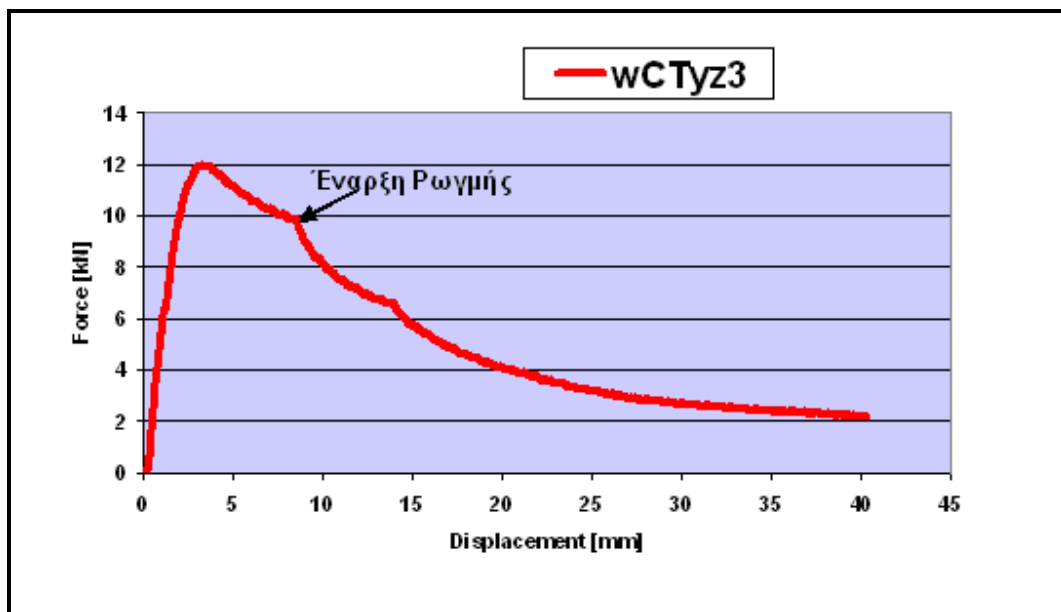
Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-30 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-30: Στάδια διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο wCTyz3: (α) έναρξη ρωγμής με φορά προς τα άνω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα άνω, (γ) απότομη αλλαγή φοράς ρωγμής προς τα άνω, παράλληλα προς τη συγκόλληση, (δ) συνέχιση διάδοσης

ρωγμής υπό γωνία προς τη συγκόλληση, (ε) η ρωγμή φθάνει στο άκρο της ραφής της συγκόλλησης, (στ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής παράλληλα προς τη συγκόλληση.

Στο Σχήμα 4-13 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου wCTyz3, στο οποίο είναι φανερό το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης, καθώς και το σημείο έναρξης της ρωγμής.



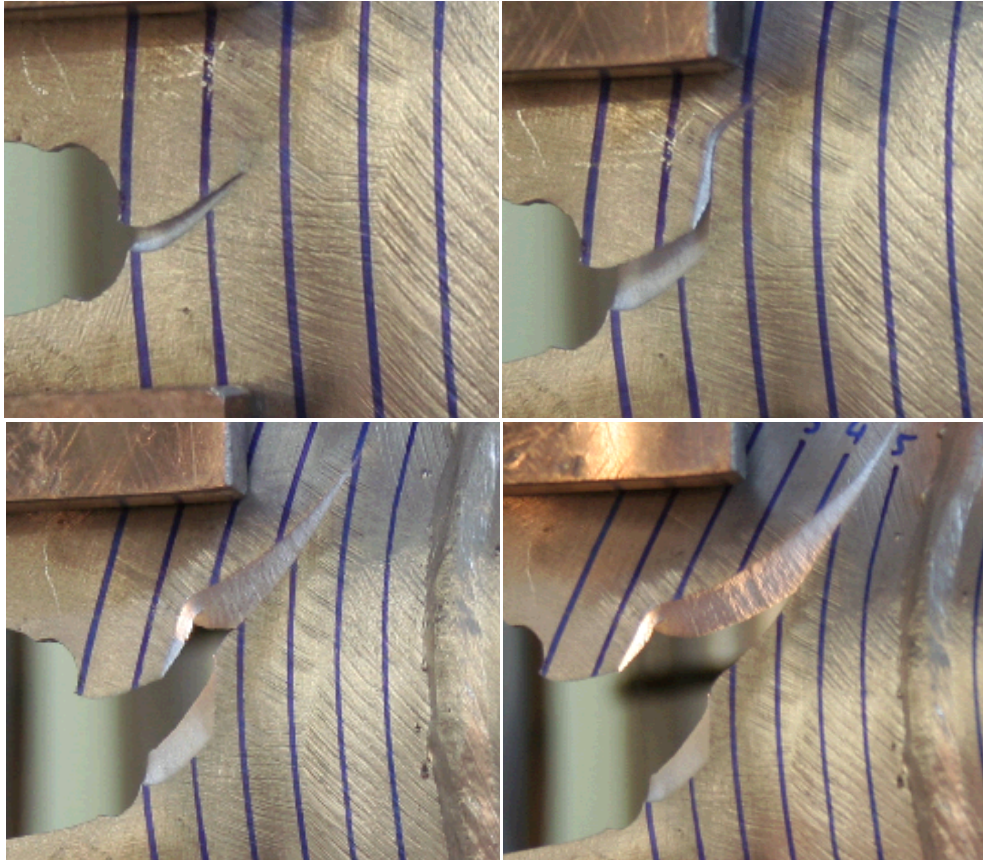
Σχήμα 4-13: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του συγκολλητού δοκιμίου wCTyz3

▪ Δοκίμιο wCTyz4

Στο δοκίμιο wCTyz4 η έναρξη της θραύσης γίνεται στο σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης [12.23 kN, 3.08 mm], όπου παρατηρείται μόνο πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο [10.86 kN, 6.53 mm]. Η διάδοση ξεκίνησε κάθετα προς τη συγκόλληση και στη συνέχεια αποκτά ανοδική πορεία μέχρι την ευθεία 1. Μεταξύ των ευθειών 1 και 2 διαδόθηκε απότομα προς τα πάνω, παράλληλα προς τη συγκόλληση. Έπειτα, έστριψε πάλι διαγώνια σε σχέση με τη συγκόλληση και συνέχισε να διαδίδεται με τον ίδιο τρόπο μέχρι την ευθεία 4. Μεταξύ των ευθειών 4 και 5 η ρωγμή καθυστερεί και στη συνέχεια αρχίζει να διαδίδεται προς τα πάνω, σε διεύθυνση παράλληλη προς τη συγκόλληση, χωρίς να τη διαπεράσει. Στην

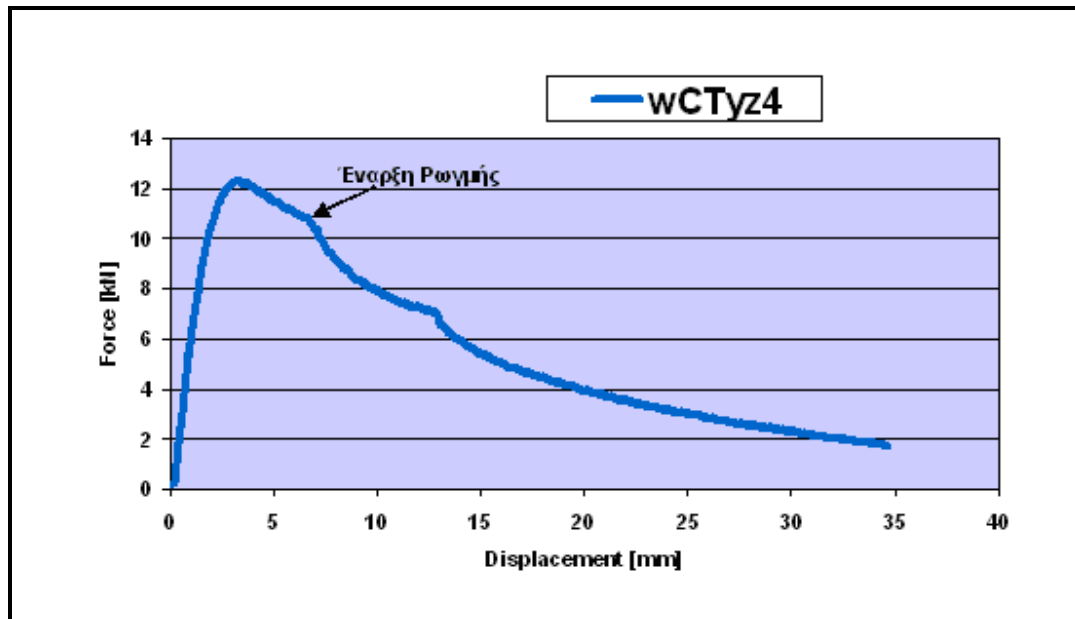
περίπτωση αυτού του δοκιμίου, παρατηρούμε ότι η ρωγμή δεν κατάφερε να φθάσει στη ραφή της συγκόλλησης.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-31, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-31: Στάδια διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο wCTyz4: (α) έναρξη ρωγμής με φορά προς τα άνω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα άνω και αλλαγή φοράς, (γ) συνέχιση διάδοσης προς τα άνω, (δ) διαδόση παράλληλα προς τη ραφή της συγκόλλησης και ολοκλήρωση του πειράματος

Στο Σχήμα 4-14, φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου wCTyz4, στο οποίο είναι φανερό το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης, καθώς και το σημείο έναρξης της ρωγμής.

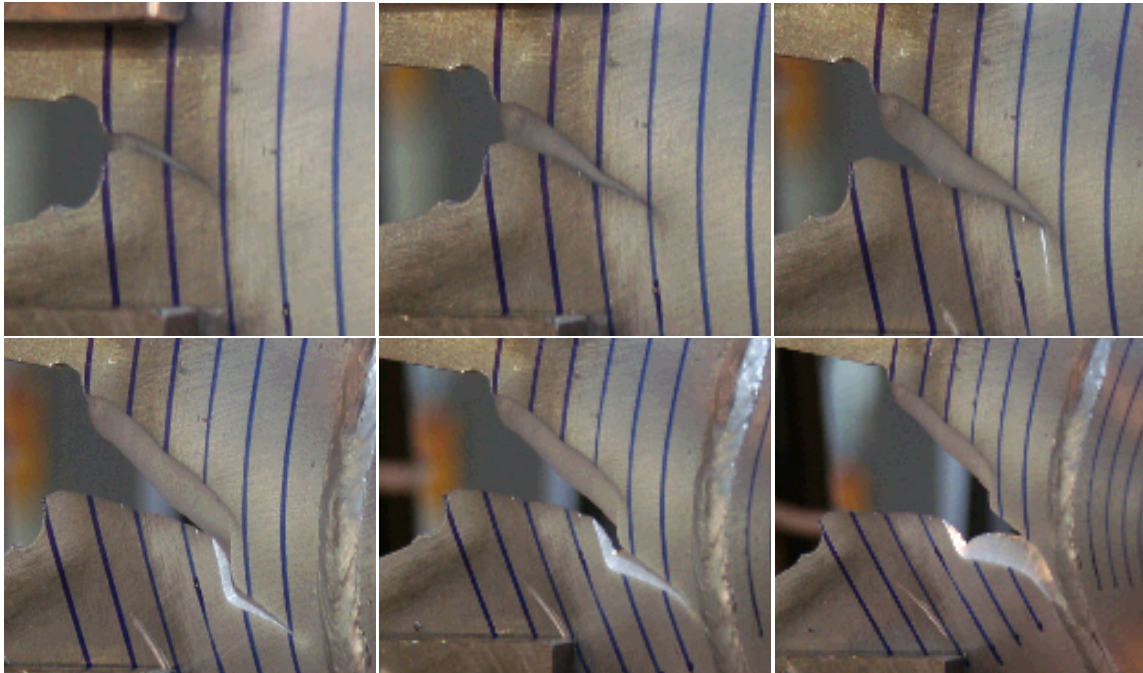


Σχήμα 4-14: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του συγκολλητού δοκιμίου wCTyz4

▪ Δοκίμιο wCTyz5

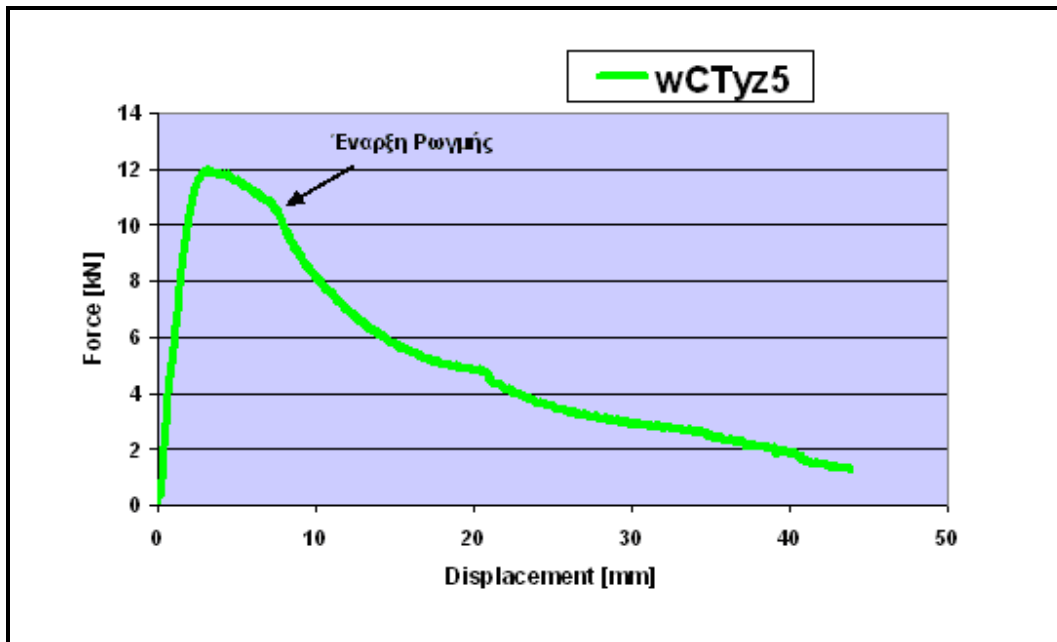
Στο δοκίμιο wCTyz5 η έναρξη της θραύσης γίνεται στο σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης [11.98 kN, 3.16 mm], όπου παρατηρείται μόνο πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο. Η ρωγμή έγινε ορατή στο σημείο [10.42 kN, 7.71 mm]. Η διάδοση ξεκίνησε περί το κέντρο του άκρου της τεχνητής ρωγμής, κάθετα προς τη συγκόλληση, και στη συνέχεια αποκτά καθοδική πορεία μέχρι την ευθεία 1. Στη συνέχεια, η κλίση αυξάνεται ελαφρώς και συνεχίζει μέχρι την ευθεία 2. Από εκείνο το σημείο και μετά, η ρωγμή συνεχίζει να διαδίδεται προς τα κάτω με μικρότερη κλίση. Μεταξύ των ευθειών 3 και 4 η ρωγμή συναντά δυσκολία και παίρνει απότομη κλίση προς τα κάτω, παράλληλα προς τη συγκόλληση. Συνεχίζει καθοδική πορεία μέχρι να φθάσει στη ρίζα της συγκόλλησης την οποία διασχίζει υπό γωνία. Τελικά, στα μέσα της ραφής, αποκτά κλίση παράλληλη στη διεύθυνση της φόρτισης και διαδίδεται προς τα κάτω μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος. Στην περίπτωση αυτού του δοκιμίου, παρατηρούμε ότι η ρωγμή κατάφερε να φθάσει στη ραφή της συγκόλλησης, αλλά δεν την διαπέρασε πλήρως.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-32, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-32: Στάδια διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο wCTyz5: (α) έναρξη ρωγμής με φορά προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, (γ) απότομη αλλαγή φοράς ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα προς τη συγκόλληση, (δ) στροφή ρωγμής υπό γωνία προς τη συγκόλληση (ε) η ρωγμή φθάνει στο άκρο της ραφής της συγκόλλησης, (στ) η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα προς τη φόρτιση στο μέσο της ραφής και με φορά προς τα κάτω

Στο Σχήμα 4-15 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου wCTyz5, στο οποίο είναι φανερό το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης, καθώς και το σημείο έναρξης της ρωγμής.

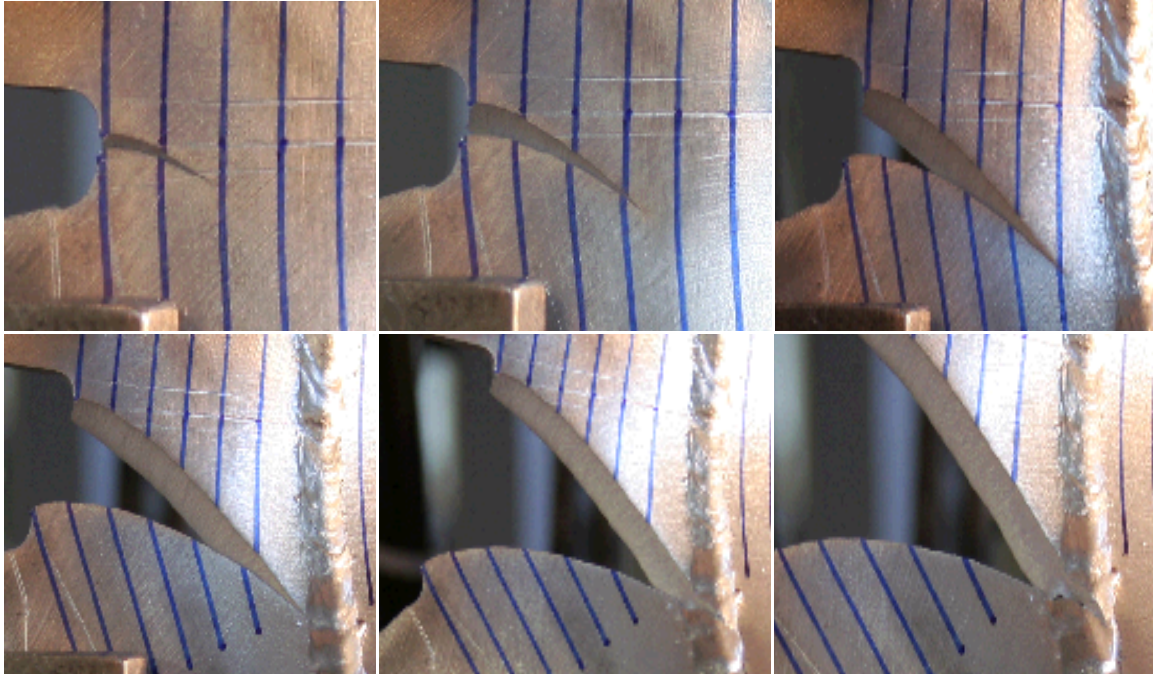


Σχήμα 4-15: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του συγκολλητού δοκιμίου wCTyz5

- **Δοκίμιο wCTyz6**

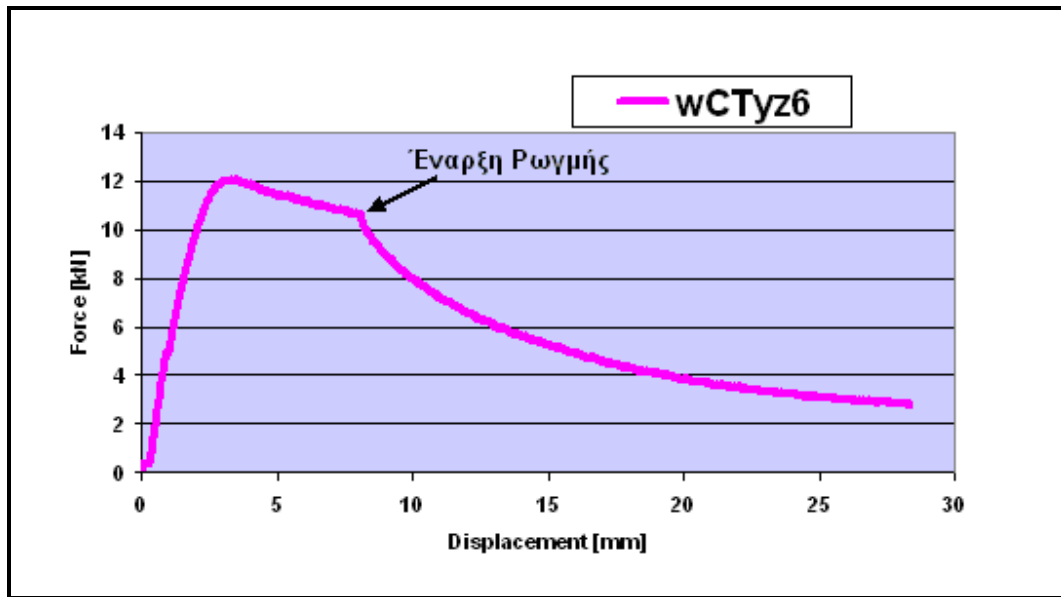
Στο δοκίμιο wCTyz6 η έναρξη της θραύσης γίνεται στο σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης [12.10 kN, 3.35 mm], όπου παρατηρείται μόνο πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο. Η ρωγμή έγινε ορατή στο σημείο [10.60 kN, 8.10 mm]. Η διάδοση ξεκίνησε περί το κέντρο του άκρου της τεχνητής ρωγμής, με καθοδική φορά και υπό κλίση προς τη συγκόλληση. Μετά την ευθεία 1 (5 mm), η κλίση αυξήθηκε και η διάδοση της ρωγμής συνέχιστηκε με τον ίδιο τρόπο μέχρι το άκρο της ραφής της συγκόλλησης. Η ομαλή πορεία της ρωγμής φαίνεται και από τη μορφή του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-16. Ακολούθως, ξεκινά να διαδίδεται υπό γωνία προς τα κάτω, επάνω στη ραφή της συγκόλλησης. Συναντά σημαντικό εμπόδιο στα μέσα της ραφής και η διάδοση καθυστερεί σημαντικά. Τελικά, στο άκρο της ραφής της συγκόλλησης αποκτά κλίση προς τα κάτω και διαδίδεται παράλληλα προς αυτήν, μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-33, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-33: Στάδια διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο wCTyz6: (α) έναρξη ρωγμής με φορά προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, (γ) η ρωγμή πλησιάζει την ραφή της συγκόλλησης, (δ) άφιξη ρωγμής στη ραφή της συγκόλλησης, (ε) η ρωγμή διαπερνά τη συγκόλληση υπό γωνία, (στ) διάδοσης ρωγμής παράλληλα επάνω στη συγκόλληση με φορά προς τα κάτω, και ολοκλήρωση του πειράματος

Στο Σχήμα 4-16 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου wCTyz6, στο οποίο είναι φανερό το σημείο μέγιστης δύναμης-μετατόπισης θραύσης, καθώς και το σημείο έναρξης της ρωγμής.



Σχήμα 4-16: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του συγκολλητού δοκιμίου wCTyz6

4.5.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων για τα συγκολλητά δοκίμια wCTyzi

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν σε αυτή την πειραματική ομάδα επέδειξαν παραπλήσια συμπεριφορά κατά τη διάδοση της ρωγμής μέχρι τη συγκόλληση, αλλά διαφορετική όσον αφορά στη διάδοση στη ραφή της συγκόλλησης. Πιο συγκεκριμένα, σε δύο δοκίμια η ρωγμή δεν κατάφερε να διαπεράσει τη συγκόλληση, ενώ στα υπόλοιπα 4 συνέβη το αντίθετο. Η αστοχία της συγκόλλησης συνέβαινε είτε με ολική διαπέρασή της από τη ρωγμή, είτε με διάδοση της ρωγμής μέχρι το μέσο της, παράλληλα στη φόρτιση.

Όσον αφορά στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης, παρατηρήθηκε πως το μέγιστο φορτίο, που κανονικά αντιστοιχεί στο σημείο θραύσης του δοκιμίου, υπήρχε μόνο πλαστική παραμόρφωση στο δοκίμιο και η ρωγμή δεν είχε γίνει ακόμα ορατή. Η έναρξη της ρωγμής γινόταν σε σημείο κατώτερο του μέγιστου φορτίου, το οποίο είναι προφανές και στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης του κάθε δοκιμίου. Η μεγάλη πλαστική παραμόρφωση που δέχθηκε το δοκίμιο οφείλεται στη μεγάλη ολκιμότητα του υλικού 5083 από το οποίο αποτελείται το τμήμα της τεχνητής ρωγμής του δοκιμίου, το οποίο δέχεται και το περισσότερο φορτίο. Η ικανότητά του να δέχεται μεγάλη παραμόρφωση έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της έναρξης της ρωγμής και τη μεγάλη έκταση πλαστικής παραμόρφωσης στην τελική μορφή του δοκιμίου.

Γενικά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας των δοκιμίων wCTyzi, ($i = 1, \dots, 6$) έδειξαν ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών παρουσίασε παρόμοια χαρακτηριστικά και φαινόμενα, τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

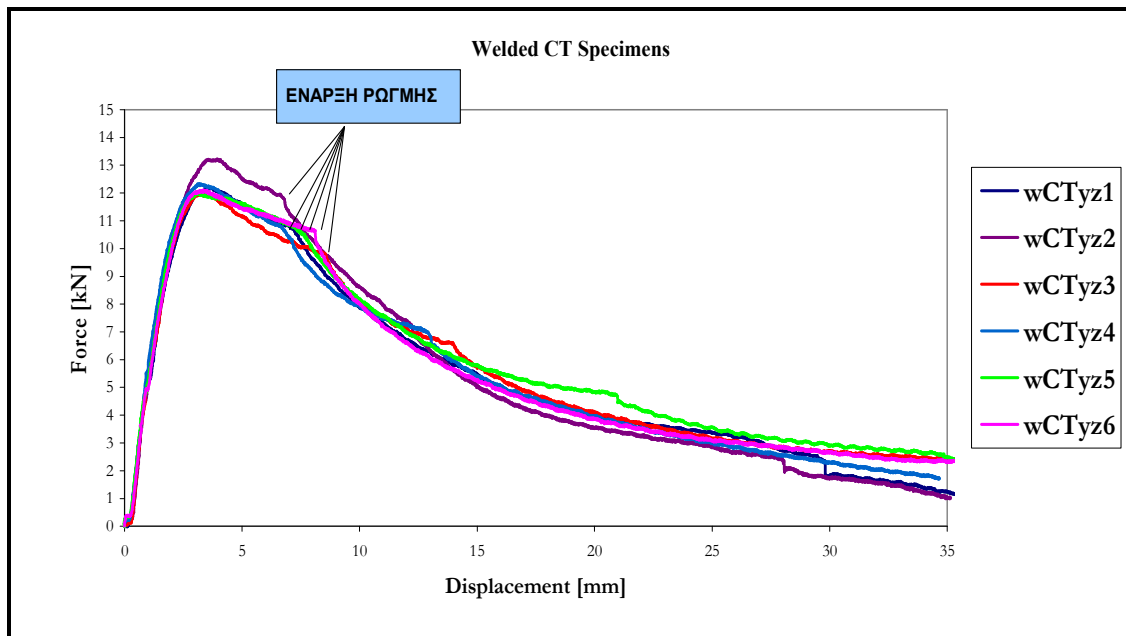
- (i) Αρχική εμφάνιση πλαστικής παραμόρφωσης στο δοκίμιο, ειδικότερα στο έλασμα που βρίσκεται πίσω από τη συγκόλληση
- (ii) Έναρξη της ρωγμής από το άκρο της τεχνητής προϋπάρχουσας ρωγμής υπό γωνία, όχι πάντοτε από το κέντρο της.
- (iii) Απότομη αλλαγή σε κάποιες περιπτώσεις, και συνέχιση διάδοσης υπό γωνία προς τη συγκόλληση.
- (iv) Μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης καθώς προσεγγίζει το άκρο της ραφής της συγκόλλησης.
- (v) Διάδοση ρωγμής διαμέσου του ενισχυτικού σε δύο περιπτώσεις, και διάδοση επάνω στη ραφή του ενισχυτικού, παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης σε άλλες δύο περιπτώσεις. Το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό και σε σημεία έντονης αλλαγής κλίσης της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.
- (vi) Η ρωγμή αποτυγχάνει να διαδοθεί σε δύο δοκίμια, και στρέφεται παράλληλα προς τη συγκόλληση, χωρίς να τη διαπεράσει.

Στην Εικόνα 4-34 φαίνεται η τελική μορφή των υβριδικών δοκιμίων εφελκυσμού wCTyzi, μετά τη θραύση.



Εικόνα 4-34: Εικόνα συγκολλητών δοκιμίων wCTyz_i (i=1,...,6) μετά την λήξη των πειραμάτων

Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης των δοκιμίων wCTyz_i (i = 1,...,6) που προέκυψαν από αυτή τη σειρά πειραμάτων, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-17.



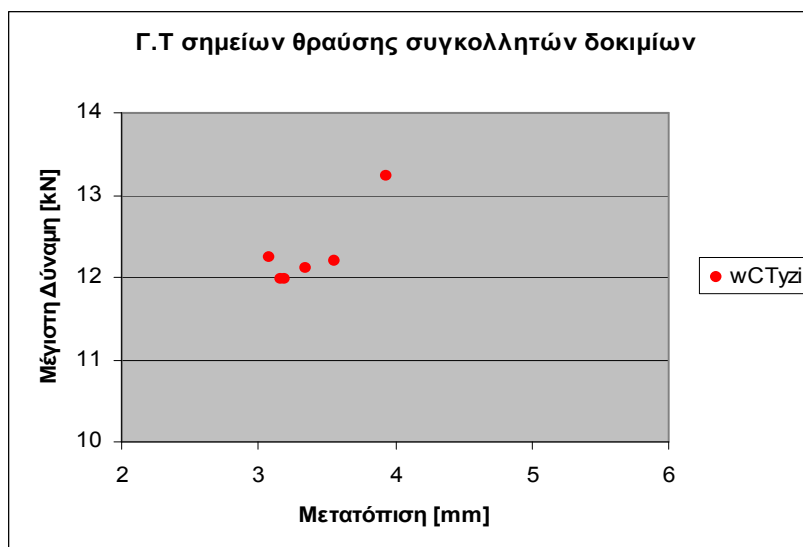
Σχήμα 4-17: Συνολικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των συγκολλητών δοκιμίων wCTyz_i (i = 1,...,6)

Στον Πίνακα 4-13, συνοψίζονται οι τιμές μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης παραμόρφωσης για τα συγκολλητά δοκίμια wCTyzi (i=1,...,6).

Πίνακας 4-13: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των συγκολλητών δοκιμίων εφελκυσμού wCTyzi (i = 1,...,6)

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
wCTyzi1	12.20	3.55
wCTyzi2	13.22	3.93
wCTyzi3	11.98	3.19
wCTyzi4	12.23	3.08
wCTyzi5	11.98	3.16
wCTyzi6	12.10	3.35
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	12.29	3.38

Στο διάγραμμα του σχήματος 4-18, παρουσιάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης, των συγκολλητών δοκιμίων wCTyzi. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι οι τιμές έναρξης θραύσης για το εν λόγω υλικό κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 12 kN και 13.22 kN, που είναι πολύ μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτές δοκιμίων μόνο από το κράμα 1561 που έχουν εξετασθεί σε προηγούμενες μελέτες, [10, 11], οι οποίες κυμαίνονται στις τιμές 2-4 kN.



Σχήμα 4-18: Γεωμετρικός τόπος σημείων θραύσης συγκολλητών δοκιμίων

4.6 3^η Ομάδα Πειραμάτων: Εφελκυστικές Δοκιμές σε Ενισχυμένα CT Δοκίμια με Ενίσχυση Βολβολάμας

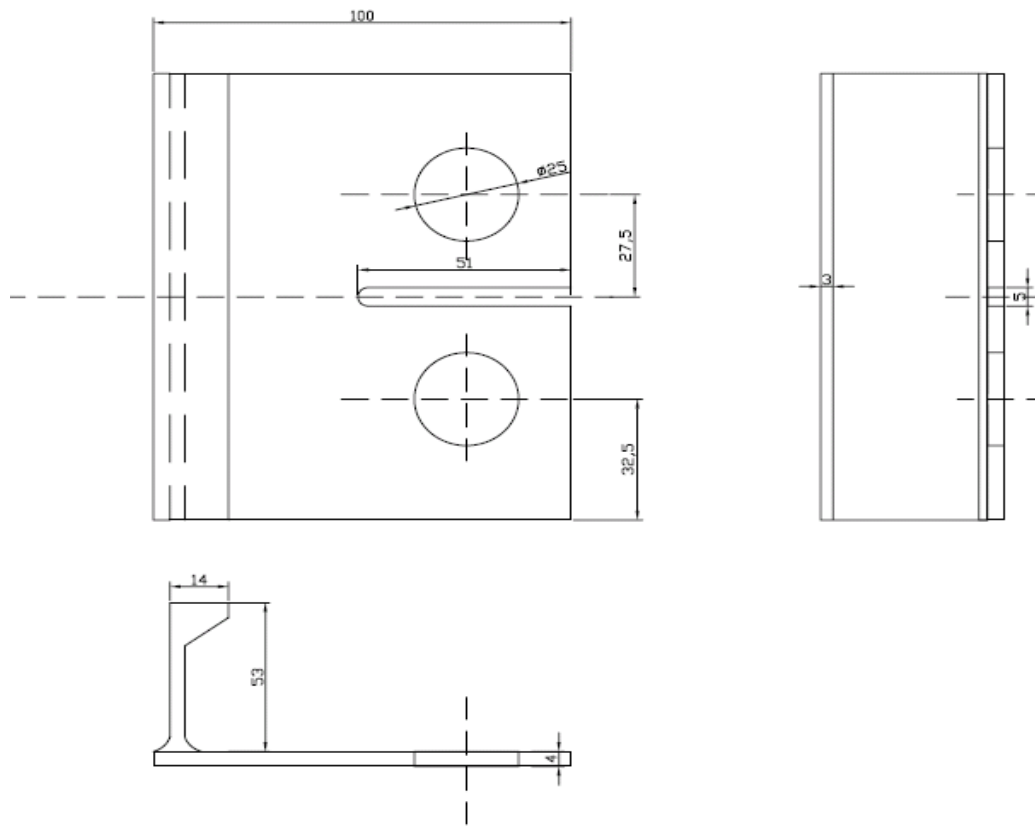
4.6.1 Ενισχυμένα CT δοκίμια με ενίσχυση βολβολάμας

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων σε δοκίμια εφελκυσμού τύπου CT με ενίσχυση βολβολάμας. Η πρώτη σειρά περιλαμβάνει έξι δοκίμια ημικυκλικής ρωγμής αρχικού μήκους 51 mm, χωρίς ύπαρξη ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό, και η δεύτερη σειρά περιλαμβάνει έξι δοκίμια ημικυκλικής ρωγμής αρχικού μήκους 61 mm, με μεταβαλλόμενα μήκη ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό (30, 20 και 10 mm).

Σκοπός των πειραμάτων είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά της ενισχυμένης με βολβολάμα πλάκας του κράματος αλουμινίου 1561, καθώς και να εκτιμηθεί ο ρόλος της ύπαρξης ή μη “rear plate” στη διάδοση της ρωγμής. Επίσης, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα CT δοκίμια με ενισχυτικά τύπου T [8].

4.6.2 Ενισχυμένα CT δοκίμια με βολβολάμα χωρίς “Rear Plate”

Η υποομάδα αυτή των ενισχυμένων δοκιμίων CT περιλαμβάνει συνολικά έξι δοκίμια με αρχικό μήκος ημικυκλικής ρωγμής 51 mm και ακτίνας 2.5 mm, των οποίων οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-19.



Σχήμα 4-19: Σκαριφηματική απεικόνιση δοκιμίων CT με ενίσχυση βολβολάμας χωρίς πίσω έλασμα

Η ονομασία των παραπάνω δοκιμίων είναι η εξής: **CTgiR**,

όπου g: ο τύπος του ενισχυτικού (Γ/βολβολάμα)

i: (1,2,...,6), ο αριθμός των δοκιμίων

R: χωρίς “Rear Plate”

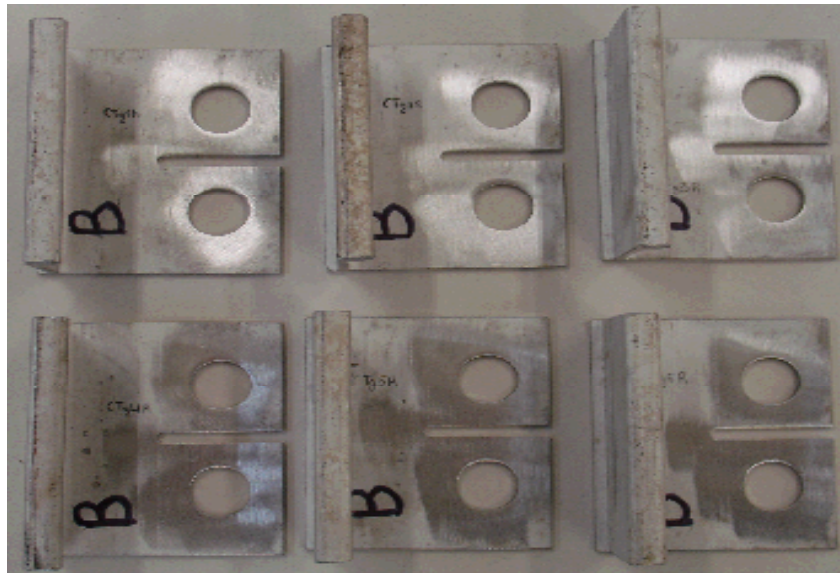
Οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων αυτής της υποομάδας καθώς και τα χαρακτηριστικά των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-14.

Πίνακας 4-14: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενισχυμένων συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού CT και των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΠΑΧΟΣ [mm]	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ [mm/min]	ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΗΣ [mm]	ΥΨΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ [mm]
CTg1R	100	120.5	3.5	1.0	51.5	54
CTg2R	100	120	3.2	1.0	52	53
CTg3R	101	120.5	3.5	1.0	51.5	54
CTg4R	100	119	3.2	1.0	51	53
CTg5R	100.5	120	3.5	1.0	52	54
CTg6R	100.5	120	3.4	1.0	52	54

Η εκτέλεση των δοκιμών έγινε διατηρώντας σταθερό ρυθμό μεταβολής μετατόπισης (ταχύτητα απομάκρυνσης σιαγόνων) ίσο με 1.0 mm/min. Η δειγματοληψία της μηχανής πραγματοποιήθηκε με ρυθμό 1 τιμή/sec. Κατά την πειραματική διαδικασία, γινόταν λήψη φωτογραφιών ανά 5 δευτερόλεπτα. Στην περιγραφή καθενός δοκιμίου θα παρατεθούν οι πιο χαρακτηριστικές φωτογραφίες, ώστε να είναι φανερή η διάδοση της ρωγμής.

Στην παρακάτω Εικόνα 4-35, φαίνεται η αρχική μορφή των έξι δοκιμίων πριν την έναρξη των πειραμάτων.



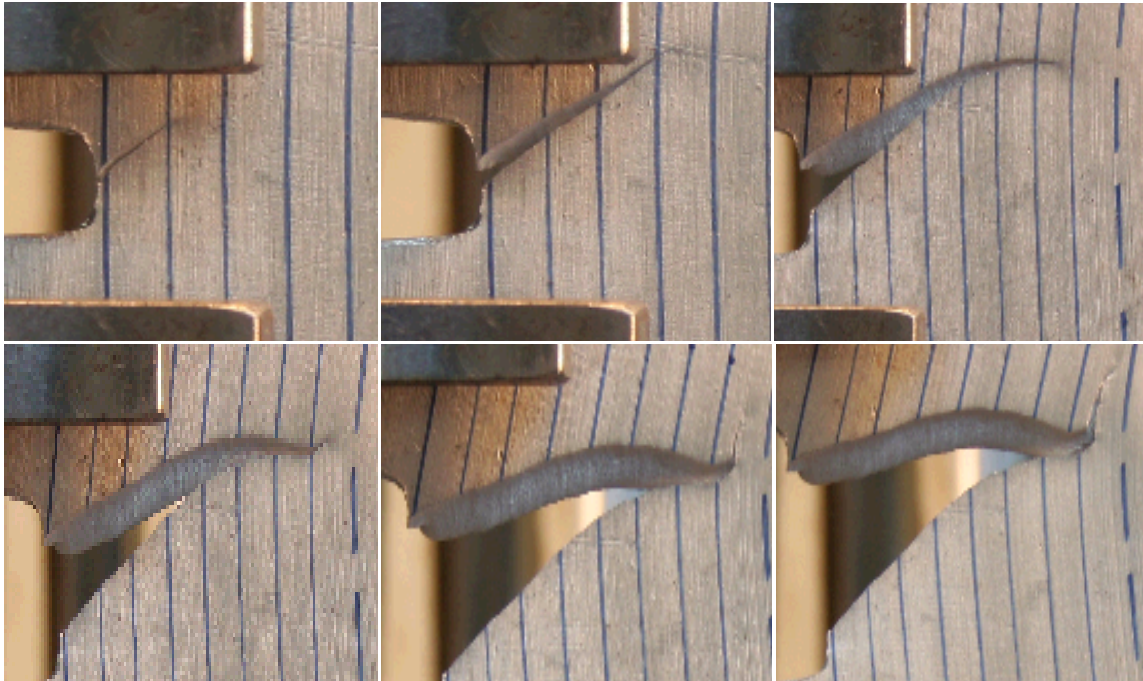
Εικόνα 4-35: Δοκίμια εφελκυσμού CTg1R με ενισχυτικό βολβολάμας, χωρίς πίσω έλασμα

Στη συνέχεια, θα γίνει περιγραφή της πορείας διάδοσης της ρωγμής σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά και σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων για όλα τα δοκίμια. Όπως και στην προηγούμενη πειραματική ομάδα, σε όλα τα δοκίμια έχουν χαραχθεί ευθείες παράλληλες στη συγκόλληση, ανά 5 mm, που ξεκινούν από την επαπτόμενη του άκρου της ρωγμής, έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερα η παρατήρηση της διάδοσης της ρωγμής, καθώς και η σύγκριση των δοκιμίων μεταξύ τους. Η ρίζα της ενίσχυσης φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή. Σημειώνεται, ότι λόγω της δυσκολίας φωτογράφισης της πρόσθιας όψης, λόγω της ύπαρξης του ενισχυτικού, οι φωτογραφίες ελήφθησαν από την πίσω όψη του δοκιμίου.

▪ **Δοκίμιο CTg1R**

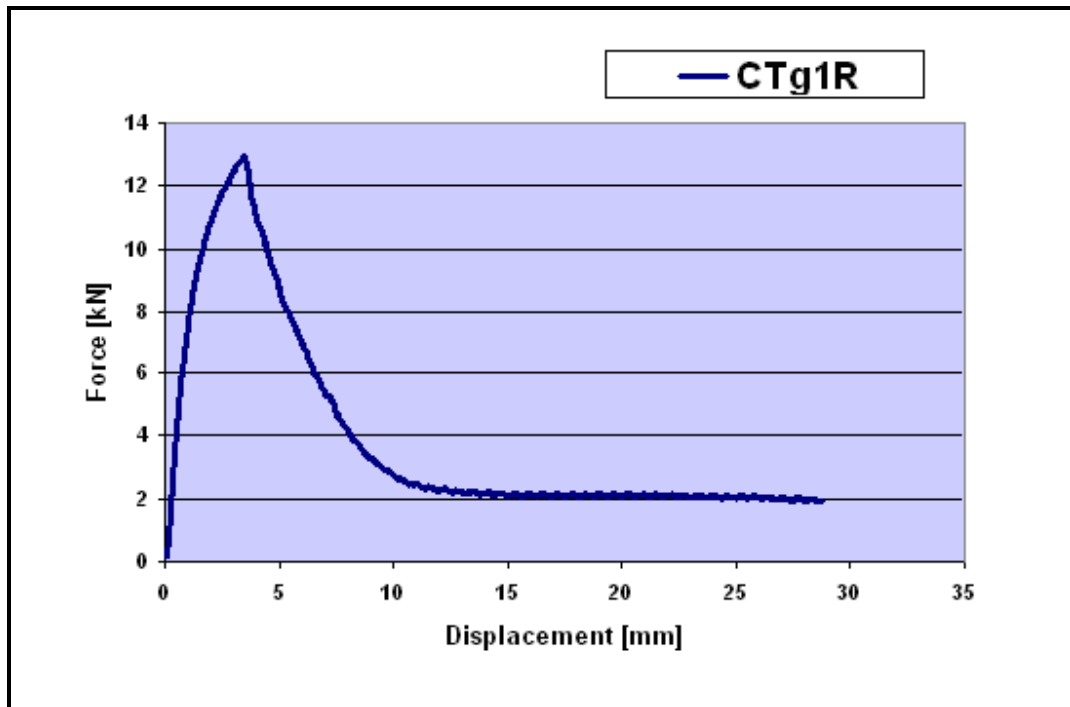
Πρώτο εξετάστηκε το δοκίμιο CTg1R, το οποίο επέδειξε συμπεριφορά σχετικά αναμενόμενη για το είδος του δοκιμίου. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [12.942 kN, 3.447 mm]. Η ρωγμή ξεκίνησε να διαδίδεται από το κέντρο της προϋπάρχουσας ρωγμής (ευθεία 0 mm) με σχεδόν διαγώνια κλίση προς τα πάνω, και συνέχισε να διαδίδεται με σχεδόν σταθερό ρυθμό μέχρι την ευθεία 3 (15 mm). Από εκείνο το σημείο και μετά, συνεχίζει να διαδίδεται με κατεύθυνση προς τα άνω, αλλά με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με πριν. Από την ευθεία 5 (25 mm) και έπειτα η κλίση μικραίνει σημαντικά και η ρωγμή τείνει να ευθυγραμμισθεί. Από την ευθεία 6 (30 mm) και μετά, διαδίδεται με κατεύθυνση σχεδόν κάθετη προς τη ρίζα του ενισχυτικού, για τιμές δύναμης-μετατόπισης [2.611 kN, 10.199 mm]. Καθώς η ρωγμή πλησιάζει τη ρίζα του ενισχυτικού και διασχίζει την ευθεία 7 (35 mm), η διάδοση της ρωγμής εμφανίζει σημαντική καθυστέρηση, σε μία προσπάθεια να διαπεράσει το ενισχυτικό. Αυτό δεν συμβαίνει τελικά, καθώς στη συνέχεια αποκτά κλίση προς τα πάνω και διαδίδεται με αργό ρυθμό, σχεδόν παράλληλα με τη ρίζα του ενισχυτικού, δηλαδή σε διεύθυνση 0° προς την επιβολή της φόρτισης, όπως ήταν και το αναμενόμενο.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-36, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-36: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg1R: (α) έναρξη ρωγμής διαγώνια προς τα πάνω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής διαγώνια προς τα πάνω, (γ) ευθυγράμμιση ρωγμής κάθετα προς το ενισχυτικό, (δ) άφιξη στο πέλμα του ενισχυτικού και καθυστέρηση ρωγμής, (ε) έναρξη διάδοσης προς τα πάνω, (στ) διάδοση ρωγμής παράλληλα προς το ενισχυτικό και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-20 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg1R, στο οποίο φαίνεται ότι το σημείο έναρξης της ρωγμής είναι το σημείο μέγιστης δύναμης. Επίσης, παρατηρούμε ότι, εκτός από αυτό το σημείο, δεν παρουσιάζεται κάποια άλλη έντονη αλλαγή στον προσανατολισμό της ρωγμής, παρά μόνο αυτές που αναλύθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 4-20: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg1R με ενισχυτικό βολβοβάμας

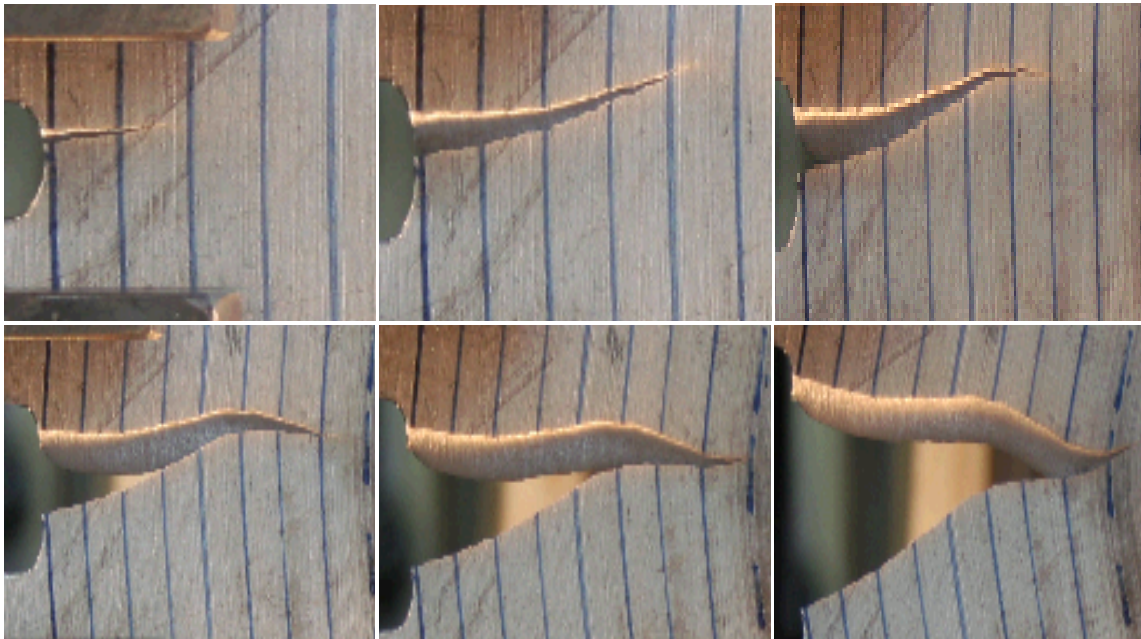
▪ **Δοκίμιο CTg2R**

Δεύτερο εξετάσθηκε το δοκίμιο CTg2R, το οποίο παρουσίασε αρκετά διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με το προηγούμενο δοκίμιο CTg1R. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι η ρωγμή στο δοκίμιο αυτό κατόρθωσε να φθάσει στο πέλμα του ενισχυτικού, να το διαπεράσει κάθετα και να διαδοθεί πάνω σε αυτό.

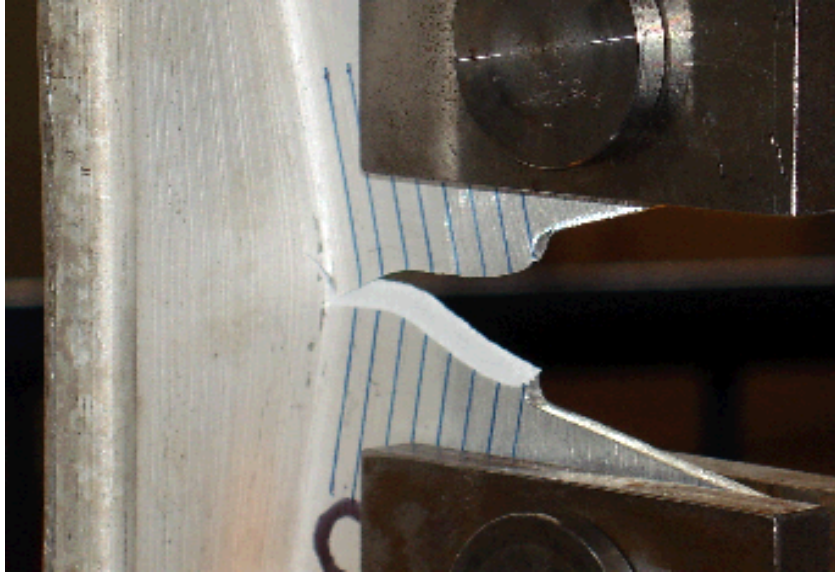
Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [13.09 kN, 3.81 mm], δηλαδή χρειάστηκε μεγαλύτερο φορτίο σε σύγκριση με το προηγούμενο πείραμα. Η ρωγμή ξεκίνησε να διαδίδεται από σημείο λίγο ανώτερο του μέσου της τεχνητής ρωγμής, με διεύθυνση κάθετη προς την επιβαλλόμενη φόρτιση, μέχρι την ευθεία 2. Από το σημείο αυτό και έπειτα, συνέχισε να διαδίδεται με κατεύθυνση προς τα πάνω και σταθερό ρυθμό διάδοσης μέχρι την ευθεία 4 (20 mm). Από εκείνο το σημείο και μετά, συνεχίζει να διαδίδεται με κατεύθυνση προς τα άνω, αλλά με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με πριν. Παρατηρούμε πως μετά την έναρξη της ρωγμής, σε δύναμη 13.09 kN, η επιβαλλόμενη δύναμη έχει μειωθεί σημαντικά. Επίσης, καθώς η ρωγμή διαδίδεται, ο ρυθμός διάδοσης ολοένα και μειώνεται καθώς πλησιάζει στο πέλμα του ενισχυτικού.

Από την ευθεία 5 (25 mm) και μετά η κλίση διάδοσης της ρωγμής αλλάζει ελαφρά και συνεχίζει προς τα κάτω, μέχρι να συναντήσει την ευθεία 7 (35 mm), [2.466 kN, 13.7 mm]. Σε εκείνο το σημείο φαίνεται να συναντά εμπόδιο, καθώς καθυστερεί σημαντικά η περαιτέρω διάδοση της ρωγμής. Έπειτα αποκτά ελαφρά κλίση προς τα άνω μέχρις ότου φθάνει το πέλμα του ενισχυτικού. Στη συνέχεια, περνά το ενισχυτικό υπό γωνία και συνεχίζει να διαδίδεται πάνω σε αυτό (Εικόνα 4-38), έως την ολοκλήρωση του πειράματος.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-37 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.

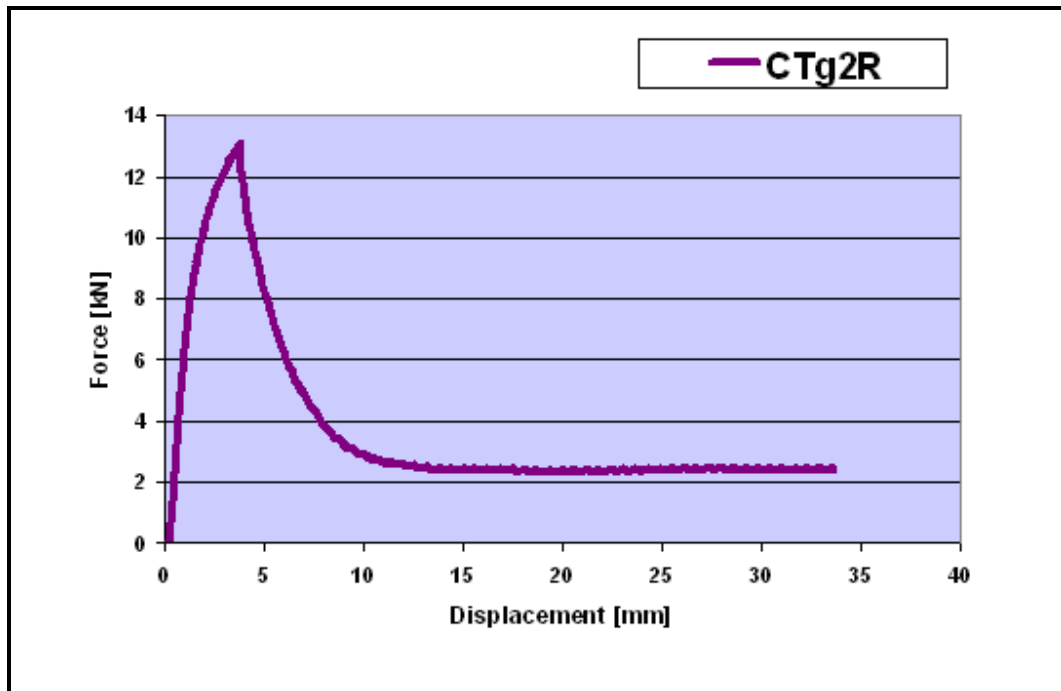


Εικόνα 4-37: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg2R: (α) έναρξη ρωγμής κάθετα στο φορτίο, (β) διάδοση ρωγμής προς τα πάνω υπό κλίση, (γ) έναρξη ευθυγράμμισης ρωγμής κάθετα προς το ενισχυτικό, (δ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω με μικρή κλίση, (ε) άφιξη στο πέλμα του ενισχυτικού, (στ) διάδοση ρωγμής διαμέσου του ενισχυτικού, αστοχία του δοκιμίου, και ολοκλήρωση του πειράματος.



Εικόνα 4-38: Αστοχία ενισχυτικού λόγω διάδοσης ρωγμής υπό γωνία

Το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg2R παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-21 στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης). Επίσης, παρατηρούμε ότι μετά το σημείο μέγιστης δύναμης, η καμπύλη φθίνει με μεγάλο ρυθμό, καθώς η επιβαλλόμενη φόρτιση μειώνεται σημαντικά. Επίσης, ενώ στην περίπτωση του συγκεκριμένου δοκιμίου η ρωγμή διαπέρασε το ενισχυτικό και διαδόθηκε πάνω σε αυτό, παρατηρούμε ότι η φόρτιση συνέχισε να αναπτύσσεται ομαλά, χωρίς σημαντικές αυξομειώσεις.



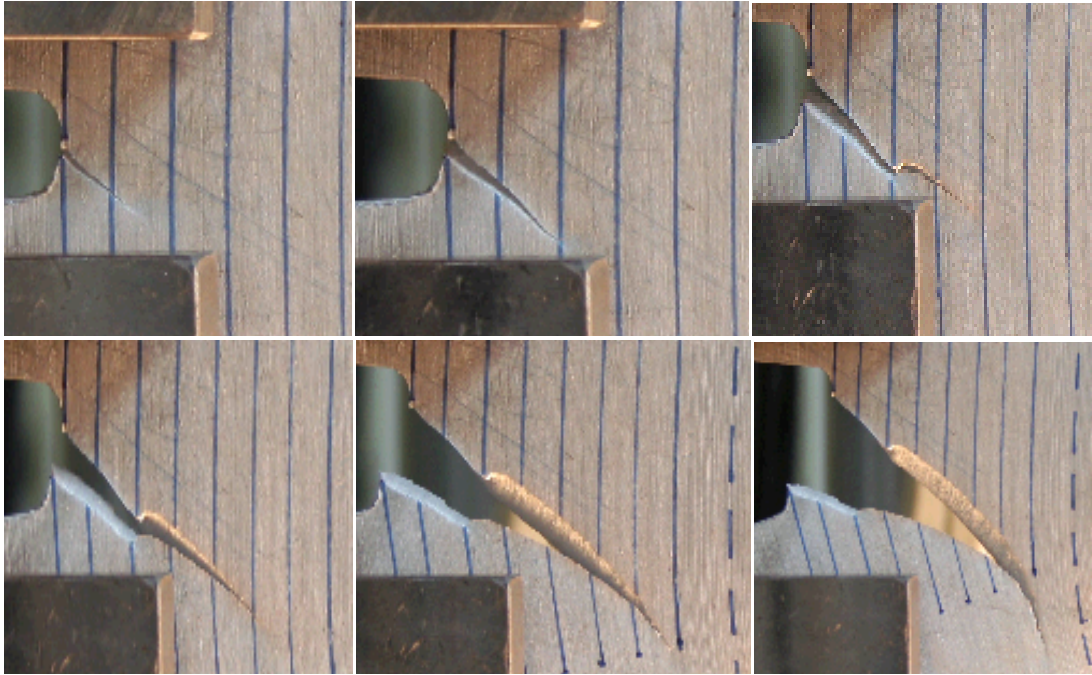
Σχήμα 4-21: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg2R με ενισχυτικό βολβολάμας

▪ **Δοκίμιο CTg3R**

Στο δοκίμιο CTg3R, όπως και στο πρώτο δοκίμιο αυτής της υποομάδας, η ρωγμή δεν κατάφερε να διαπεράσει το ενισχυτικό. Πιο αναλυτικά, η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [13.207 kN, 3.91 mm], στο κέντρο της προϋπάρχουσας ρωγμής. Κατά την έναρξη, η ρωγμή είχε κλίση 135° προς τη διεύθυνση επιβολής της δύναμης και φορά προς τα κάτω. Η ρωγμή ακολούθησε αυτήν την πορεία μέχρι την ευθεία 2 (10 mm), και στη συνέχεια, απέκτησε στιγμιαία ανοδική φορά, έως ότου συνεχίσει την προηγούμενη καθοδική πορεία, μέχρι την ευθεία 3, [7.10 kN, 7.13 mm]. Αφού διαπεράσει και την ευθεία 3 (15 mm), η ρωγμή συνεχίζει την καθοδική πορεία με την ίδια κλίση, μέχρι την ευθεία 6 (30 mm). Από εκείνο το σημείο και έπειτα, η ρωγμή συνάντησε σημαντική δυσκολία στη διάδοση λόγω της ύπαρξης του ενισχυτικού. Καθώς πλησιάζει την ευθεία 7 (35 mm), η ρωγμή εμφανίζει μεγαλύτερη κλίση σε σχέση με προηγουμένως, (σημείο [2.084 kN, 18.50 mm]), και καταλήγει να διαδίδεται παράλληλα προς το πέλμα του ενισχυτικού, δηλαδή σε διεύθυνση 180° ως προς το επίπεδο της φόρτισης, (σημείο [1.95 kN, 19.98 mm]).

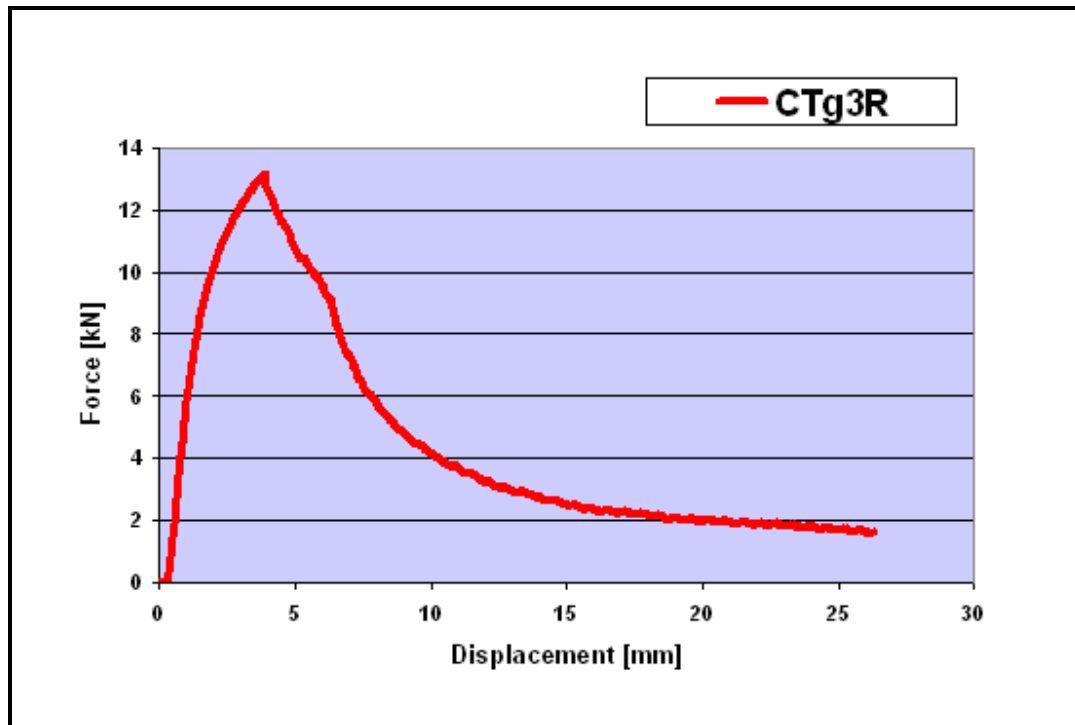
Όπως συμπεραίνουμε από το πείραμα, στην περίπτωση του δοκιμίου CTg3R, η ρωγή κατάφερε να φθάσει μέχρι το άκρο του πέλματος του ενισχυτικού, αλλά δεν κατόρθωσε να το διαπεράσει.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-39 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-39: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg3R: (α) έναρξη ρωγμής υπό κλίση προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής, (γ) στιγμιαία αλλαγή διεύθυνσης ρωγμής, (δ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω με μεγαλύτερη κλίση, (ε) άφιξη κοντά στην αρχή του πέλματος του ενισχυτικού και καθυστέρηση της ρωγμής, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-22 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg3R, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης). Παρατηρούμε ότι, σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο δοκίμια, στο δοκίμιο CTg3R, για τις ίδιες τιμές μετατόπισης, απαιτήθηκε επιβολή μεγαλύτερης δύναμης, έτσι ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω διάδοση της ρωγμής.



Σχήμα 4-22: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg3R με ενισχυτικό βολβολάμας

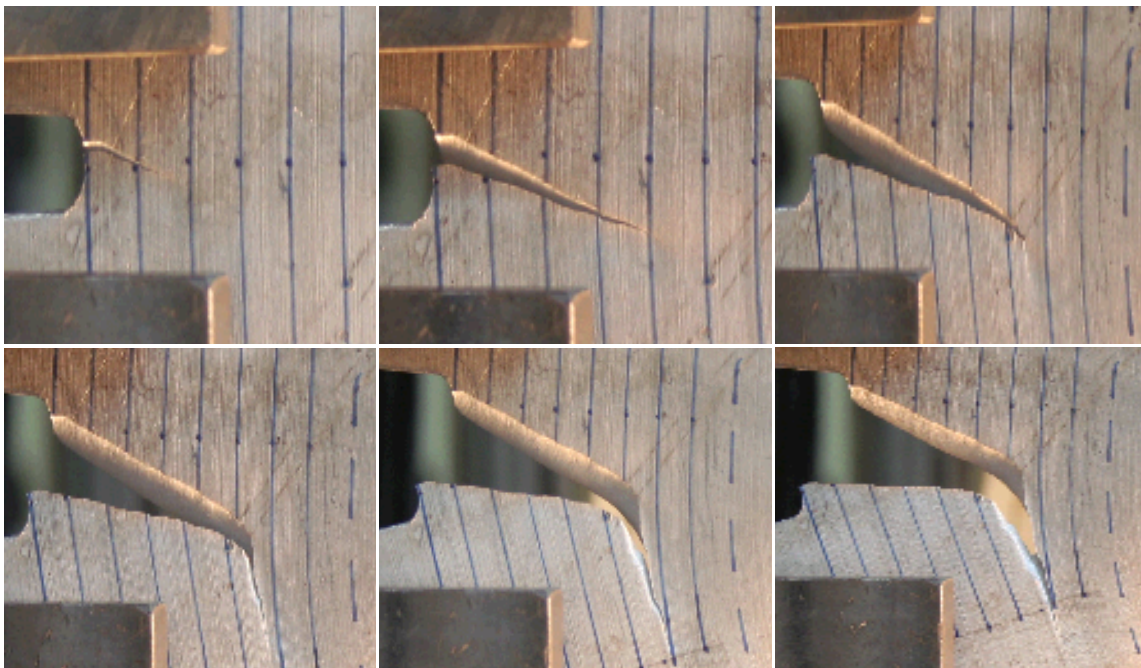
▪ **Δοκίμιο CTg4R**

Το επόμενο δοκίμιο CTg4R, εμφάνισε συμπεριφορά όμοια του προηγούμενου CTg3R. Η ρωγμή μετά την έναρξη της ακολουθεί καθοδική πορεία με μικρές διακυμάνσεις, και πριν φθάσει το πέλμα του ενισχυτικού διαδίδεται παράλληλα με αυτό, και με κατεύθυνση προς τα κάτω. Πιο συγκεκριμένα, η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [13.73 kN, 3.78 mm], λίγο πιο πάνω από το κέντρο της προϋπάρχουσας ρωγμής. Η ρωγμή διαδίδεται αρχικά κάθετα και στη συνέχεια με κλίση 135° ως προς την επιβαλλόμενη φόρτιση, πριν φθάσει στην ευθεία 1 (5 mm). Αρχικά, η διάδοση της ρωγμής έγινε με αρκετά γρήγορο ρυθμό, αλλά πριν φθάσει στην ευθεία 3 (15 mm), ο ρυθμός μειώθηκε σημαντικά, συνεχίζοντας την καθοδική πορεία. Η διάδοση συνεχίζει με την ίδια κλίση μέχρι τα μέσα των ευθειών 5 και 6 (27.5 mm), όπου η πορεία γίνεται πιο έντονα καθοδική και ξεκινά να διαδίδεται παράλληλα προς το πέλμα του ενισχυτικού. Στο σημείο [3.76 kN, 10.62 mm] η ρωγμή συνεχίζει με ελαφρώς μικρότερη κλίση από προηγουμένως και φθάνει την ευθεία 6 (30 mm) και, τελικά,

συνεχίζει παράλληλα προς το πέλμα του ενισχυτικού, μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος.

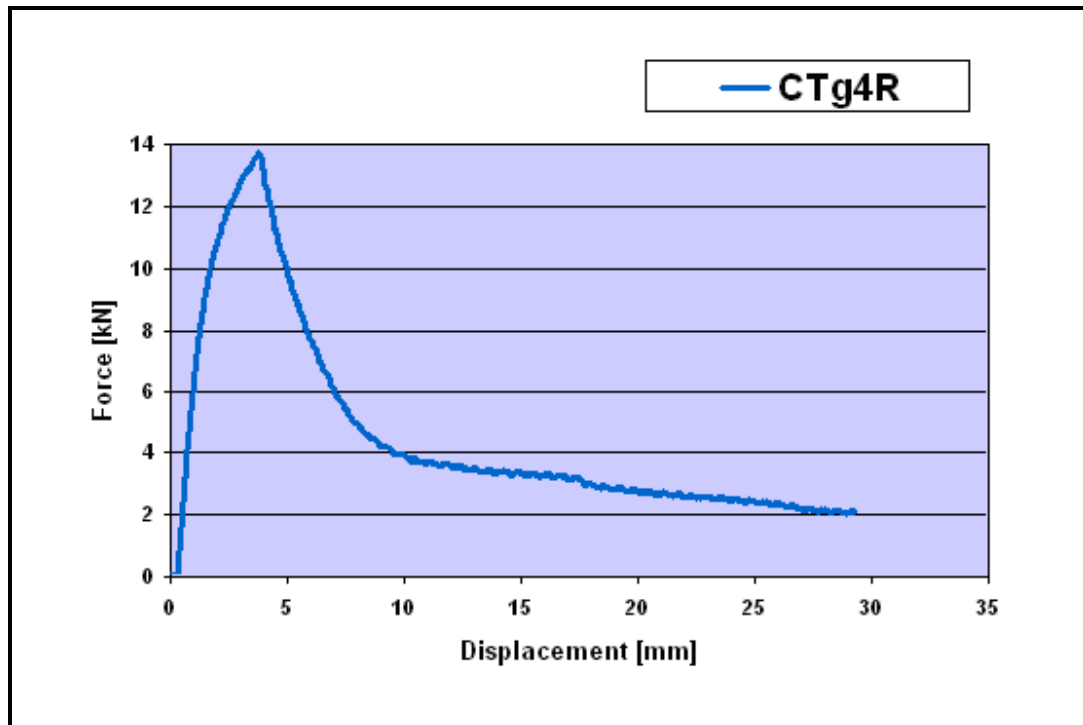
Όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου CTg3R, η ρωγμή διαδόθηκε με παρόμοιο τρόπο και στο δοκίμιο CTg4R, χωρίς να καταφέρει να διαπεράσει το ενισχυτικό. Στο δοκίμιο CTg4R, μάλιστα, η ρωγμή άλλαξε κατεύθυνση νωρίτερα από το προηγούμενο δοκίμιο, χωρίς να φθάσει καν στο άκρο του πέλματος του ενισχυτικού.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-40 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-40: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg4R: (α) έναρξη ρωγμής υπό κλίση προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής με ίδια φορά, (γ) έναρξη διάδοσης προς τα κάτω, παράλληλα στη φορά της φόρτισης, (δ) διάδοση ρωγμής παράλληλα στο ενισχυτικό, (ε) συνέχιση πορείας με ελαφρά κλίση ως προς την ενίσχυση, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-23 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg4R, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης).

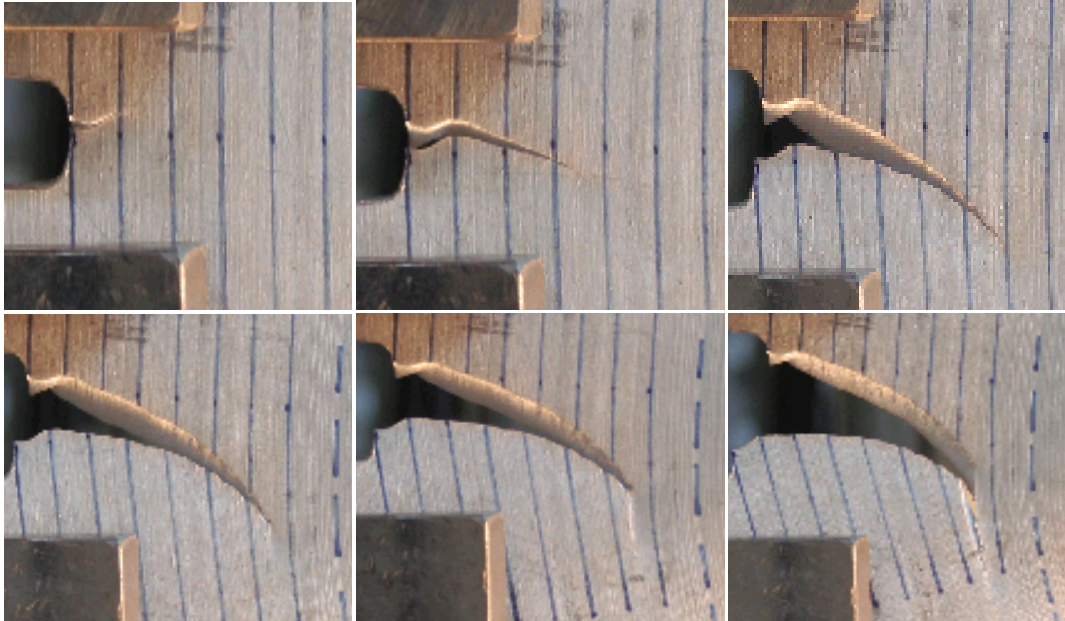


Σχήμα 4-23: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg4R με ενισχυτικό βολβολάμας

▪ **Δοκίμιο CTg5R**

Το επόμενο δοκίμιο CTg5R εμφάνισε παραπλήσια συμπεριφορά με το προηγούμενο δοκίμιο. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης [12.77 kN, 3.42 mm], λίγο πιο πάνω από το κέντρο της τεχνητής ρωγμής. Αρχικά, η ρωγμή ακολουθεί πορεία κάθετη στη διεύθυνση της δύναμης, και στη συνέχεια αποκτά ελαφρά ανοδική πορεία μέχρι την ευθεία 1 (5 mm). Μετά την ευθεία 1, συνεχίζει διαγώνια με καθοδική φορά, η οποία διατηρείται μέχρι την ευθεία 6 (30 mm), με σχετικά σταθερό ρυθμό προχώρησης. Από εκείνο το σημείο και μετά, η κλίση γίνεται εντονότερη έως ότου να σταματήσει μεταξύ των ευθειών 6 και 7 (σημείο [2.58 kN, 14.37 mm]). Προσπαθώντας να ξεπεράσει το εμπόδιο και να διαπεράσει το ενισχυτικό, αποτυγχάνει και διαδίδεται προς τα κάτω, με φορά 180° ως προς τη διεύθυνση της δύναμης.

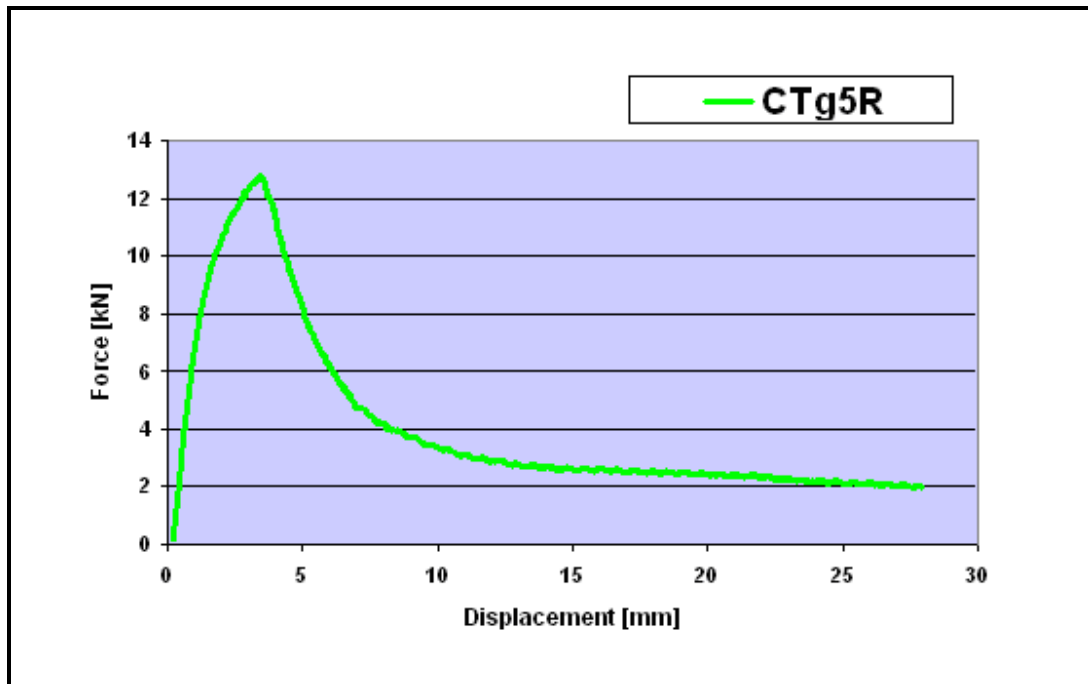
Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-41, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-41: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg5R: (α) έναρξη ρωγμής υπό κλίση προς τα κάτω και μετά προς τα πάνω, (β) διάδοση ρωγμής διαγώνια προς τα κάτω, (γ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής με την ίδια φορά, (δ) καθυστέρηση ρωγμής κοντά στο πέλμα, (ε) έναρξη διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Παρατηρούμε ότι, στο δοκίμιο αυτό η ρωγμή διαδόθηκε με παρόμοιο τρόπο με τα δύο προηγούμενα δοκίμια, χωρίς να καταφέρει να διαπεράσει το ενισχυτικό. Πρέπει να σημειωθεί ότι, μετά από παρατήρηση των δύο πλευρών του δοκιμίου (πλευρά ενισχυτικού και πίσω πλευρά), η ρωγμή δεν ακολουθεί ακριβώς την ίδια πορεία. Ενώ από την πίσω πλευρά, από την οποία έχουν ληφθεί οι φωτογραφίες, η ρωγμή φαίνεται να μη φθάνει την ευθεία 7 (35 mm κατά το μήκος του δοκιμίου), από την άλλη πλευρά φαίνεται να τη διαπερνά. Αυτό συμβαίνει λόγω της μη επίπεδης παραμόρφωσης που υπέστη το συγκεκριμένο δοκίμιο, η οποία είναι προφανής αν παρατηρήσουμε τη μορφή του δοκιμίου μετά τη θραύση.

Στο Σχήμα 4-24 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg5R, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης).

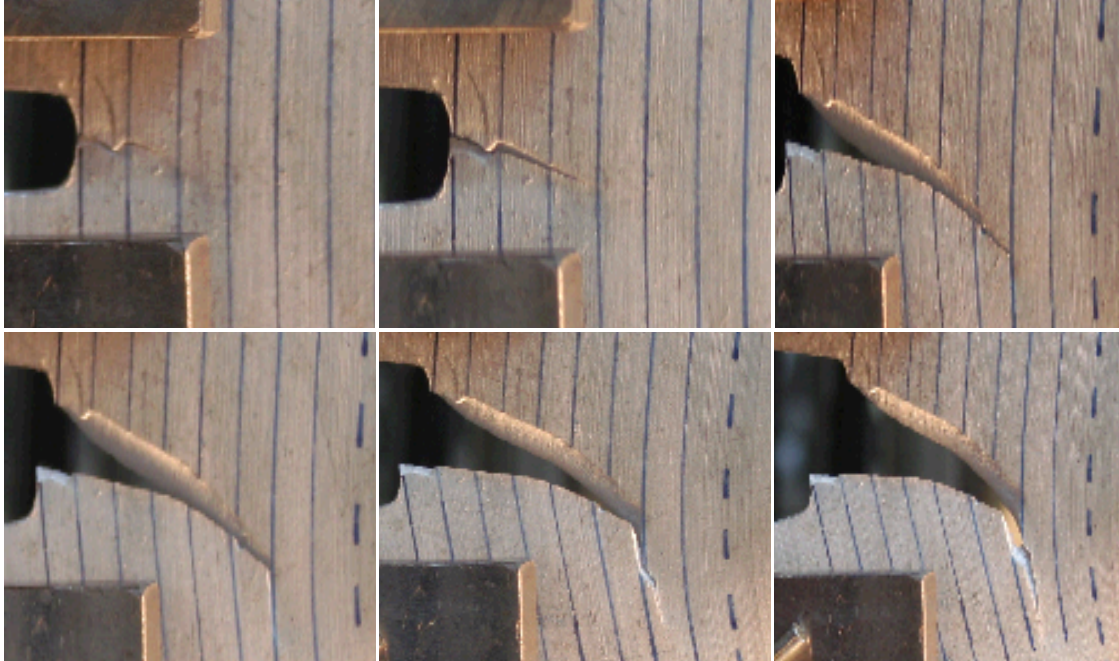


Σχήμα 4-24: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg5R με ενισχυτικό βολβολάμας

▪ **Δοκίμιο CTg6R**

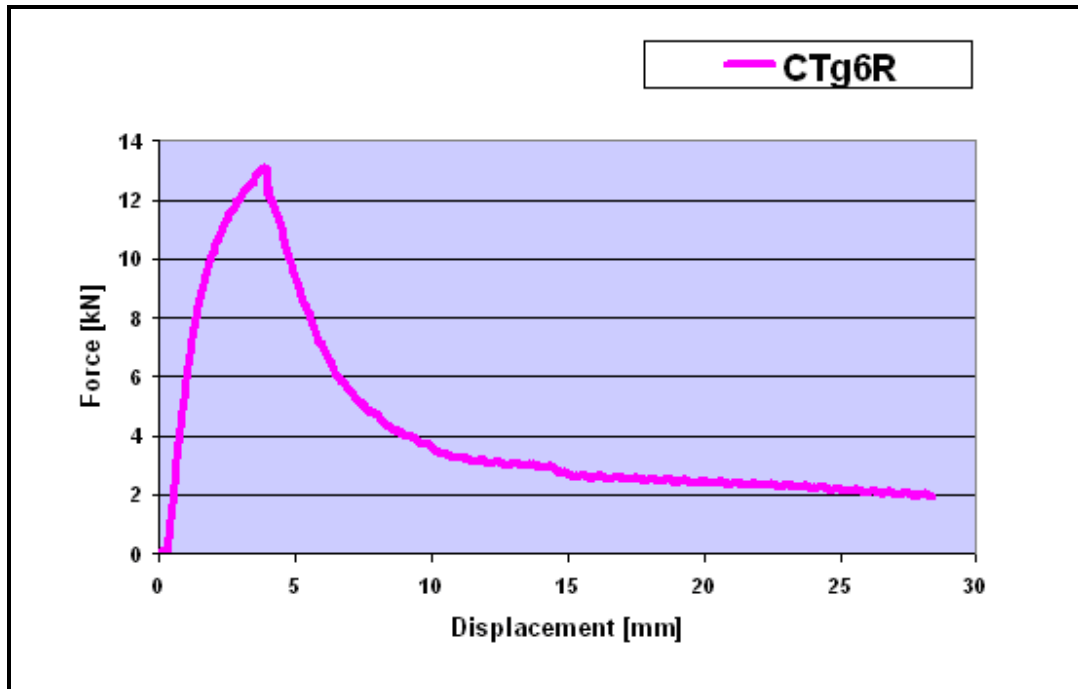
Το τελευταίο δοκίμιο χωρίς έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, CTg6R, εμφάνισε όμοια συμπεριφορά με τα προηγούμενα. Πιο συγκεκριμένα, η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης [13.104 kN, 3.901 mm], στο κέντρο της τεχνητής ρωγμής. Αρχικά, ακολουθεί σχεδόν ευθύγραμμη πορεία (κλίση 90° ως προς την επιβολή της δύναμης). Μεταξύ των ευθειών 0 και 1 (0 - 5 mm), η πορεία της ρωγμής εμφανίζει μία μικρή ανωμαλία, και συνεχίζει προς τα κάτω. Μέχρι και την ευθεία 6 (30 mm κατά μήκος του δοκιμίου), η ρωγμή ακολουθεί σταθερή πορεία προς τα κάτω, με κλίση 130° περίπου. Μετά από μικρή καθυστέρηση της διάδοσης πάνω στην ευθεία 6, η ρωγμή συνεχίζει προς τα κάτω παράλληλα προς το πέλμα του ενισχυτικού. Στο σημείο [2.676 kN, 15.089 mm] η κλίση μειώνεται ελαφρά και η ρωγμή διαδίδεται διαγώνια προς το ενισχυτικό και, τελικά, μεταξύ των ευθειών 6 και 7, η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα προς τη ραφή του ενισχυτικού και με φορά προς τα κάτω (σημείο [2.497 kN, 17.673 mm]).

Στις φωτογραφίες Εικόνα 4-42, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-42: Στάδια διάδοσης της ρωγμής δοκιμίου CTg6R: (α) έναρξη ρωγμής υπό κλίση προς τα κάτω και εμφάνιση μικρής ανωμαλίας, (β) διάδοση ρωγμής διαγώνια προς τα κάτω, (γ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής υπό μεγαλύτερη κλίση, (δ) καθυστέρηση ρωγμής και έναρξη διάδοσης ρωγμής παράλληλα προς τη φόρτιση, (ε) διάδοση υπό κλίση προς την ενίσχυση, (στ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-25 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg6R, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης).



Σχήμα 4-25: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg6R με ενισχυτικό βολβοβάμας

4.6.2.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων για τα δοκίμια CTgiR

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν σε αυτή την πειραματική ομάδα επέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά σε εφελκυσμό μεταξύ τους, με μοναδική εξαίρεση το δοκίμιο CTg2R, στο οποίο η ρωγή κατάφερε να διαπεράσει το ενισχυτικό. Επίσης, πρέπει να επισημάνουμε ότι στο δοκίμιο CTg5R παρουσιάστηκε μη επίπεδη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής, κάτι το οποίο είναι εμφανές στην εικόνα του δοκιμίου μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Γενικά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας των δοκιμίων CTgiR ($i = 1, \dots, 6$) έδειξαν ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών παρουσίασε παρόμοια χαρακτηριστικά και φαινόμενα, τα οποία συνοψίζονται στα εξής :

- (i) Έναρξη της ρωγμής από το άκρο της τεχνητής προϋπάρχουσας ρωγμής με μια αρχική γωνία περίπου 60° ή 135°

- (ii) Στροφή ρωγμής, μικρές αλλαγές πορείας, κατεύθυνσης, και επαναπροσανατολισμός της ρωγμής
- (iii) Καθυστέρηση διάδοσης της ρωγμής κοντά στο πέλμα του ενισχυτικού
- (iv) Η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα προς το πέλμα του ενισχυτικού και αποτυγχάνει να διαδοθεί διαμέσου του ενισχυτικού διαπερνώντας το, σε όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν εκτός από ένα (CTg2R).

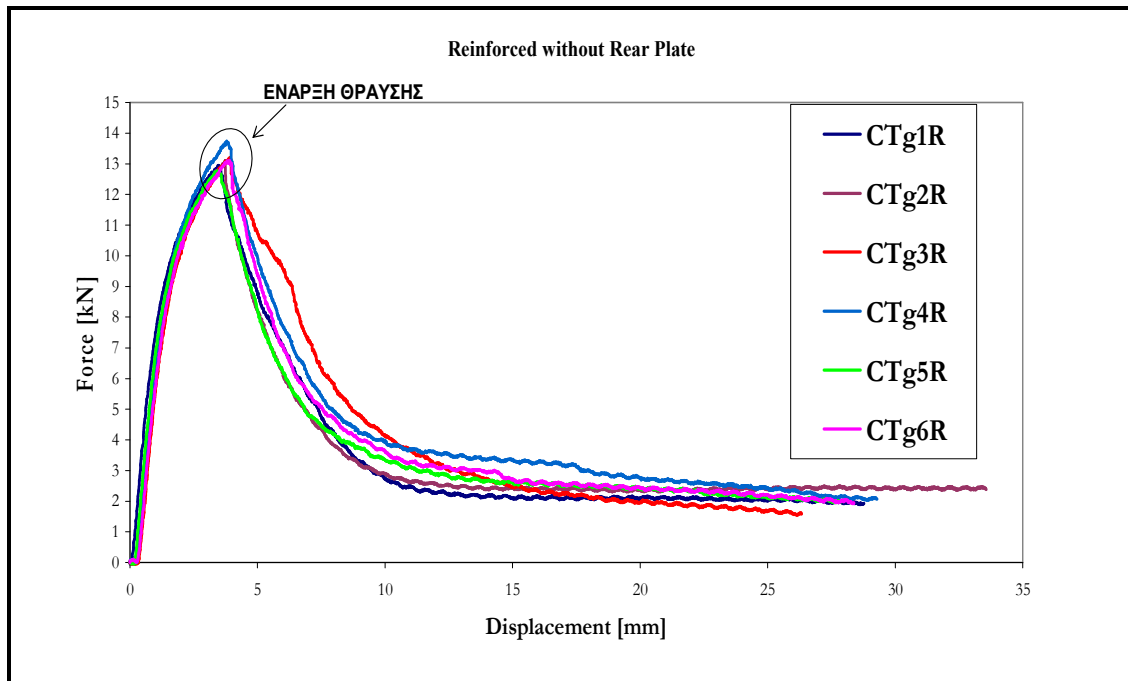
Στην Εικόνα 4-43, φαίνεται η τελική μορφή των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTgiR μετά τη θραύση.



Εικόνα 4-43: Τελική μορφή δοκιμίων CT με ενίσχυση βολβολάμας χωρίς “rear plate” μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, με τη σειρά που αναλύθηκαν παραπάνω

Οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης κάθε δοκιμίου CTgiR ($i = 1, \dots, 6$) που προέκυψαν από αυτή την σειρά πειραμάτων, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-26. Σε αυτό το διάγραμμα μπορούν να παρατηρηθούν τα βήματα της έναρξης, στροφής και αλλαγής κατεύθυνσης των ρωγμών. Ο Πίνακας 4-15 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές δοκιμές στα έξι ενισχυμένα δοκίμια CT με εξελασμένα

ενισχυτικά τύπου βολβολάμας, όπου εξετάζεται η σχέση μεταξύ της δύναμης - μετατόπισης στη θέση έναρξης της ρωγμής, σημείο στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της δύναμης για κάθε δοκίμιο. Με απλή παρατήρηση του συγκεκριμένου πίνακα, είναι προφανές σε ποια δοκίμια χρειάστηκε να επιβληθεί μεγαλύτερη δύναμη προκειμένου να επιτευχθεί η έναρξη της ρωγμής.



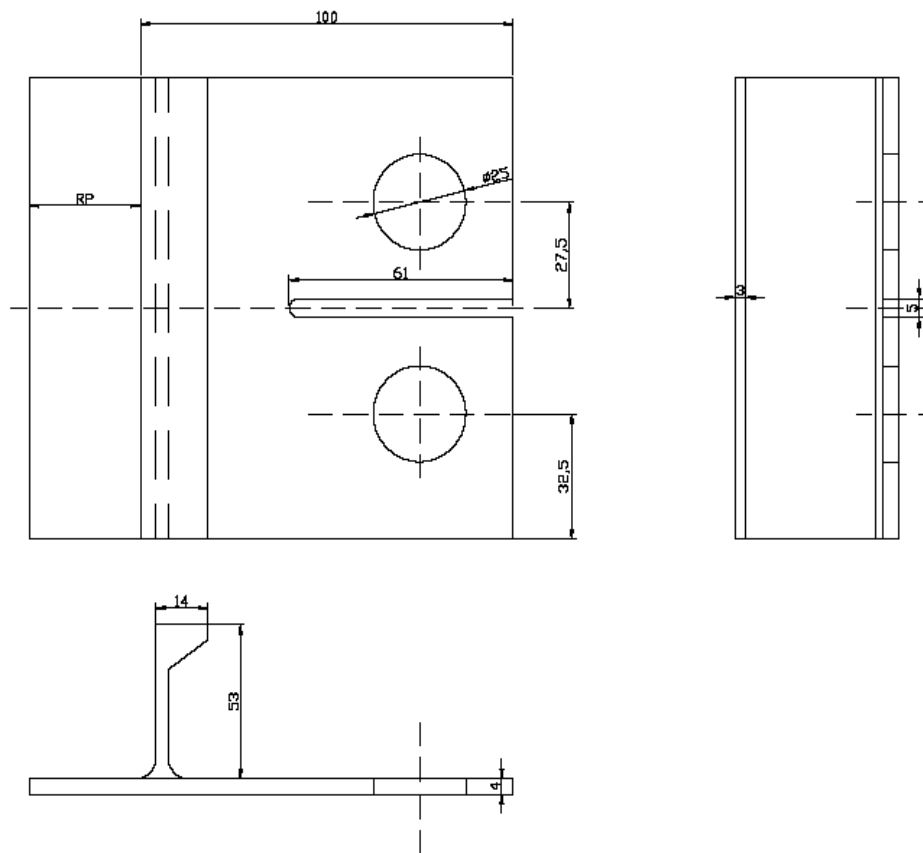
Σχήμα 4-26: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης (Force – Displacement) όλων των δοκιμίων CTgiR (i: 1,...,6), με ενισχυτικό βολβολάμας

Πίνακας 4-15: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTg_iR (i=1,...,6), με εξελασμένα ενισχυτικά βολβολάμας.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
CTg1R	12.942	3.447
CTg2R	13.093	3.815
CTg3R	13.207	3.910
CTg4R	13.738	3.789
CTg5R	12.770	3.427
CTg6R	13.104	3.901
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	13.142	3.714

4.6.3 Ενισχυμένα CT δοκίμια με βολβολάμα και έλασμα πίσω από το ενισχυτικό

Η δεύτερη υποομάδα των ενισχυμένων δοκιμίων CT περιλαμβάνει συνολικά έξι δοκίμια με αρχικό μήκος ημικυκλικής ρωγμής 61 mm και ακτίνας 2.5 mm, καθώς και έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, διαφορετικών διαστάσεων κάθε φορά. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-44.



Σχήμα 4-27: Σκαριφηματική απεικόνιση δοκιμίων CT με ενίσχυση βολβολάμας με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό (“rear plate”)

Η ονομασία των παραπάνω δοκιμίων είναι η εξής: **CTg_iRP**,

όπου g: ο τύπος του ενισχυτικού (Γ/βολβολάμα)

i = (1,2,...,6), ο αριθμός των δοκιμίων

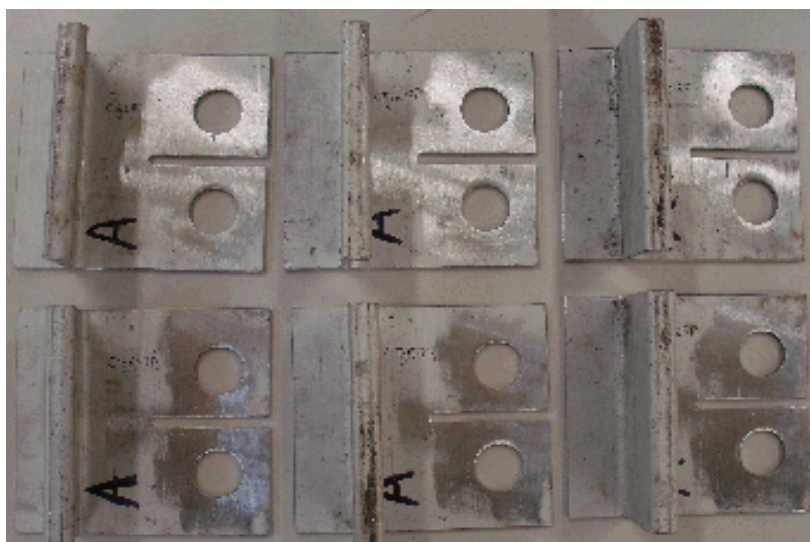
RP: με Rear Plate

Οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων αυτής της υποομάδας, καθώς και τα χαρακτηριστικά των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν, βρίσκονται στον Πίνακα 4-16.

Πίνακας 4-16: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μη ενισχυμένων συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού CT και των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΠΑΧΟΣ [mm]	ΜΗΚΟΣ “REAR PLATE” [mm]	ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΗΣ [mm]	ΥΨΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ [mm]
CTg1RP	130	121	3.5	30	62	54
CTg2RP	130	120	3.8	30	62	53
CTg3RP	119	121	3.2	20	62	53
CTg4RP	119	121	3.8	20	62	53
CTg5RP	109	120.5	3.5	10	62	54
CTg6RP	109	121	3.5	10	62	53

Η εκτέλεση των δοκιμών έγινε διατηρώντας σταθερό ρυθμό μεταβολής μετατόπισης (ταχύτητα απομάκρυνσης σιαγώνων) ίσο με 1.0 mm/min, όπως και στα πειράματα των δοκιμίων χωρίς έλασμα πίσω από το ενισχυτικό. Η δειγματοληψία της μηχανής πραγματοποιήθηκε με ρυθμό 1 τιμή/sec. Κατά την πειραματική διαδικασία, γινόταν λήψη φωτογραφιών ανά 5 δευτερόλεπτα. Στην περιγραφή καθενός δοκιμίου θα παρατεθούν οι πιο χαρακτηριστικές φωτογραφίες, ώστε να είναι φανερή η διάδοση της ρωγμής. Στην Εικόνα 4-44, φαίνεται η αρχική μορφή των έξι δοκιμίων πριν την έναρξη των πειραμάτων.



Εικόνα 4-44: Δοκίμια εφελκυσμού CTgiRP με ενισχυτικό βολβολάμας, με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό

Στη συνέχεια, γίνεται περιγραφή της πορείας διάδοσης της ρωγμής σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά και σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων για όλα τα δοκίμια. Πρέπει να σημειωθεί, ότι σε όλα τα δοκίμια έχουν χαραχθεί ευθείες παράλληλες στη συγκόλληση, ανά 5 mm, που ξεκινούν από την επαπτόμενη του άκρου της ρωγμής, έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερα η παρατήρηση της διάδοσης της ρωγμής καθώς και η σύγκρισή των δοκιμίων μεταξύ τους. Η ρίζα της ενίσχυσης φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή.

▪ **Δοκίμιο CTg1RP**

Πρώτο εξετάστηκε το δοκίμιο CTg1RP, το οποίο είχε έλασμα πίσω από το ενισχυτικό μήκους 30 mm. Όπως θα δούμε και αναλυτικά στα πειραματικά αποτελέσματα, το δοκίμιο αυτό δεν παρουσίασε την αναμενόμενη συμπεριφορά, λόγω του μεγάλου μήκους του πίσω ελάσματος. Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης δεν είχε την αναμενόμενη μορφή, έτσι το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων.

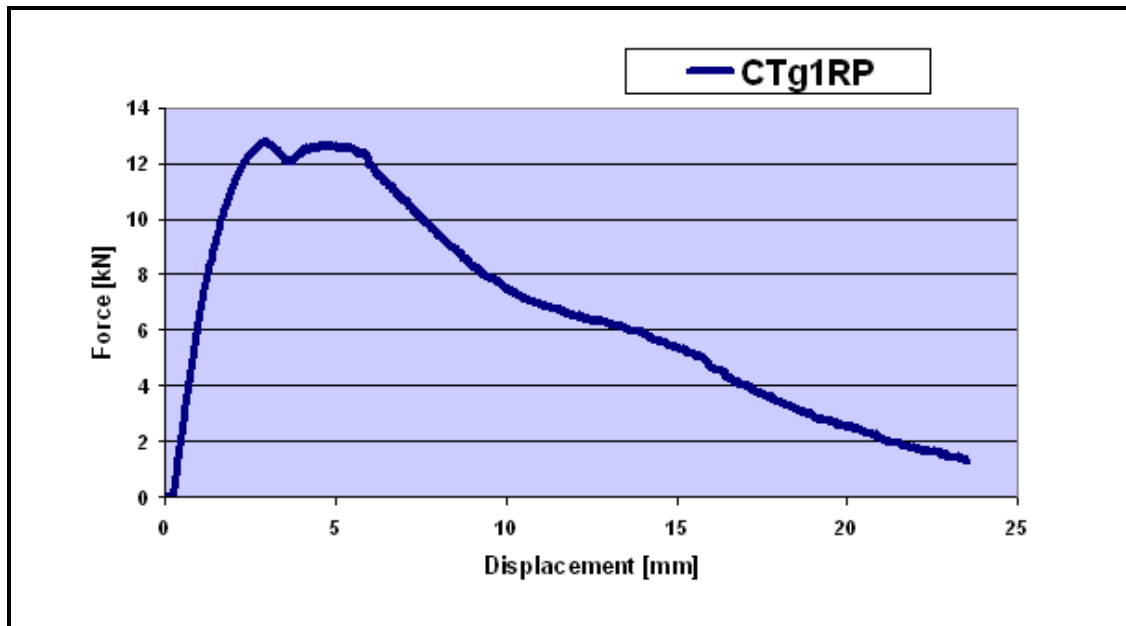
Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [12.77 kN, 2.902 mm] και πιθανότατα σε σημείο προϋπάρχουσας ατέλειας στο άκρο της ρωγμής, αρχικά με έντονη κλίση προς τα κάτω. Στη συνέχεια, μεταξύ των ευθειών 2 και 3, η ρωγμή άρχισε να γυρνάει προς τα πίσω, με αποτέλεσμα την πρόωρη ολοκλήρωση του πειράματος. Λόγω του μεγάλου μήκους του πίσω ελάσματος η φόρτιση δεν ήταν αξονική όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, με αποτέλεσμα τη μη αναμενόμενη διάδοση της ρωγμής.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-45, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-45: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg1RP: (α) έναρξη ρωγμής διαγώνια προς τα κάτω με μεγάλη κλίση, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, (γ) καθυστέρηση ρωγμής μεταξύ ευθειών 1-2, (δ) αναστροφή ρωγμής και διάδοση προς την αντίθετη κατεύθυνση, (ε) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω (πρόσθια όψη δοκιμίου), (στ) διάδοση ρωγμής υπό κλίση ως προς την ενίσχυση με πριν και ολοκλήρωση πειράματος.

Στο Σχήμα 4-28 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg1RP, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης). Από το διάγραμμα αυτό είναι επίσης φανερή η μη αναμενόμενη διάδοση της ρωγμής λόγω του μεγάλου “rear plate”, σε αντιδιαστολή με τις διαστάσεις του δοκιμίου και της τεχνητής ρωγμής.

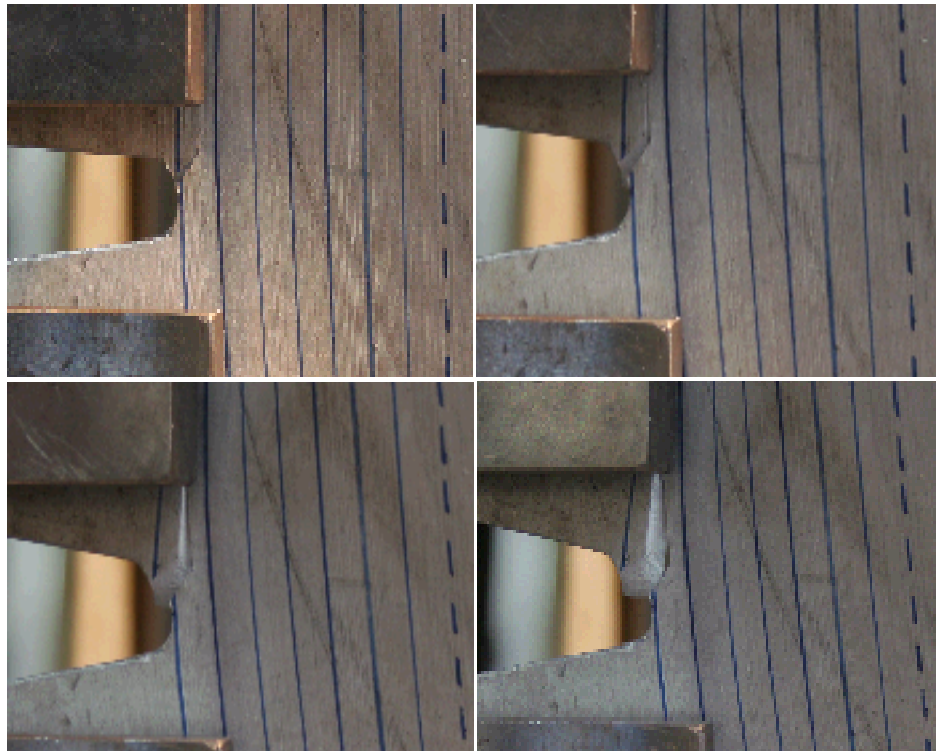


Σχήμα 4-28: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg1RP με ενισχυτικό βολβολάμας και “rear plate” 30 mm.

▪ **Δοκίμιο CTg2RP**

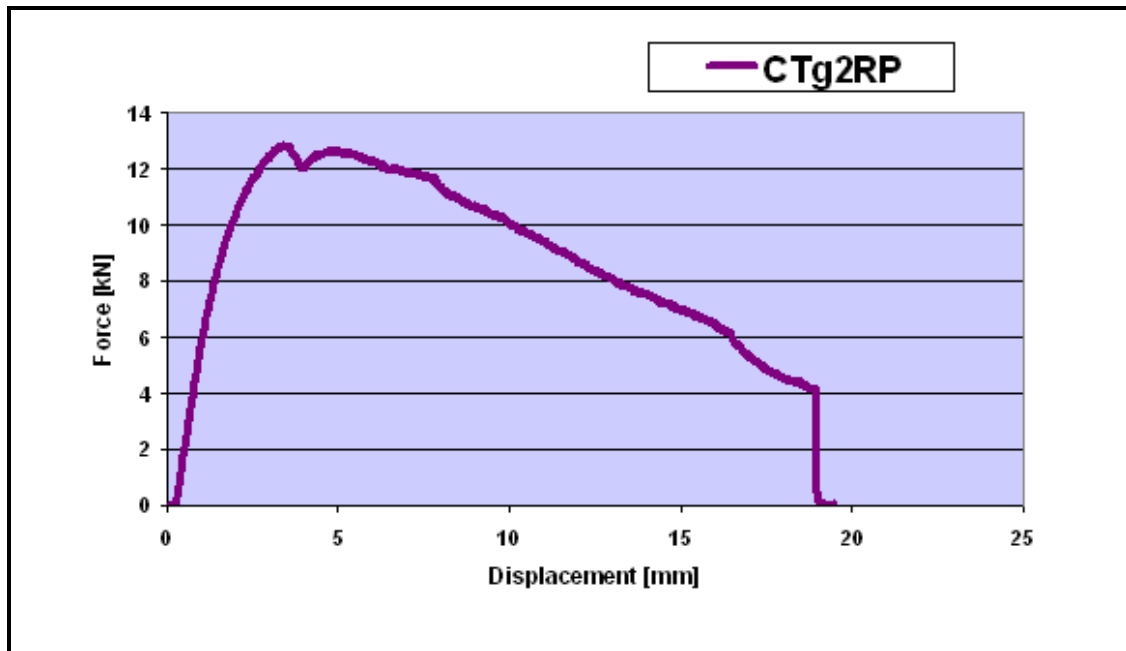
Για να επιβεβαιωθεί το παραπάνω αποτέλεσμα, και συγκεκριμένα για να επιβεβαιωθεί ότι η «στροφή» της ρωγμής δεν έγινε λόγω άλλων παραγόντων ή λαθών που δεν έγιναν αντιληπτά κατά το πείραμα, εξετάστηκε άλλο ένα όμοιο δοκίμιο με το προηγούμενο, το CTg2RP. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν μετά την ολοκλήρωση του πειράματος ήταν όμοια με αυτά του δοκιμίου CTg1RP. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [12.863 kN, 3.37 mm], σε φορτίο όμοιο με του προηγούμενου δοκιμίου. Σχεδόν αμέσως μετά την έναρξη του πειράματος η ρωγμή απέκτησε κλίση προς τα πάνω, γύρισε κάθετα προς τα πάνω (παράλληλα προς τη φόρτιση), έως ότου γύρισε προς τα μέσα.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-46, φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-46: Στάδια διάδοσης της ρωγμής δοκιμίου CTg2RP: (α) έναρξη ρωγμής με φορά προς τα πάνω, (β) έναρξη διάδοσης ρωγμής προς τα πάνω στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, (γ) διάδοση ρωγμής παράλληλα προς την ενίσχυση, (δ) διάδοση ρωγμής προς τα πάνω, μεταξύ των ευθειών 0-1, και ολοκλήρωση πειράματος

Το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg2RP παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-29, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης). Παρατηρούμε ότι η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης δεν έχει την αναμενόμενη μορφή και παρουσιάζει πολλές ανωμαλίες.

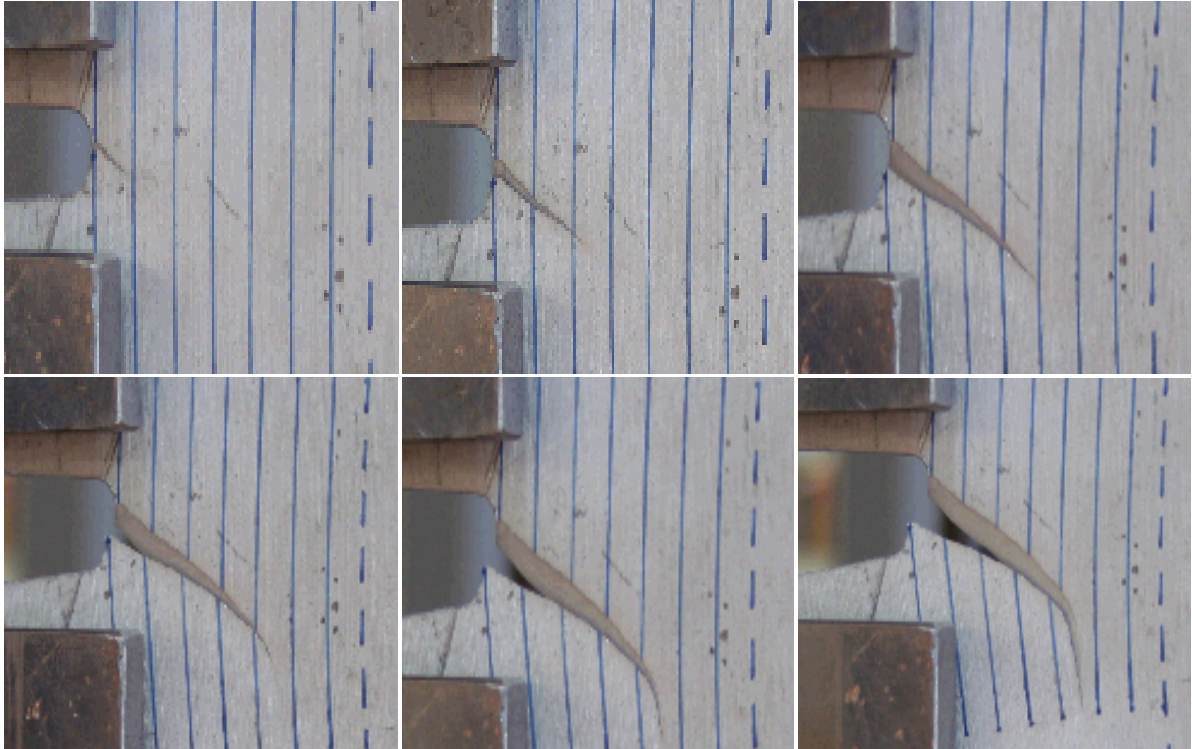


Σχήμα 4-29: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg2RP με ενισχυτικό βολβολάμας και “rear plate” 30 mm

▪ **Δοκίμιο CTg3RP**

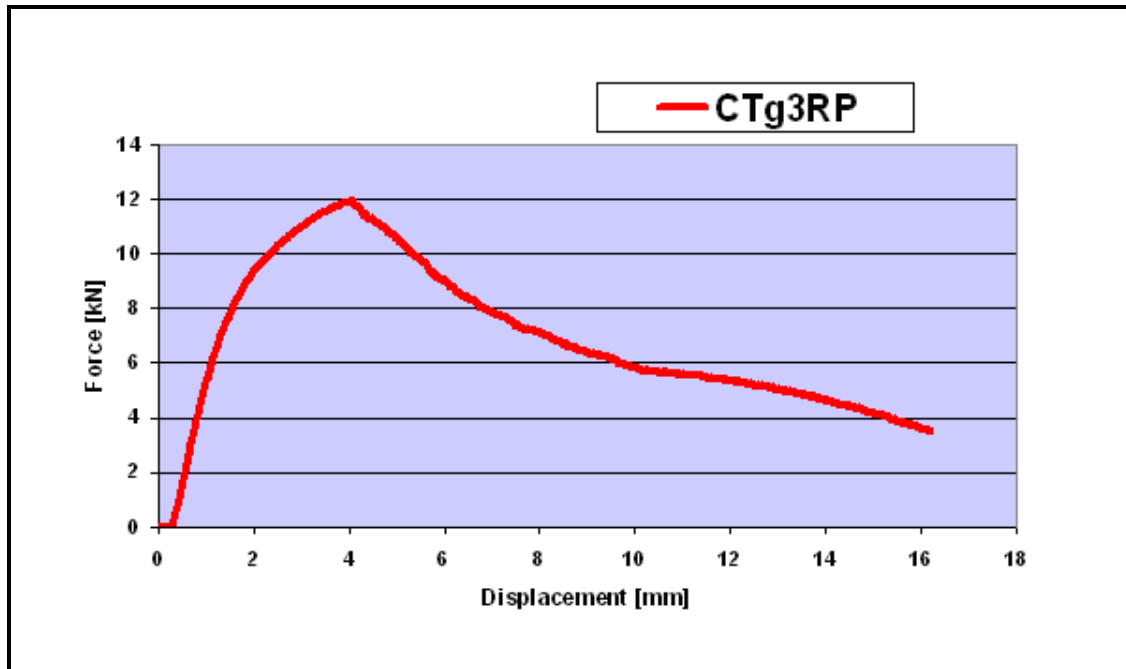
Το δοκίμιο CTg3RP είχε μικρότερο έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, μήκους 20 mm. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης [11.977 kN, 4.082 mm], με αρχικά διαγώνια κλίση προς τα κάτω. Μέχρι την ευθεία 3 (15 mm), η ρωγμή ακολούθησε σταθερή πορεία προς τα κάτω με διαγώνια κλίση. Μεταξύ των ευθειών 3-4 η ρωγμή συνάντησε εμπόδιο και καθυστέρησε η περαιτέρω διάδοσή της. Η κλίση στη συνέχεια αυξήθηκε, και μεταξύ των ευθειών 4-5 (20-25 mm κατά το μήκος του δοκιμίου) η ρωγμή άρχισε να διαδίδεται σε διεύθυνση παράλληλη της φόρτισης (και του ενισχυτικού) και με φορά προς τα κάτω. Παρατηρούμε ότι η ρωγμή μόλις κατάφερε να φθάσει περίπου στο ¼ του μήκους του δοκιμίου (χωρίς να συμπεριλάβουμε το “rear plate”), όποτε είναι πιθανό η ύπαρξη του “rear plate” να είχε ως αποτέλεσμα την πρόωρη αναστροφή της ρωγμής.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-47 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-47: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg3RP: (α) έναρξη ρωγμής στο κέντρο της τεχνητής ρωγμής υπό κλίση προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής, (γ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω με εντονότερη κλίση, (δ) καθυστέρηση ρωγμής, (ε) έναρξη διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο ενισχυτικό, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-30 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg3RP, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης). Παρατηρούμε ότι η σχέση Δύναμης – Μετατόπισης σε αυτό το δοκίμιο είναι πιο ομαλή από αυτές των προηγούμενων δοκιμίων CTg1RP και CTg2RP.



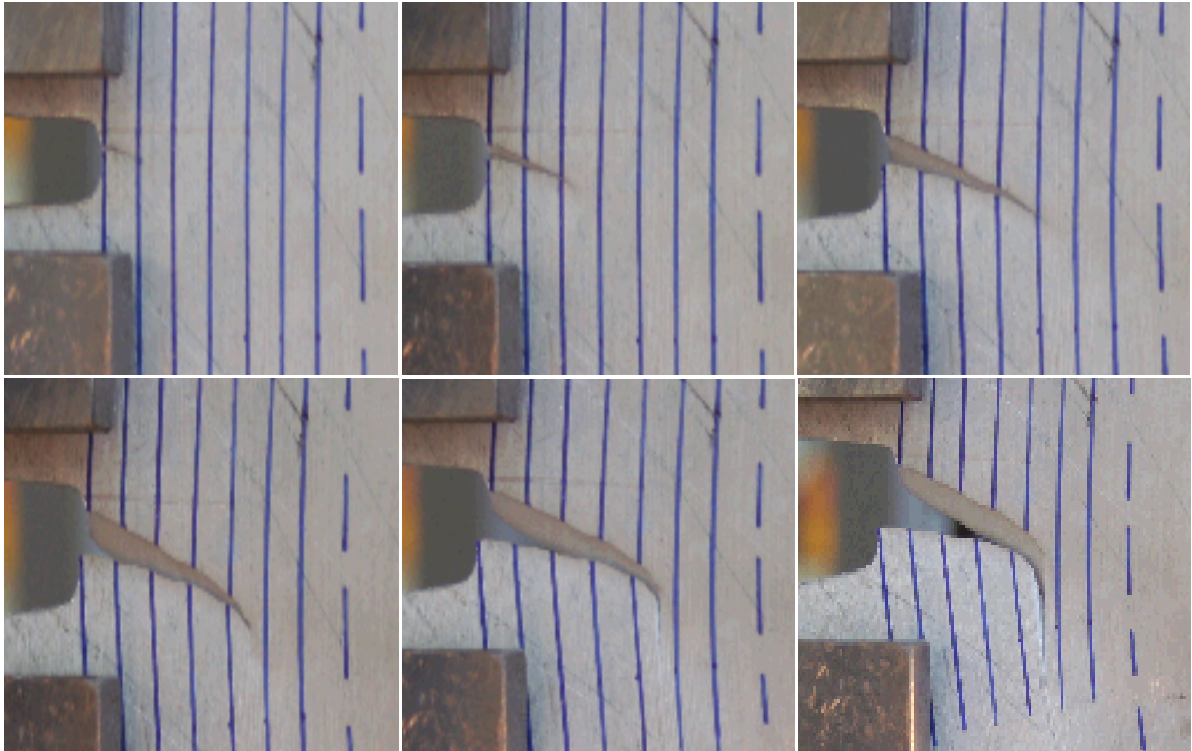
Σχήμα 4-30: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg3RP με ενισχυτικό βολβολάμας και “rear plate” 20 mm

▪ **Δοκίμιο CTg4RP**

Το επόμενο δοκίμιο CTg4RP εμφάνισε συμπεριφορά αρκετά όμοια με αυτή του προηγούμενου CTg3RP. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης - μετατόπισης [11.85 kN, 3.602 mm], με φορά προς τα κάτω. Η διάδοση της ρωγμής συνεχίστηκε με σταθερό ρυθμό έως την ευθεία 3 (15 mm), και στη συνέχεια με μεγαλύτερη κλίση. Μεταξύ των ευθειών 4 και 5, η ρωγμή αρχίζει να αποκτά διεύθυνση παράλληλη προς την ενίσχυση, μετά από καθυστέρηση. Τέλος, παρατηρήθηκε μικρή μεταπήδηση της ρωγμής προς τα δεξιά (προς την ενίσχυση), και, στη συνέχεια, συνέχισε την προηγούμενη πορεία παράλληλα προς τη φόρτιση, έως την ολοκλήρωση του πειράματος.

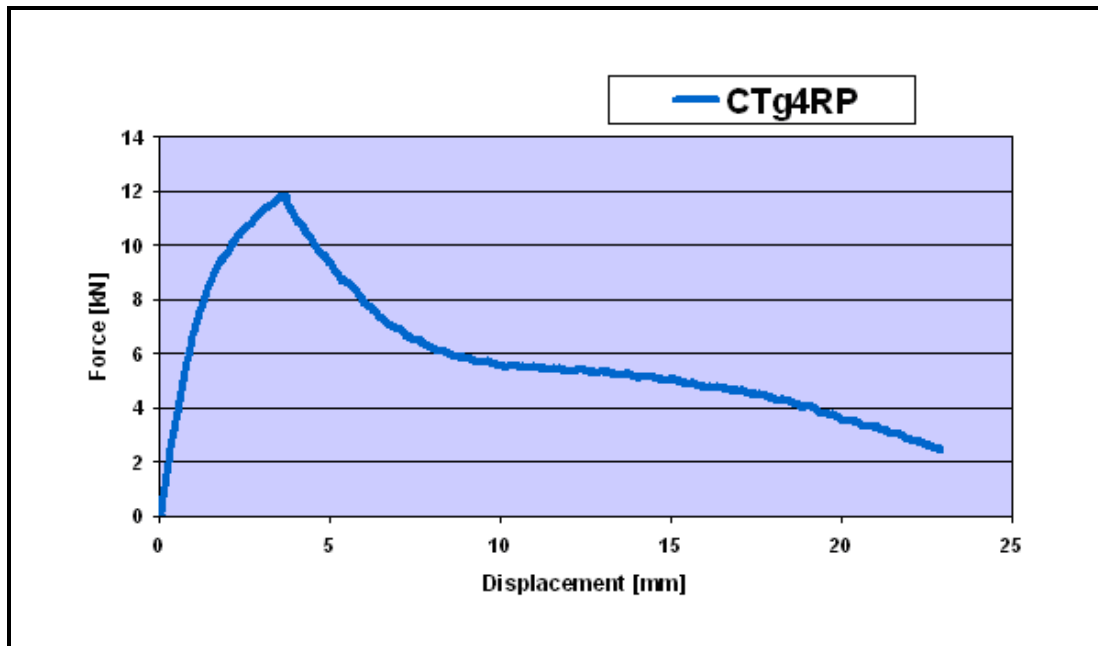
Όπως και στην περίπτωση του δοκιμίου CTg3RP, η ρωγμή διαδόθηκε με παρόμοιο τρόπο και στο δοκίμιο CTg4RP, χωρίς να καταφέρει να πλησιάσει τη ρίζα του ενισχυτικού. Η ρωγμή έστριψε «σχετικά νωρίς» και ακολούθησε ομαλή πορεία, χωρίς πολλές αλλαγές διεύθυνσης.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-48 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-48: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg4RP: (α) έναρξη ρωγμής υπό κλίση προς τα κάτω, (β) συνέχιση διάδοσης ρωγμής με την ίδια φορά, (γ) καθυστέρηση διάδοσης (ευθεία 4), (δ) διάδοση ρωγμής με εντονότερη κλίση, (ε) έναρξη διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω παράλληλα στο ενισχυτικό, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-31 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg4RP, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης).



Σχήμα 4-31: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg4RP με ενισχυτικό βολβολάμας και “rear plate” 20 mm

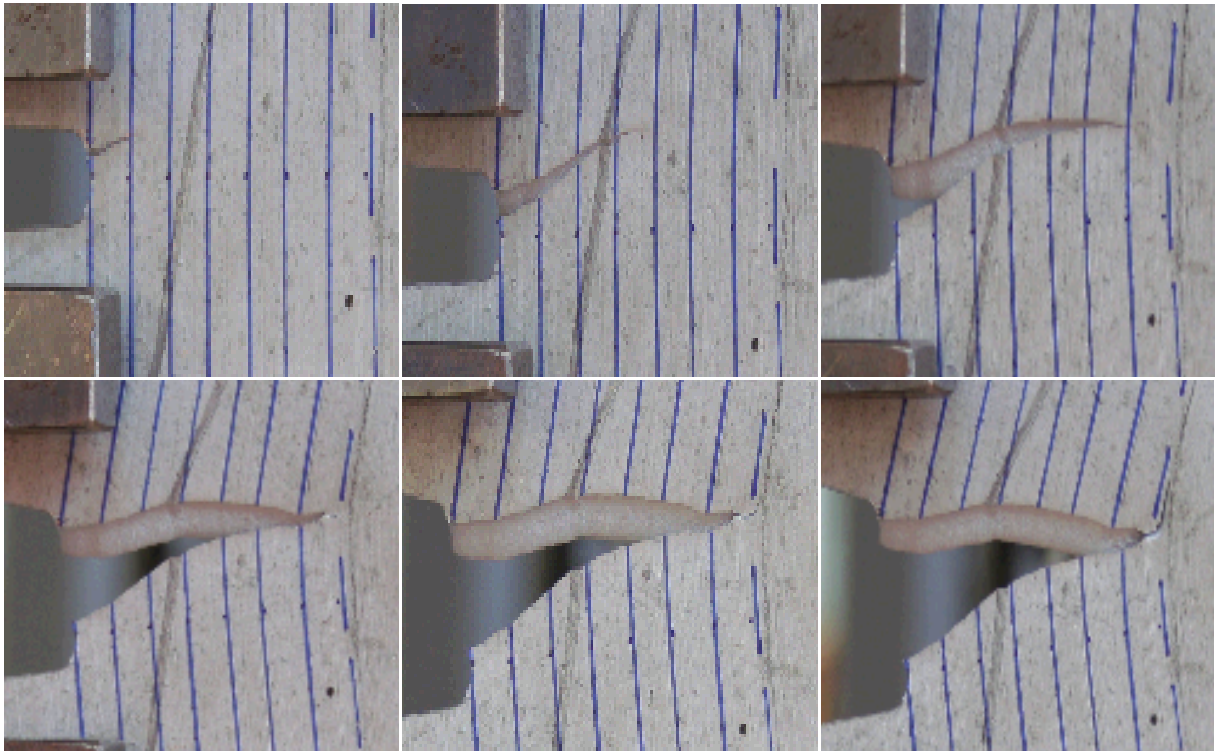
▪ **Δοκίμιο CTg5RP**

Το επόμενο δοκίμιο CTg5RP έχει μικρότερο μήκος πίσω ελάσματος, ίσο με 10 mm. Η διάδοση της ρωγμής ξεκίνησε σε φορτίο μικρότερο των προηγούμενων δοκιμίων, πιο συγκεκριμένα στο σημείο μέγιστης δύναμης [10.563 kN, 3.662 mm], με διεύθυνση διαγώνια προς την επιβολή του φορτίου και φορά προς τα πάνω. Μετά την ευθεία 1 (5 mm), η κλίση αυξάνεται, έως την ευθεία 2 (10 mm), ενώ από την ευθεία 3 και έπειτα η ρωγμή τείνει να ευθυγραμμισθεί και να διαδίδεται σε διεύθυνση σχεδόν κάθετη προς την ενίσχυση. Στην ευθεία 5 συναντά σημαντικό εμπόδιο και καθυστερείται η διάδοσή της. Αφού συναντήσει την ευθεία 6, δηλαδή φθάσει στο άκρο του πέλματος του ενισχυτικού, αρχίζει να αποκτά ανοδική πορεία και στη συνέχεια εμφανίζει και άλλη καθυστέρηση. Φθάνει σχεδόν στη μέση του πέλματος του ενισχυτικού με κλίση σχεδόν κάθετη με αυτό. Από εκείνο το σημείο και έπειτα, αρχίζει να διαδίδεται προς τα πάνω παράλληλα προς την ενίσχυση, έως την ολοκλήρωση του πειράματος.

Όπως παρουσιάζεται στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-49, η ρωγμή φαίνεται να έφθασε τη ρίζα του ενισχυτικού, στην πλευρά στην οποία γινόταν η παρατήρηση κατά το

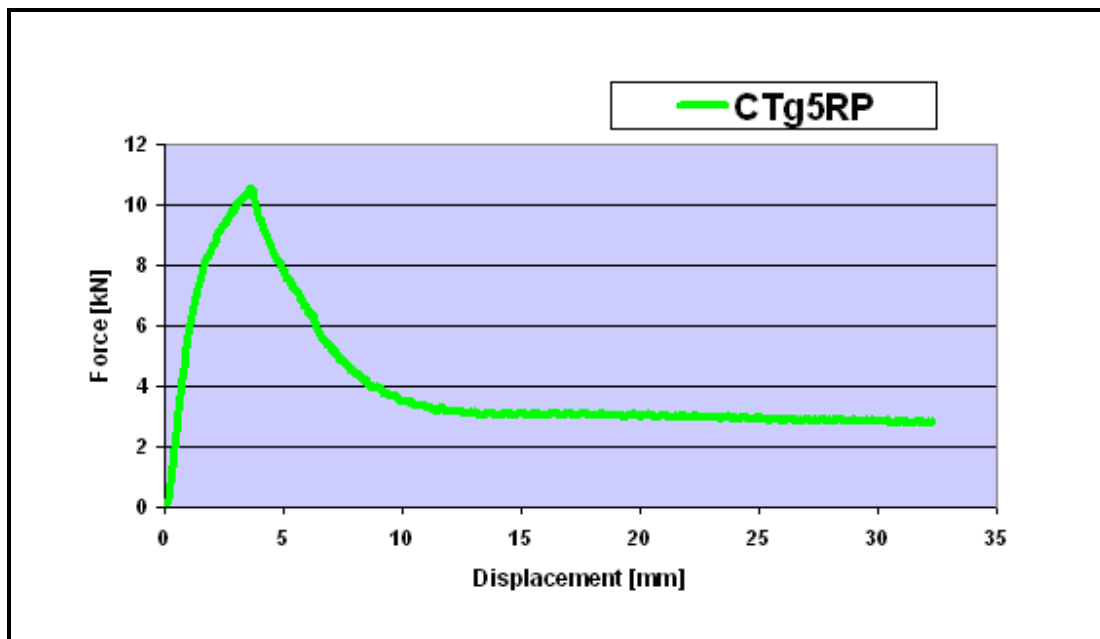
πείραμα. Από την έμπροσθεν πλευρά του ενισχυτικού, φαίνεται πως η ρωγμή δεν έφθασε στο πέλμα του ενισχυτικού, αλλά έστριψε λίγο πριν από αυτό το σημείο. Αυτές οι διαφορές μπορεί να οφείλονται στα διαφορετικά επίπεδα παραμόρφωσης που λαμβάνουν χώρα στις διαφορετικές πλευρές του δοκιμίου, καθώς οι δύο επιφάνειες της ρωγμής δεν μετατοπίζονται κάθετα η μία προς την άλλη.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-49 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-49: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg5RP: (α) έναρξη ρωγμής υπό κλίση προς τα πάνω, (β) συνέχιση διάδοσης προς τα πάνω, (γ) προσπάθεια ευθυγράμμισης ρωγμής, κάθετα προς την ενίσχυση, (δ) καθυστέρηση ρωγμής κοντά στο πέλμα, (ε) έναρξη διάδοσης ρωγμής προς τα πάνω, επάνω στο πέλμα του ενισχυτικού, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα πάνω, επάνω στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση του πειράματος.

Στο Σχήμα 4-32 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg5RP, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης).



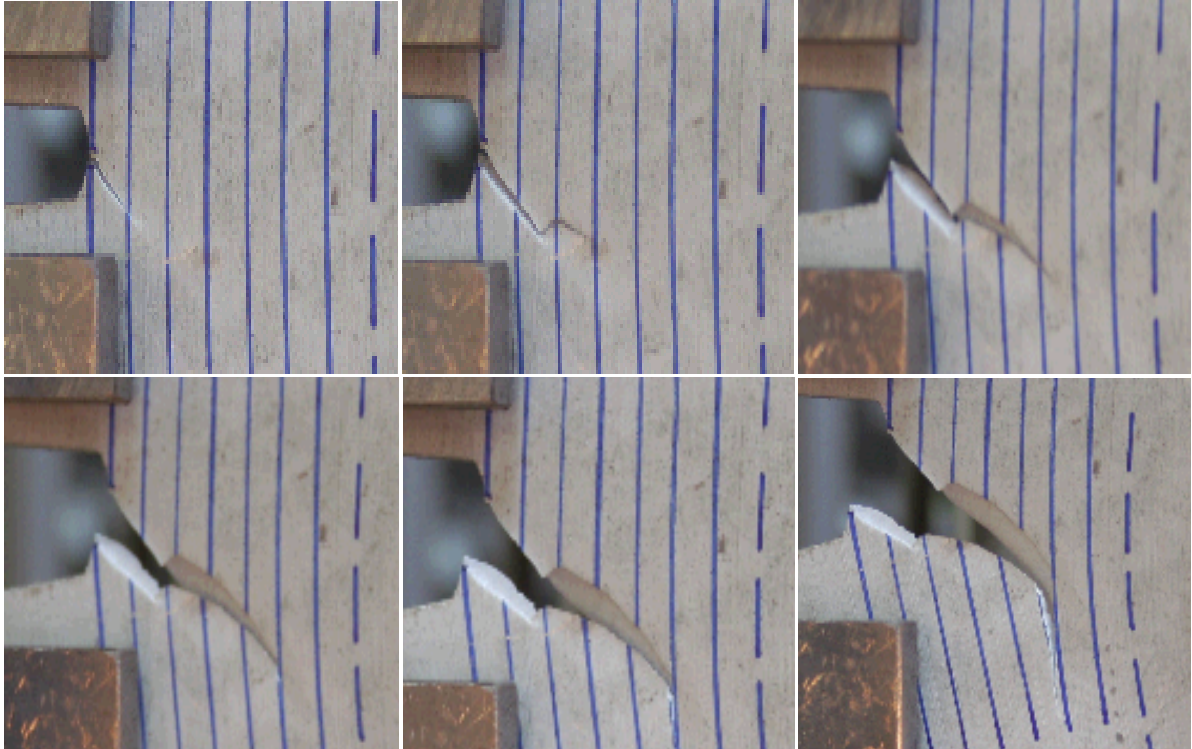
Σχήμα 4-32: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg5RP με ενισχυτικό βολβολάμας με “rear plate” 10 mm

▪ **Δοκίμιο CTg6RP**

Το τελευταίο δοκίμιο CTg6RP είχε έλασμα πίσω από το ενισχυτικό μήκους 10 mm. Η ρωγμή δεν εξαπλώθηκε μέχρι το πέλμα του ενισχυτικού, όπως στο προηγούμενο δοκίμιο, αλλά μέχρις ενός κοντινού σημείου.

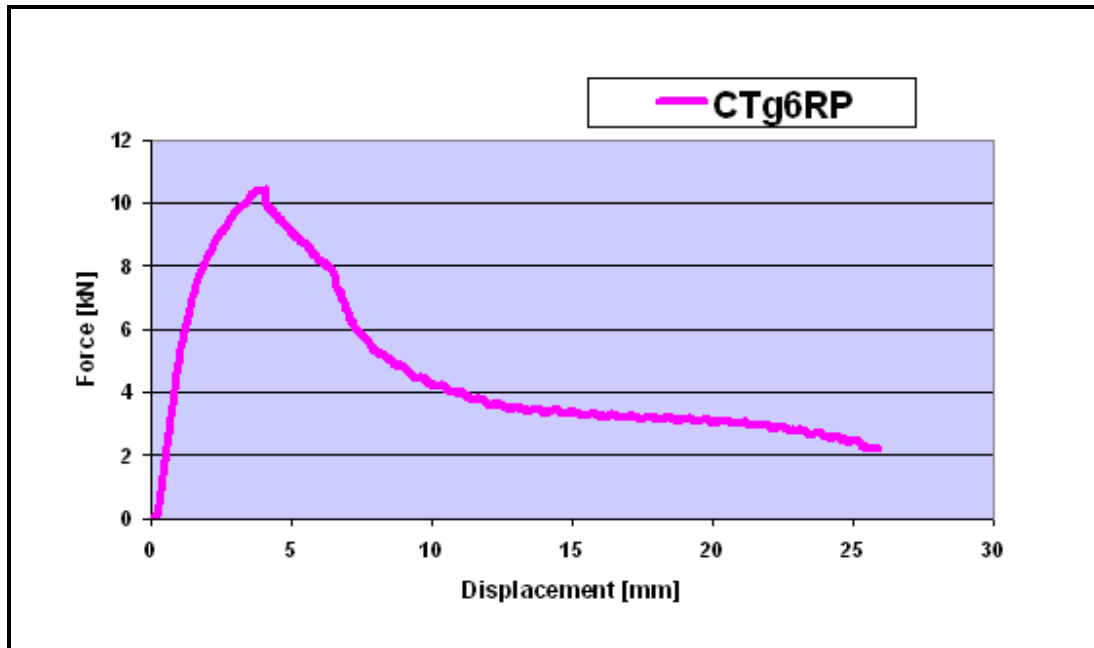
Η έναρξη της ρωγμής έγινε στο σημείο μέγιστης δύναμης [10.44 kN, 3.858 mm], με αρχική φορά προς τα κάτω. Στη συνέχεια, στο μέσο μεταξύ των ευθειών 1 και 2 μεταπήδησε προς τα πάνω και έπειτα συνέχισε την προηγούμενη πορεία μέχρι την ευθεία 5 (25 mm κατά το μήκος). Μετά την ευθεία 5, η ρωγμή αποκτά κλίση προς τα κάτω, παράλληλη με την επιβολή της φόρτισης και συνεχίζει με τον ίδιο τρόπο μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος.

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 4-50 φαίνεται η ακολουθούμενη πορεία της ρωγμής και τα σημαντικότερα στάδια που την αποτελούν.



Εικόνα 4-50: Στάδια διάδοσης της ρωγμής του δοκιμίου CTg6RP: (α) έναρξη ρωγμής διαγώνια προς τα κάτω, (β) απότομη αλλαγή κλίσης και συνέχιση διάδοσης ρωγμής όπως προηγούμενα, (γ) συνέχιση διάδοσης ρωγμής προς τα κάτω υπό μεγαλύτερη κλίση, (δ) καθυστέρηση ρωγμής επάνω στην ευθεία 5, (ε) έναρξη διάδοσης παράλληλα προς την ενίσχυση, (στ) διάδοση ρωγμής προς τα κάτω, παράλληλα στο πέλμα του ενισχυτικού και ολοκλήρωση πειράματος.

Στο Σχήμα 4-33 φαίνεται το διάγραμμα δύναμης - μετατόπισης του δοκιμίου CTg6RP, στο οποίο είναι φανερό το σημείο έναρξης της ρωγμής (σημείο μέγιστης δύναμης).



Σχήμα 4-33: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης του ενισχυμένου δοκιμίου CTg6R με ενισχυτικό βολβολάμας με “rear plate” 10 mm

4.6.3.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων για τα δοκίμια CTgiRP

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν σε αυτή την πειραματική ομάδα επέδειξαν συμπεριφορά σχετικά διαφορετική μεταξύ τους, λόγω του διαφορετικού μήκους του πίσω ελάσματος. Παρατηρούμε, ότι σε κανένα από τα δοκίμια που εξετάστηκαν, η ρωγμή δεν κατάφερε να διαπεράσει το ενισχυτικό, εκτός ίσως από την περίπτωση του δοκιμίου CTg5RP, στο οποίο έφθασε μέχρι τη ρίζα του ενισχυτικού.

Όσον αφορά στα δύο πρώτα δοκίμια της πειραματικής σειράς (CTg1RP, CTg2RP), θα μπορούσαμε να επισημάνουμε ότι οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που παρήχθησαν από τα πειραματικά αποτελέσματα δεν είχαν την αναμενόμενη φυσιολογική μορφή. Έτσι, δεν μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι τα δοκίμια αυτά αποτελούν πηγή ασφαλών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για τη σειρά δοκιμίων με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, μιας και το έλασμα που περιλάμβαναν ήταν αρκετά μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος του δοκιμίου και της τεχνητής ρωγμής. Μπορούμε να πούμε ότι αυτό οφείλεται σε λανθασμένο σχεδιασμό του πειράματος-ουσιαστικά των δοκιμίων-και όχι σε πειραματικό σφάλμα. Παρ’όλα αυτά, ο αριθμός των υπόλοιπων δοκιμίων, από τα

οποία εξήχθησαν ασφαλή συμπεράσματα, είναι αρκετός σύμφωνα με το πρότυπο ISO για CT δοκίμια εφελκυσμού [36], που απαιτεί την εξέταση τουλάχιστον τριών δοκιμίων για την επίτευξη καλής επαναληψιμότητας.

Γενικά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας των δοκιμίων CTgiRP ($i = 1, \dots, 6$) έδειξαν ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών παρουσίασε παρόμοια χαρακτηριστικά και φαινόμενα, τα οποία συνοψίζονται στα εξής :

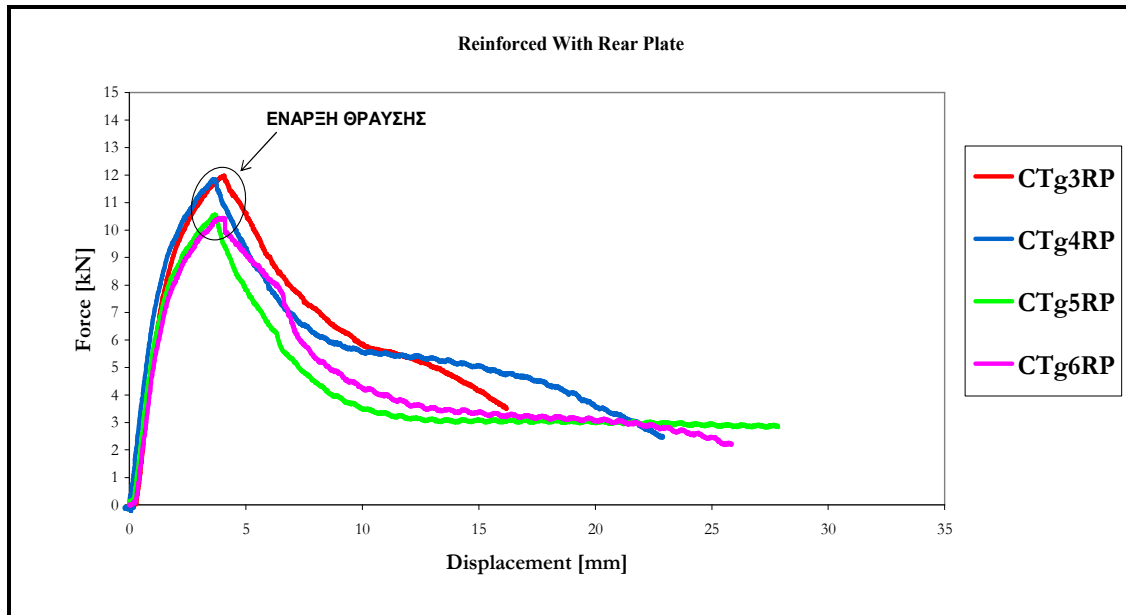
- (i) Έναρξη της ρωγμής από το άκρο της τεχνητής προϋπάρχουσας ρωγμής με μια αρχική γωνία περίπου 60° ή 135° , όχι πάντοτε από το κέντρο της.
- (ii) Στροφή ρωγμής, μικρές αλλαγές πορείας, κατεύθυνσης, και επαναπροσανατολισμός της ρωγμής
- (iii) Η ρωγμή καθυστερεί να διαδοθεί καθώς πλησιάζει στο πέλμα του ενισχυτικού.
- (iv) Η ρωγμή διαδίδεται παράλληλα με το πέλμα του ενισχυτικού και αποτυγχάνει να διαδοθεί διαμέσου του ενισχυτικού, διαπερνώντας το.
- (v) Η ρωγμή αποτυγχάνει να διαδοθεί σε δοκίμια με μεγάλο έλασμα πίσω από το ενισχυτικό (30 mm), και στρέφεται σχεδόν αμέσως προς τα κάτω, παράλληλα προς την ενίσχυση.

Στην Εικόνα 4-51, φαίνεται η τελική μορφή των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTgiRP, μετά τη θραύση.



Εικόνα 4-51: Τελική μορφή δοκιμίων CT με ενίσχυση βολβολάμας με “rear plate” μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, με τη σειρά που αναλύθηκαν παραπάνω

Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης των δοκιμίων CT_{giRP} ($i = 3, \dots, 6$) που προέκυψαν από αυτή την σειρά πειραμάτων, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-34. Επιλέχθηκαν μόνο τα τέσσερα τελευταία δοκίμια, διότι μόνο αυτά δίνουν ασφαλή αποτελέσματα και παρουσιάζουν ομαλή σχέση επιβαλλόμενης δυναμης-μετατόπισης. Σε αυτό το διάγραμμα μπορούν να παρατηρηθούν τα βήματα της έναρξης, στροφής και αλλαγής κατεύθυνσης των ρωγμών. Ο Πίνακας 4-17 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές δοκιμές στα έξι ενισχυμένα δοκίμια CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου βολβολάμας, όπου εξετάζεται η σχέση μεταξύ της δύναμης - μετατόπισης στη θέση έναρξης της ρωγμής, σημείο στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της δύναμης για κάθε δοκίμιο. Είναι προφανές ότι η έναρξη διάδοσης της ρωγμής απαιτούσε επιβολή μεγαλύτερης δύναμης, όταν υπήρχε μεγαλύτερο rear plate στο δοκίμιο. Η δύναμη αυτή προφανώς μειώνεται καθώς μειώνεται και το μήκος του πίσω ελάσματος.



Σχήμα 4-34: Συνολικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης ενισχυμένων δοκιμίων CTgiRP (i: 3,...,6), με ενισχυτικό βολβολάμας

Πίνακας 4-17: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTgiRP (i = 1,...,6), με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου βολβολάμας και μεταβαλλόμενο “rear plate”.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ “REAR PLATE” [mm]	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
CTg1RP	30	12.770	2.902
CTg2RP	30	12.863	3.376
CTg3RP	20	11.977	4.082
CTg4RP	20	11.850	3.602
CTg5RP	10	10.565	3.662
CTg6RP	10	10.444	3.858
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ		11.744	3.580

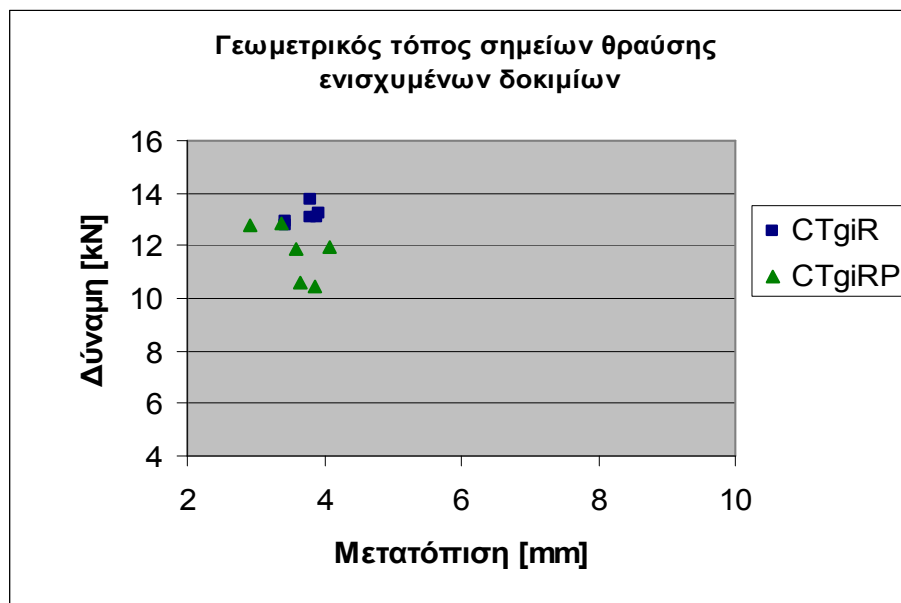
4.6.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων ενισχυμένων δοκιμίων βολβολάμας και σύγκριση με συγκολλητά δοκίμια αλουμινίου

Στον Πίνακα 4-18 συνοψίζονται τα σημεία μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης των ενισχυμένων με βολβολάμα δοκιμίων χωρίς και με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, καθώς και ο μέσος όρος των τιμών αυτών. Παρατηρούμε ότι το φορτίο θραύσης και για τις δύο κατηγορίες κυμάνθηκε στα 12.44 kN, ενώ μεγαλύτερο φορτίο για την έναρξη της ρωγμής απαιτήθηκε από τα δοκίμια χωρίς “rear plate”.

Επίσης, στο διάγραμμα του Σχήματος 4-35, παρουσιάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων έναρξης ρωγμής των δύο ομάδων δοκιμίων, CTgiR (χωρίς έλασμα πίσω από το ενισχυτικό) και CTgiRP (με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό). Όπως είναι προφανές, στα δοκίμια χωρίς έλασμα πίσω από το ενισχυτικό, η θραύση πραγματοποιήθηκε σε μεγαλύτερο φορτίο, λόγω του μικρότερου μήκους αρχικής ρωγμής που υπήρχε σε αυτά (51 mm), αλλά για παρεμφερείς τιμές μετατόπισης έως τη θραύση.

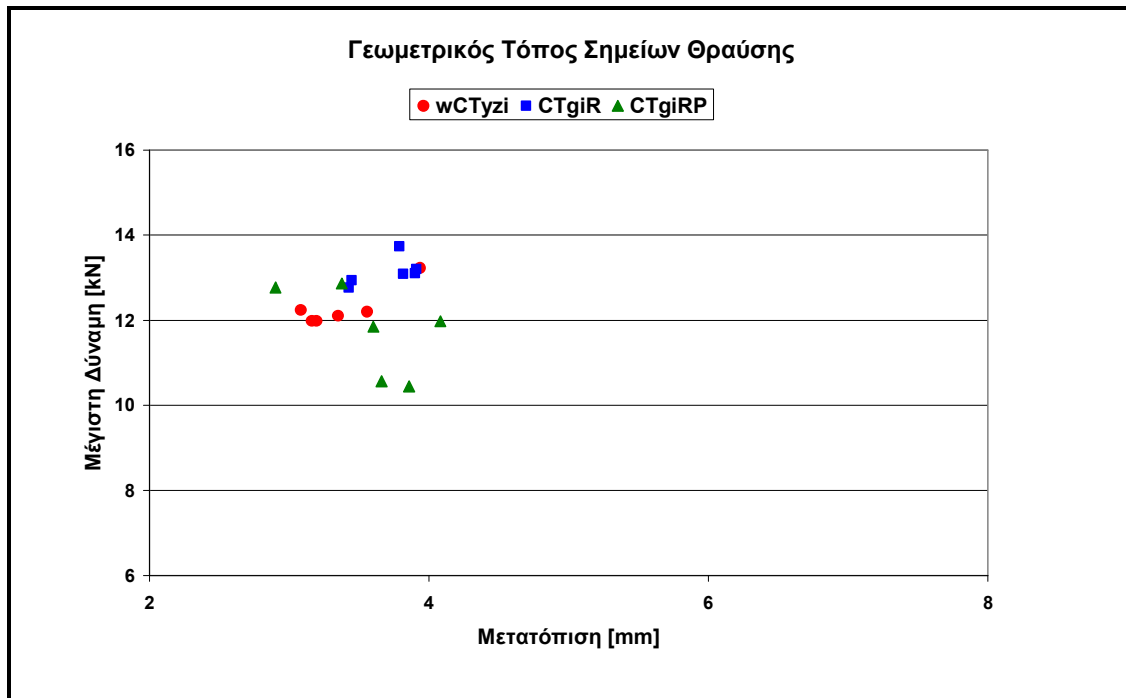
Πίνακας 4-18: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των ενισχυμένων με βολβολάμα δοκιμίων εφελκυσμού CTgiR ($i = 1, \dots, 6$) χωρίς “rear plate”, και CTgiRP ($i = 1, \dots, 6$), με μεταβαλλόμενο “rear plate”

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ “REAR PLATE” [mm]	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
CTg1R	0	12.942	3.447
CTg2R	0	13.093	3.815
CTg3R	0	13.207	3.91
CTg4R	0	13.738	3.789
CTg5R	0	12.770	3.427
CTg6R	0	13.104	3.901
CTg1RP	30	12.770	2.902
CTg2RP	30	12.863	3.376
CTg3RP	20	11.977	4.082
CTg4RP	20	11.850	3.602
CTg5RP	10	10.565	3.662
CTg6RP	10	10.444	3.858
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ		12.443	3.647



Σχήμα 4-35: Γεωμετρικός τόπος σημείων θραύσης ενισχυμένων δοκιμίων με βολβολάμα. Με πράσινο χρώμα συμβολίζονται τα δοκίμια με “rear plate” και με μπλε χρώμα τα δοκίμια χωρίς “rear plate”

Συγκριτικά με τη δεύτερη ομάδα πειραμάτων σε συγκολλητά CT δοκίμια, που αναλύθηκε στην Παράγραφο 4.5, τα ενισχυμένα δοκίμια χωρίς “rear plate” έσπαγαν σε μεγαλύτερο φορτίο, δεδομένου ότι είχαν μικρότερο αρχικό μήκος ρωγμής (51 mm). Μικρότερο φορτίο έναρξης ρωγμής απαιτούνταν για τα δοκίμια με “rear plate”, ο οποίος κατά μέσο όρο βρέθηκε ίσος με 11.744 kN για αντίστοιχη μετατόπιση 3.58 mm, σε σχέση με τα συγκολλητά δοκίμια, των οποίων η μέγιστη δύναμη έναρξης θραύσης ήταν συγκεντρωμένη γύρω από τα 12.29 kN για αντίστοιχη μετατόπιση θραύσης 3.38 mm. Με λίγα λόγια, στα συγκολλητά δοκίμια η έναρξη της θραύσης συνέβη αργότερα σε σχέση με τα ενισχυμένα δοκίμια με “rear plate”, λόγω της μεγαλύτερης ολκιμότητάς τους, που οδήγησε στη μεγαλύτερη «απορρόφηση» ενέργειας ως πλαστική παραμόρφωση. Τα παραπάνω συμπεράσματα παρουσιάζονται και στο διάγραμμα του Σχήματος 4-36, όπου και παρουσιάζεται ο γεωμετρικός τόπος (μέγιστου φορτίου – αντίστοιχης μετατόπισης) όλων των δοκιμίων που εξετάστηκαν στο πειραματικό πρόγραμμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 4-36: Γεωμετρικός τόπος σημείων θραύσης όλων των δοκιμίων που εξετάστηκαν. Με πράσινο χρώμα συμβολίζονται τα δοκίμια με έλασμα πίσω από το ενισχυτικό (CTgiRP), με μπλε χρώμα τα ενισχυμένα δοκίμια χωρίς έλασμα (CTgiR) και με κόκκινο τα συγκολλητά δοκίμια (wCTyzi).

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 Σύνοψη Πειραματικών Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

Η ολοκλήρωση ενός πειραματικού προγράμματος δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή, αφενός να εκτιμήσει το κατά πόσο ανακτήθηκαν ικανοποιητικά στοιχεία για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων που έχουν σχέση με τον σκοπό για τον οποίο εκτελέστηκε, και αφετέρου για να διαπιστωθεί η επάρκεια αυτών και η τυχόν απαίτηση περαιτέρω ελέγχων που θα επιτρέψουν την καταγραφή ασφαλών συμπερασμάτων που θα περιγράφουν πλήρως το φαινόμενο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το μεγαλύτερο ποσοστό των απαιτήσεων και οι στόχοι επιτεύχθηκαν. Δόθηκε παράλληλα, όμως, η δυνατότητα να «ανοιχτούν» νέοι ορίζοντες οι οποίοι, παρόλο που αφορούν συναφή αντικείμενα με το ερευνητικό πεδίο που οριοθετήθηκε για τη μελέτη των αντικειμένων που περιγράφηκαν σαφώς στο Κεφάλαιο 1, να υπάρχουν και αντικείμενα που χρήζουν περαιτέρω έρευνας, ανάλυσης και μελέτης.

Οι κύριες παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα σχετικά με την έναρξη, διάδοση και σύλληψη των ρωγμών, τα οποία προκύπτουν από τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος αυτής της μελέτης και αφορούν στην ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών με χρήση δοκιμών μικρής κλίμακας, συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Η εξέταση υβριδικών δοκιμών έδειξε πως η ύπαρξη της συγκόλλησης –με την προϋπόθεση ότι έχει ελεγχθεί και πληροί όλες τις απαιτήσεις των προτύπων και των προεπιλεγμένων διαδικασιών- μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα στη διάδοση της ρωγμής σε μια ναυπηγική κατασκευή από αλουμίνιο, καθώς αποτελεί μια επιπλέον μορφή ενίσχυσης.
2. Η διάδοση των ρωγμών εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη των ενισχυτικών και από τα χαρακτηριστικά τους, γεγονός που έγινε προφανές μέσω των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με ενισχυτικό βολβολάμας.

3. Το σημείο έναρξης της ρωγμής σε ένα δοκίμιο εξαρτάται κατά πολύ από τα αρχικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, και κυριότερα από το μήκος της αρχικής τεχνητής ρωγμής υπό συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης που λαμβάνονται ως σταθερή παράμετρος.
4. Η έλλειψη ενισχυτικών μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων στα δοκίμια, όπως συνέβη στην περίπτωση των συγκολλητών δοκιμίων. Η ύπαρξη μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων μπορεί να οδηγήσει μεν σε καθυστέρηση διάδοσης της ρωγμής, καθώς το φορτίο λαμβάνεται ως παραμόρφωση, αλλά μπορεί να οδηγήσει και σε μείωση της αντοχής του δοκιμίου.
5. Στα μη ενισχυμένα συγκολλητά δοκίμια, το σημείο μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης δεν συμπίπτει με το σημείο έναρξης της ρωγμής, σε αντίθεση με τα ενισχυμένα δοκίμια βολβολάμας.
6. Το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό επηρεάζει την ακολουθούμενη πορεία διάδοσης των ρωγμών. Πιο συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι στα δοκίμια με μεταβαλλόμενο μήκος ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό, μεγαλύτερο μήκος “tear plate” απαιτούσε μεγαλύτερο φορτίο για την έναρξη της ρωγμής, και σε πολλές περιπτώσεις είχε ως αποτέλεσμα την πρόωρη στροφή της ρωγμής.
7. Στα δοκίμια που περιείχαν ενίσχυση, τα στάδια της ρωγμής ήταν πιο ευδιάκριτα και αποτελούνταν από τα εξής στάδια: (α) έναρξη της ρωγμής, (β) «στροφή» της ρωγμής, μικρές αλλαγές πορείας ή κατεύθυνσης και επαναπροσανατολισμός της ρωγμής, (γ) καθυστέρηση διάδοσης της ρωγμής κοντά στο πέλμα του ενισχυτικού, και (δ) αποτυχία διάδοσης της ρωγμής διαμέσου του ενισχυτικού σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από μία (δοκίμιο CTg2R).
8. Το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας κατά τη διάδοση των ρωγμών μπορεί να χαρτογραφηθεί γνωρίζοντας τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές παραμέτρους.

Η ολοκλήρωση αυτού του πειραματικού προγράμματος παρέχει χρήσιμες πληροφορίες και τα απαραίτητα χαρακτηριστικά στοιχεία της συμπεριφοράς σε θραύση των αλουμινένιων ενισχυμένων ναυπηγικών κατασκευών, το οποίο ήταν ένας από τους κύριους στόχους αυτής της έρευνας. Τα πειραματικά αποτελέσματα που αποκομίσαμε, με τις κατάλληλες αναλύσεις, μπορούν να καλύψουν ορισμένα ανεξιχνίαστα σημεία που αφορούν στη γνώση των διαδικασιών και των κανόνων που διέπουν την έναρξη, διάδοση και σύλληψη των ρωγμών και που ισχύουν για τις αλουμινένιες αλλά και για άλλες μεταλλικές κατασκευές, καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι διατάξεις με ενισχύσεις.

5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων με Προηγούμενες Μελέτες

Μετά από συστηματική και ενδελεχή μελέτη προηγούμενων πειραματικών προγραμμάτων που έχουν διεξαχθεί στο ίδιο πειραματικό πεδίο και είχαν ως θέμα τη διάδοση ρωγμών σε αλουμινένιες κατασκευές, κατέστη δυνατή η απόκτηση τεχνογνωσίας και εξασφαλίστηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έτσι ώστε να είναι ξεκάθαρη η χρησιμότητα των διαφορετικών τύπων ενισχύσεων και υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ναυπηγικές κατασκευές.

Πιο συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη διπλωματική εργασία του προπτυχιακού φοιτητή Ιωάννη Αθανασάτου [8], στην οποία εξετάστηκαν δοκίμια ίδιων διαστάσεων με αυτά της παρούσης διπλωματικής, αλλά διαφορετικού τύπου ενισχυτικού (ενισχυτικά «τύπου T»). Επίσης, στην προαναφερθείσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα και σε υβριδικά συγκολλητά δοκίμια, με τη διαφορά ότι η τεχνητή ρωγμή βρισκόταν στο τμήμα του κράματος 1561.

Αντίστοιχη σύγκριση έγινε με τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας του Μιχαλόπουλου Στέφανου [10], και της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Κωνσταντίνου Γαλάνη [11], στην οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε απλά δοκίμια CT του υλικού 1561, καθώς και σε δοκίμια με εξελασμένα και συγκολλητά ενισχυτικά T και απλής λάμας. Τα δοκίμια αυτά δεν είχαν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις και

χαρακτηριστικά με τα δοκίμια της παρούσας διπλωματικής, οπότε η σύγκριση θα είναι περισσότερο ποιοτική.

Μετά από παρατήρηση και σύγκριση των παραπάνω μελετών με τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκαν τα εξής:

1. Όσον αφορά στα υβριδικά δοκίμια, και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκαν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Στην περίπτωση στην οποία η ρωγμή βρισκόταν στο υλικό 1561 [8], απαιτήθηκε μεγαλύτερο φορτίο για την έναρξη της θραύσης, αλλά η ρωγμή σε όλες τις περιπτώσεις κατάφερε να διαδοθεί διαμέσου της συγκόλλησης. Από την άλλη, στα υβριδικά δοκίμια της παρούσας εργασίας, παρατηρήθηκε πως η ρωγμή δεν κατάφερε να διαπεράσει τη συγκόλληση σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται είτε στο μεγάλο ποσοστό πλαστικών παραμορφώσεων που παρουσιάστηκαν στο υλικό (λόγω της μεγαλύτερης ολκιμότητας του κράματος 5083, σε σχέση με το κράμα 1561, όπου και ξεκίνησε η ρωγμή), είτε στην ποιότητα της συγκόλλησης και σε άλλους παράγοντες. Η ύπαρξη διαφορετικού υλικού στο πίσω μέρος ήταν καθοριστικής σημασίας όσον αφορά στα αποτελέσματα.
2. Μετά από σύγκριση των υβριδικών δοκιμίων 1561-5083, με απλά δοκίμια εφελκυσμού, υλικού 1561, βρέθηκε πως η συγκόλληση αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα στη διάδοση της ρωγμής. Επίσης, οδηγεί στη στροφή της ρωγμής και στη διάδοσή της παράλληλα σε αυτήν, γεγονός που σημαίνει πως σε μια συγκολλητή κατασκευή είναι πιο εύκολο να γίνει πρόληψη και αντικατάσταση των τμημάτων της σε περίπτωση θραύσης, αφού δεν υπάρχει ανεξέλεκτη διάδοση της ρωγμής καθ'όλο το μήκος της.
3. Συγκριτικά με δοκίμια εφελκυσμού ίδιων διαστάσεων, με εξελασμένα ενισχυτικά «τύπου T» [8], παρατηρήθηκε πως σε αυτήν την περίπτωση η έναρξη, καθώς και η διάδοση της ρωγμής απαιτούν μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο, σε σχέση με τα εξελασμένα ενισχυτικά τύπου βολβολάμας. Τα πειράματα αυτά αφορούσαν σε δοκίμια με και χωρίς έλασμα πίσω από το ενισχυτικό. Έτσι, θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε πως τα ενισχυτικά «τύπου T» υπερέχουν σε αντοχή έναντι της

βολβολάμας, όταν υπόκειται σε εφελκυστικό φορτίο σταθερού ρυθμού μετατόπισης.

4. Μέσω της πειραματικής διαδικασίας, επιβεβαιώθηκε η υπεροχή των εξελασμένων ενισχυτικών έναντι των συγκολλητών η οποία είχε εξετασθεί στο παρελθόν [10]. Λόγω του γεγονότος ότι οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων της προαναφερθείσας εργασίας, σε σχέση με αυτά της παρούσας, δεν ήταν απόλυτα τα ίδια, αλλά παρεμφερή, δεν μπορεί να γίνει ακριβής σύγκριση. Πρέπει πάντως να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι στην περίπτωση των συγκολλητών ενισχυτικών, σε 2 εκ των 5 δοκιμίων (40%) η ρωγμή κατάφερε να διαδοθεί διαμέσου της συγκόλλησης και στη συνέχεια του ενισχυτικού, ενώ, στην περίπτωση των δοκιμίων με εξελασμένα ενισχυτικά βολβολάμας, η ρωγμή κατάφερε να διαδοθεί υπό γωνία μέσω του ενισχυτικού μόνο σε μία περίπτωση εκ των 12 δοκιμίων –με “rear plate” και χωρίς- που εξετάστηκαν συνολικά (8.33%). Μπορούμε, επομένως να πούμε συμπερασματικά, πως τα εξελασμένα δοκίμια υπερέχουν των συγκολλητών, καθώς περιέχουν λιγότερες κατασκευαστικές ατέλειες, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν αστοχία μιας κατασκευής.

Η σύγκριση διαφορετικών μελετών και πειραματικών προγραμμάτων μπορεί να προσφέρει στο μελετητή ναυπηγό τη δυνατότητα σωστής αξιολόγησης και επιλογής μεταξύ διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης ή διατάξεων συγκόλλησης, με στόχο την αύξηση σε αντοχή τμημάτων μιας ναυπηγικής κατασκευής που καταπονούνται σημαντικά, όπως είναι ο πυθμένας, το κατάστρωμα, τα πλευρικά ελάσματα, οι φρακτές κ.α. Μια προσεκτική επιλογή του τύπου των ενισχυτικών, της γεωμετρίας τους και της κατασκευαστικής τους διαμόρφωσης μπορεί να βελτιώσει τη γενική συμπεριφορά μιας ναυπηγικής κατασκευής, εκπληρώνοντας με τον τρόπο αυτό τις απαιτήσεις που τίθενται από τον εκάστοτε κατασκευαστή.

5.3 Στόχοι που Επιτεύχθηκαν μέσω της Διπλωματικής Εργασίας

Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε μια προσπάθεια κατανόησης της μηχανικής της θραύσης και των μηχανισμών που διέπουν την κατασκευαστική

απόκριση των ναυπηγικών κατασκευών από αλουμίνιο. Πιο συγκεκριμένα, κύριος σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η εξέταση και παρατήρηση της συμπεριφοράς των αναπτυσσόμενων ρωγμών στις ναυπηγικές κατασκευές από κράματα αλουμινίου, με απώτερο στόχο τη χαρτογράφηση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων, γεγονός που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας των ναυπηγικών κατασκευών και τον καθορισμό των ορίων ασφαλούς αστοχίας, προβλέποντας με ακρίβεια την επικινδυνότητα της κάθε ρωγμής για την κατασκευαστική ακεραιότητά τους.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού διενεργήθηκε ένα εκτεταμένο πειραματικό πρόγραμμα σε τρεις ομάδες δοκιμών, αρχικά για τον υπολογισμό και την εκτίμηση βασικών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που εξετάστηκαν, και κατά δεύτερον για την παρατήρηση και κατανόηση των φαινομένων της έναρξης, διάδοσης και σύλληψης ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα και συγκολλητά πλαίσια αλουμινίου. Το πειραματικό πρόγραμμα αυτό είχε ως απώτερο στόχο να δώσει απαντήσεις σε βασικά ερωτήματα που αφορούν σε ναυπηγικές κατασκευές από αλουμίνιο, όπως είναι τα εξής:

Προς ποια κατεύθυνση και με ποιο τρόπο θα διαδοθεί μια ρωγμή σε ένα ενισχυμένο έλασμα; Κατά πόσο η κατασκευαστική διαμόρφωση του ενισχυτικού επηρεάζει τη διάδοση και τη σύλληψη μιας ρωγμής; Ποιες παράμετροι έχουν επιπτώσεις στην ακολουθούμενη πορεία διάδοσης των ρωγμών; Ποιος είναι ο ρόλος της ύπαρξης μιας συγκόλλησης στη διάδοση μιας ρωγμής σε ένα αλουμινένιο πλαίσιο; Τι πρέπει να γνωρίζει ο μελετητής ναυπηγός, έτσι ώστε να βελτιώσει την αντοχή μιας ναυπηγικής κατασκευής σε ρωγμάτωση, λαμβάνοντας υπόψη και τις υπάρχουσες κατασκευαστικές απαιτήσεις; Στις παραπάνω ερωτήσεις η παρούσα εργασία δίνει πλήρως ή μερικώς τις απαιτούμενες απαντήσεις, όπως αυτές αναφέρθηκαν στα Κεφάλαια 5.1 και 5.2.

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η διπλωματική αυτή εργασία θα οδηγήσει σε νέες γνώσεις σχετικά με την επίδραση των ενισχυτικών στοιχείων στα φαινόμενα διάδοσης και σύλληψης των ρωγμών, ειδικά λόγω της ραγδαίας εξάπλωσης των κραμάτων αλουμινίου στις ναυπηγικές εφαρμογές, καθώς και να αποτελέσει τη βάση για μελλοντικές έρευνες που αφορούν σε νέα κράματα αλουμινίου, για τα οποία δεν υπάρχουν ακόμα εκτεταμένες μελέτες.

Οι κύριοι στόχοι που επιτεύχθηκαν μέσω της μελέτης αυτής για την πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών, συνοψίζονται στους εξής:

- ✓ Θεωρητική μελέτη και ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών.
- ✓ Διεύρυνση γνώσεων γύρω από νέα κράματα αλουμινίου, και της συμπεριφοράς τους σε θραύση, για τα οποία υπάρχει ακόμα περιορισμένη χρήση και βιβλιογραφία, όπως είναι το κράμα 1561, από το οποίο παρασκευάστηκαν τα δοκίμια της παρούσας διπλωματικής.
- ✓ Ολοκλήρωση μιας σειράς πειραματικών δοκιμών θραύσης με χρήση μικρής κλίμακας ενισχυμένων και μη δοκιμίων, αντιπροσωπευτικών πραγματικών κατασκευαστικών στοιχείων.
- ✓ Μακροσκοπική παρατήρηση και καταγραφή των φαινομένων που σχετίζονται με την έναρξη, διάδοση και σύλληψη των ρωγμών, κατά τη διάρκεια του πειραματικού προγράμματος
- ✓ Χαρτογράφηση της ακολουθούμενης πορείας της ρωγμής σε ενισχυμένα και συγκολλητά πλαίσια αλουμινίου που παρατηρήθηκε στις πειραματικές δοκιμές.
- ✓ Αξιολόγηση των παραμέτρων της σχεδίασης που επιδρούν στη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών (χαρακτηριστικά υλικού, τεχνητών ρωγμών, ύπαρξη μικροκενών, ποιότητα συγκόλλησης, κ.α).
- ✓ Προσδιορισμός των ιδιοτήτων που προσδίδουν τα ενισχυτικά και οι διατάξεις συγκόλλησης στα πλαίσια αλουμινίου που αποτελούν μια ναυπηγική κατασκευή.
- ✓ Αξιολόγηση και συγκριτική ανάλυση των διαφόρων τύπων ενισχύσεων και των κατασκευαστικών διαμορφώσεών τους, καθώς και των πλεονεκτημάτων που παρέχουν οι συγκολλήσεις σε πλαίσια αλουμινίου, σε σχέση με απλά πλαίσια

ναυπηγικού κράματος, όσον αφορά στην αντοχή και την ανοχή τους σε ρωγμάτωση.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, είναι σίγουρο πως η χαρτογράφηση και η σωστή πρόβλεψη της διάδοσης των ρωγμών είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, δεδομένου ότι η αντοχή μιας κατασκευής σε θραύση μετά την έναρξη των ρωγμών εξαρτάται ιδιαίτερα από το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους. Στη σημερινή εποχή, τα κράματα αλουμινίου έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε νέας τεχνολογίας ταχύπλοα σκάφη, τα οποία κατασκευάζονται σε ολοένα και μεγαλύτερες διαστάσεις, και δεδομένου ότι αντιμετωπίζουν όλο και περισσότερους κινδύνους στο δυσμενές θαλάσσιο περιβάλλον, η εξασφάλιση της κατασκευαστικής τους αντοχής έναντι οποιασδήποτε αστοχίας γίνεται όλο και πιο σύνθετη και απαιτητική.

Η παρούσα μελέτη παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για εκείνες τις συνθήκες και περιστάσεις που οδηγούν σε αστοχία, και οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των προληπτικών ή επισκευαστικών μέτρων που θα υλοποιηθούν σε μια ναυπηγική κατασκευή, προκειμένου να αποφευχθεί η επανάληψη των αστοχιών αυτών και να διασφαλιστεί η κατασκευαστική ακεραιότητά τους.

5.4 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Εκτός από τους κύριους στόχους που επιτεύχθηκαν από την παρούσα εργασία, άλλος ένας βασικός σκοπός της είναι να ανοίξει νέους τομείς της έρευνας για την επαλήθευση και περαιτέρω επέκταση των επιτευχθέντων αποτελεσμάτων, για διαφορετικούς τύπους κατασκευών και υλικών. Στις παρακάτω παραγράφους βρίσκονται προτάσεις επέκτασης της παρούσας διπλωματικής.

Η διενέργεια κάποιου αντίστοιχου πειραματικού προγράμματος σε διαφορετικές κατασκευαστικές εφαρμογές και με χρήση διαφορετικού κατασκευαστικού υλικού, όπως νέα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε πλοία νέας τεχνολογίας, θα είχε ως αποτέλεσμα την επέκταση των πειραματικών αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας και θα οδηγούσε στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά στην καθολική ισχύ τους στις ναυπηγικές κατασκευές. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσε να γίνει εμπειριστατωμένη σύγκριση με ήδη υπάρχουσες μελέτες ευρέως χρησιμοποιούμενων

ναυπηγικών υλικών, όπως ο ναυπηγικός χάλυβας, για τον οποίο υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφίας.

Λαμβάνοντας υπόψη πως σε κάθε πειραματική δοκιμή απαιτείται μεγάλος αριθμός δοκιμών με τη χρήση διαφόρων δοκιμίων, όσον αφορά σε ναυπηγικές κατασκευές που αφενός είναι σύνθετες, αφετέρου υφίστανται πολλαπλών τύπων φορτίσεις, θα ήταν θεμιτό στο μέλλον να υπάρξει αντίστοιχο πειραματικό πρόγραμμα, με περισσότερες επαναλήψεις, έτσι ώστε να επικυρωθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, και να εξετασθούν εκ νέου οι παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων (γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων, σχεδιαστικές παράμετροι, κ.α).

Όσον αφορά στα δοκίμια που εξετάστηκαν στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα, είναι σημαντικό να τονίσουμε πως, ενώ ο αριθμός των συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού CT ήταν επαρκής σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12135: 2002 [36], ο αριθμός των δοκιμίων τύπου “dogbone” δεν ήταν επαρκής έτσι ώστε να διεξαχθούν ασφαλή και απόλυτα εμπειριστατωμένα αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες του υβριδικού υλικού των κραμάτων 1561-5083. Είναι απαραίτητο στο μέλλον να διεξαχθούν νέες σειρές πειραματικών δοκιμών σε υβριδικά δοκίμια “dogbone”, έτσι ώστε να ληφθούν έγκυρα και ασφαλή αποτελέσματα, όσον αφορά στη συμπεριφορά τους σε εφελκυστικά φορτία. Επίσης, μετά τη διενέργεια των πειραματικών δοκιμών, θα μπορούσε να γίνει μικροσκοπική ανάλυση της επιφάνειας θραύσης, με γνωστές χρησιμοποιούμενες μεθόδους, όπως της ακτινογραφίας, έτσι ώστε να κατανοηθεί πλήρως ο τρόπος θραύσης των υβριδικών δοκιμίων, που παραμένει ένας ανεξερεύνητος τομέας στη ναυπηγική.

Μια ακόμα βασική πρόταση για το μέλλον, θα ήταν η χρήση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας για τη διενέργεια μιας υπολογιστικής ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η μακροσκοπική ανάλυση της θραύσης και η μελέτη της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών μπορεί να διενεργηθεί πρακτικά με πειραματικές διαδικασίες, όμως δεν παρέχει μια πλήρη λύση στο πρόβλημα της θραύσης ναυπηγικών κατασκευών, έχοντας περιορισμένη ακρίβεια. Έτσι, είναι επόμενο μια υπολογιστική ανάλυση να είναι απαραίτητη, ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική ακρίβεια πειραματικών αποτελεσμάτων, και να είναι δυνατή η εύκολη χρήση των αποτελεσμάτων

σε μελλοντικές έρευνες, χωρίς να είναι απαραίτητη η εκτέλεση νέων πειραματικών δοκιμών.

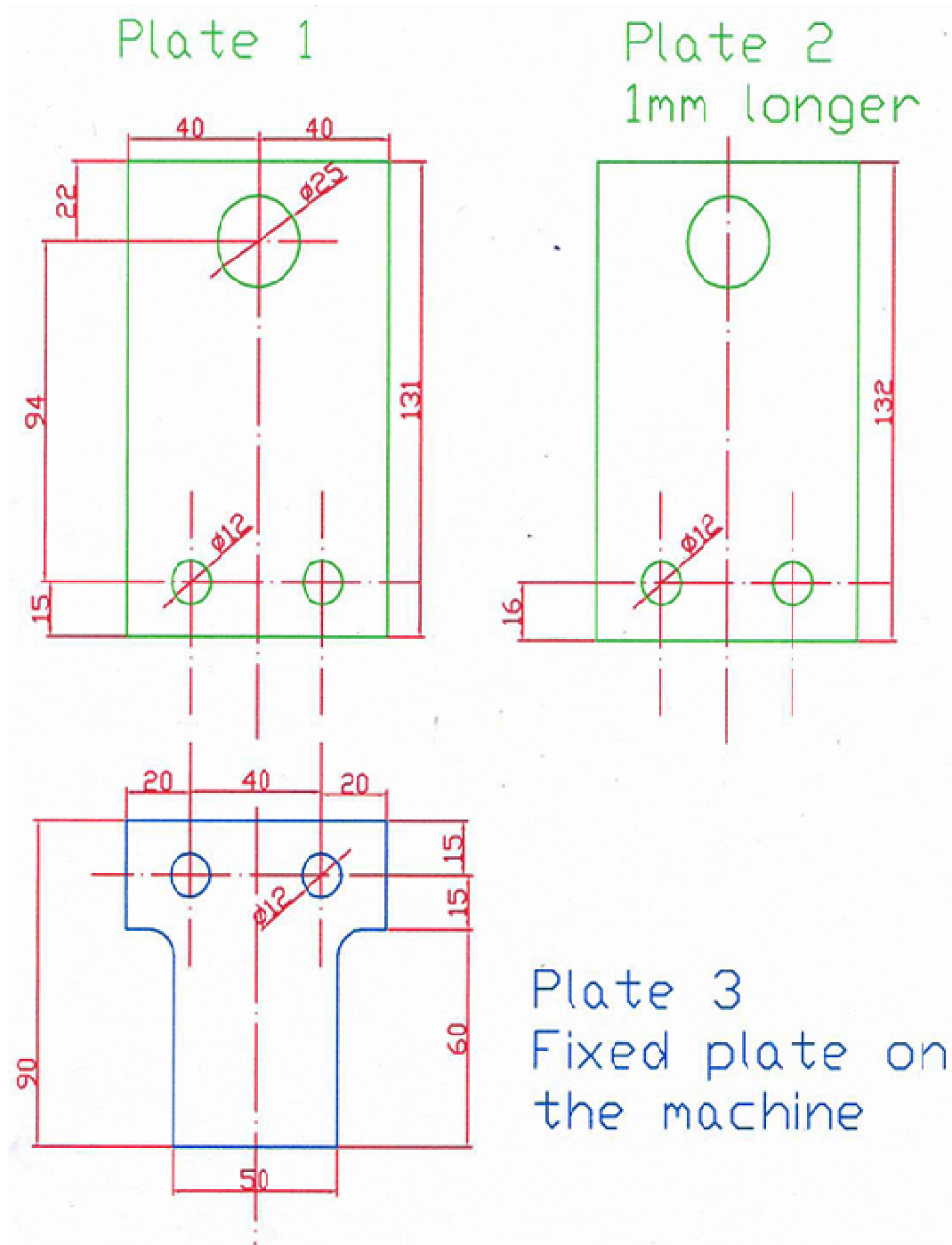
Τέλος, μια καλή πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι η μελέτη της θραύσης και η αξιολόγηση της αντοχής μιας ναυπηγικής κατασκευής για ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων φόρτισης και τύπων αστοχίας, και όχι μόνο για εφελκυστικά φορτία, καθώς εκτίθενται σε ένα σύνθετο και δυσμενές περιβάλλον φορτίσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής τους. Μπορούν να διενεργηθούν πειράματα που λαμβάνουν υπόψη κοπωτικές φορτίσεις – που είναι και οι πιο συνηθισμένες στο θαλάσσιο περιβάλλον- καθώς και απροσδόκητα ή τυχαία φορτία που προκύπτουν από τις συγκρούσεις, τις προσαράξεις, τις εκρήξεις, τις πυρκαγιές, την κατάκλυση με νερό, κ.ά.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α. ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Α.1. ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ CT (Compact Tension specimens)

Η μηχανή εφελκυσμού MTS του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας διαθέτει μια ποικιλία διαφορετικών εξαρτημάτων συγκράτησης των πειραματικών δοκιμίων. Ανάλογα με το είδος του πειράματος που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε (είδος φόρτισης) και με το μέγεθος και την μορφή των δοκιμίων που εξετάζονται κάθε φορά, χρησιμοποιούνται και τα αντίστοιχα εξαρτήματα, τα οποία προσαρμόζονται κατάλληλα στις αρπάγες της πειραματικής μηχανής. Τα προσαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, έχουν χρησιμοποιηθεί και σε προηγούμενα πειραματικά προγράμματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Τα ειδικά διαμορφωμένα προσαρτήματα που σχεδιάστηκαν για αυτή την συγκεκριμένη ομάδα πειραμάτων εφελκυσμού σε συμπαγή δοκίμια CT μικρής κλίμακας, παρουσιάζονται αναλυτικά στις Εικόνες Α-1 έως Α-3.



Εικόνα Α-1: Σχέδιο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων συγκράτησης των συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού CT μικρής κλίμακας



Εικόνα A-2: Απεικόνιση των εξαρτημάτων συγκράτησης, των πύρων συγκράτησης και των δακτυλίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκράτηση των δοκιμίων CT στη μηχανή εφελκυσμού



Εικόνα A-3: Απεικόνιση της τελικής μορφής της πειραματικής διάταξης των εξαρτημάτων συγκράτησης και των μικρής κλίμακας δοκιμίων εφελκυσμού CT λίγο πριν τοποθετηθούν στις αρπάγες της μηχανής

A.2. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την προετοιμασία των δοκιμίων για μεταλλογραφική παρατήρηση (λείανση και στίλβωση), καθώς και ο εξοπλισμός μικροσκοπικής παρατήρησης και μικροσκληρομέτρησης.

➤ Εξοπλισμός λείανσης-στίλβωσης

Για τη μεταλλογραφική παρατήρηση των δειγμάτων απαραίτητη ήταν η προετοιμασία της προς παρατήρηση επιφάνειας. Για τη λείανση- στίλβωση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε η συσκευή λείανσης LaboPol-5 της Struers, η οποία παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα A-4.



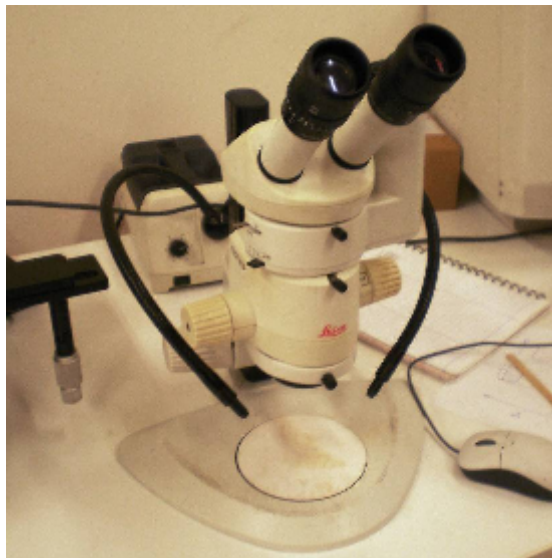
Εικόνα A-4: Η συσκευή λείανσης (Struers LaboPol-5) που χρησιμοποιήθηκε για την λείανση-στίλβωση των δοκιμίων (Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών-ΕΜΠ).

Η συσκευή έχει δυνατότητα ελέγχου της γωνιακής ταχύτητας μέσω ενός ηλεκτρονικού σερβοσυστήματος χάρη στο οποίο αυτή παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η γωνιακή ταχύτητα μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 50 και

500 στροφών ανά λεπτό. Για την ψύξη του δοκιμίου κατά τη λείανση χρησιμοποιείται η ενσωματωμένη στη συσκευή παροχή νερού (βρύσης). Αν και η συσκευή διαθέτει σύστημα συγκράτησης των δοκιμίων για την αυτόματη λείανση των δοκιμίων, δεν ήταν δυνατό αυτό να χρησιμοποιηθεί καθώς η διάμετρος των δειγμάτων ήταν αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη του υποδοχέα της συσκευής.

➤ Εξοπλισμός μικροσκοπικής παρατήρησης

Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση των επιφανειών των συγκολλήσεων, των ατελειών, των δειγμάτων είναι το LEICA MZ6, του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το στερεοσκόπιο διαθέτει βηματικές μεγεθύνσεις (0.63x, 0.80x, 1.00x, 1.25x, 1.6x, 2.0x, 2.5x, 3.2x, 4.0x) έτσι ώστε η εξέταση των δειγμάτων να μπορεί να επαναλαμβάνεται στην ίδια ακριβώς μεγέθυνση.



Εικόνα A-5: Στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση των δειγμάτων και την απόκτηση φωτογραφιών των δειγμάτων.

Το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το LEICA DM 1LM. Πρόκειται για ένα ανάστροφο οπτικό μικροσκόπιο, ειδικά σχεδιασμένο για μεταλλουργική παρατήρηση. Διαθέτει αντικειμενικούς φακούς 10x, 20x, 50x και 100x

και προσοφθάλμιο φακό 10x. Έχει ενσωματωμένες θέσεις, για τοποθέτηση οπτικών φίλτρων, τράπεζα τριών βαθμών ελευθερίας (x, y, α-περιστροφή) με δυνατότητα στήριξης φορτίου έως 8 kg και φωτισμό με λάμπα αλογόνου ισχύος 35 W.



Εικόνα Α-6: Οπτικό μικροσκόπιο με δυνατότητα μεγέθυνσης έως x1000. Χρησιμοποιήθηκε για την μεταλλογραφιών παρατήρηση των δειγμάτων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παπάζογλου, Β.Ι., «**Ναυπηγική Τεχνολογία**», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995.
- [2] Καρύδης, Π.Α., «**Επιθεώρηση, Συντήρηση και Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου**», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [3] K. J. Rawson & E. C. Tupper, «**Βασική Θεωρία Πλοίου, 1^{ος} Τόμος**», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
- [4] K. J. Rawson & E. C. Tupper, «**Βασική Θεωρία Πλοίου, 2^{ος} Τόμος**», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
- [5] Δ. Ι. Παντελής, Γ. Δ. Χρυσουλάκης, «**Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών**», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996.
- [6] Γ. Ζαραφονίτης, «**Εισαγωγή στη Ναυπηγική και τη Θαλάσσια Τεχνολογία**», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [7] Μ. Σαμουηλίδης, «**Αντοχή Πλοίου Ι**», Σημειώσεις, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995.
- [8] Αθανασάτος Ιωάννης, «**Μελέτη της διάδοσης ρωγμών σε ενισχυμένα και υβριδικά ελάσματα κραμάτων αλουμινίου μέσω δοκιμών σε συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού μικρής κλίμακας (CT)**», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2009.
- [9] Hellenic Navy classified documentation with respect to the marine aluminum alloy for naval vessels.
- [10] Μιχαλόπουλος Στέφανος, «**Πειραματική Ανάλυση της Συμπεριφοράς σε Θράυση Αλουμινένιων Ναυπηγικών Κατασκευών με τη Χρήση Δοκιμίων Μικρής Κλίμακας**», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2008.

- [11] Konstantinos P.Galanis, “Fracture of Aluminum Naval Structures”, PhD thesis, M.I.T, 2007.
- [12] N.R Mandal, “Aluminum Welding”, W.P., 2002.
- [13] A.C Davies, “The Science & Practice of Welding”, Vol.1, Welding Science & Technology, Cambridge University Press, 1984.
- [14] Lassen, Recho, “Fatigue Life Analysis of Welded Structures”, iSTE.
- [15] “Stress Analysis & Growth of Cracks, Part I”, American Society for Testing and Materials, 1972.
- [16] G.C Sih, S.R Valluri, “Fracture Mechanics in Engineering Application”, Editors Sijthoff&Noordhof, 1979.
- [17] “A General Introduction to Fracture Mechanics”, Mechanical Engineering Publ.Ltd, London.
- [18] Lewis/Sines, “Fracture Mechanics, Vol.I, Theory & Analysis”, STP 791.
- [19] Naiquan Ye, Fatigue assesment of aluminum welded box-stiffener joints in ships, Norway, 2007.
- [20] Joachim L. Grenestedt, Steel/Composite hybrid ships.
- [21] V.L Tellkamp, E.J Lavernia, Processing and mechanical properties of nanocrystalline 5083 alloy , 1999.
- [22] Naka, Torikai, Hino, Yoshida, The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum-magnesium alloy sheet, *Materials Processing Technology*, 2001.

- [23] S.J Hosseinipour, An investigation into hot deformation of aluminum alloy 5083, *Materials and Design Journal*, 2009.
- [24] Llorca, Perez, Analysis of structure and mechanical properties of AA 5083 aluminum alloy processed by ECAE, Rev. Adv, *Material Science*, 2005.
- [25] Glisic, Inaudi, Structural monitoring of hybrid specimens at early age using fibre optic sensors, Glisic, Inaudi, SMARTEC S.A.
- [26] Karr, Waas, Strength and fatigue testing of composite patches for ship plating fracture repair.
- [27] J. Singer, Buckling Experiments: Experimental methods in buckling of thin-walled structures, J.Wiley&Sons, 2002.
- [28] Paik, Thayambali, Ultimate state design of steel plate structures, J.Wiley&Sons, 2003.
- [29] A.H Priest, An energy balance in crack propagation and arrest, *Engineering Fracture Mechanics*, 1998.
- [30] Dexter, R. J., Pilarski, P. J. and Mahmoud, H. N., Analysis of crack propagation in welded stiffened panels, *International Journal of Fatigue* 25 (9 – 11): 1169 - 1174, 2003.
- [31] Dexter, R. J. and Pilarski, P. J., Crack propagation in welded stiffened panels, *Journal of Constructional Steel Research* 58 (5 - 8): 1081 - 1102, 2002.
- [32] Dexter, R. J. and Pilarski, P. J., Effect of welded stiffeners on crack growth rate, Ship Structure Committee, Report No SSC - 413, 2000.
- [33] Priest, A. H., The influence of structural dimensions on crack arrest, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (17): 2421 - 2437, 2003.

- [34] Shim, Lee, Wierzbicki, Calibration of armor steel for fracture analysis, M.I.T, 2005.
- [35] Irwin, G. R., *Fracture Mechanics*, Report of Naval Research Laboratory Progress, Washington, D.C., 36 p., 1973.
- [36] International Standard ISO 12135: 2002 (E), Metallic materials – unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, 2002.
- [37] O’ Dowd, N. P. and Shih, C. F., Family of crack – tip fields characterized by a triaxiality parameter – I. Structure of fields, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 39 (8): 989 - 1015, 1991.
- [38] International Maritime Organization (IMO) website <http://www.imo.org/>.
- [39] Austral Wright Metals website <http://www.australwright.com.au/>.
- [40] Azom Materials website <http://www.azom.com/>.
- [41] Standard Specification for High Magnesium Aluminum Alloy Sheet and Plate for Marine Service, ASTM B928 – 03, ASTM International, 2003.
- [42] Pussegoda, L. N., Malik, L. and Morrison, J., Measurement of crack arrest fracture toughness of a ship steel plate, *Journal of Testing and Evaluation* 26 (3): 187 - 197, 1998.
- [43] Pussegoda, L. N., Malik, L., Bouchard, R. and Tyson, W. R., Strain rate effects on fracture toughness of ship plate steels, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering – Transactions of ASME* 118 (2): 127 - 134, 1996.
- [44] Thyssen Filler Metals Data Sheet, Bohler Thyssen Welding.
- [45] Manufacturer’s welding procedure specification (WPS), Elefsis Shipbuilding and Industrial Enterprises S.A.

- [46] International Standard ISO 209 – 1: 1989, Wrought aluminum and aluminium alloys – Chemical composition and forms of products – Part 1: Chemical composition, 1989.
- [47] Poe CC, Jr. Fatigue crack propagation in stiffened panels. Damage tolerance in aircraft structures, ASTM STP 486, *American Society for Testing and Materials*, 1971.
- [48] Bruce, G. J., Yuliadi, M. Z. and Shahab, A., Towards a practical means of prediction weld distortion, *Journal of Ship Production* 17 (2): 62 - 68, 2001.
- [49] Substances & Technologies (SubsTech) website: <http://www.substech.com/>.
- [50] Standard Method of Test for Plane – Strain Fracture Toughness of Metallic Materials/ASTM Designation E 399-74, Part 10.
- [51] ASM Handbook Vol 09: Metallography And Microstructures, ASM International, 9th edition, 1992.
- [52] “Fracture Mechanics”, Michael Janssen, Jan Zuidema, R. J. H. Wanhill, SPON, 2nd Edition, 2004
- [53] Online Metals’ Database: <http://www.keytometals.com/>.
- [54] Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products/ASTM Designation E370 - 09a.
- [55] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials/ASTM Designation E8/E8M – 08.
- [56] Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum – and Magnesium-Alloy Products/ASTM Designation B557 – 06.