



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΕΝΙΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ»**

ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β. Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ



ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2008

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	4
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^Ο	10
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^Ο	14
2.1 Η ΓΕΝΙΚΗ ΤΑΣΗ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	14
2.2 ΤΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ	16
2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	18
2.3.1 Η ελικοειδής καμπύλη μελέτης ναυπηγικών κατασκευών.....	20
2.3.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός της μεταλλικής κατασκευής.....	24
2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΟΙΩΝ ΑΠΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	26
2.5 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ	28
2.5.1 Ιστορική αναδρομή για τη χρήση του αλουμινίου στη ναυπηγική.....	28
2.6 ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΓΙΑ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΧΡΗΣΗ.....	30
2.6.1 Τα κράματα του αλουμινίου.....	32
2.6.2 Ονοματολογία και σύστημα προσδιορισμού των κραμάτων αλουμινίου (Designation System).....	33
2.6.3 Κατεργασμένα ή μη κράματα αλουμινίου.....	36
2.6.4 Επίδραση των στοιχείων πρόσμιξης στις ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου – Κατάταξη τους σε σειρές	38
2.7 Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	42
2.7.1 Μελέτη αλουμινένιων σκαφών	46
2.8 ΤΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	46
2.9 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	47
2.9.1 Οι ιδιαίτερες συμπεριφορές των κραμάτων αλουμινίου κατά την ανέγερση αλουμινένιων κατασκευών.....	53
2.9.2 Ζητήματα που απασχολούν την σύγχρονη ναυπηγική βιομηχανία.....	55
2.10 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	58
2.11 ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ Ο ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	59
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^Ο	62
3.1 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ-.....	62
3.2 ΕΙΔΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΣΤΙΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	62
3.3 ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ	64
3.3.1 Οι κύριες στατικές φορτίσεις.....	64
3.3.2 Εγκάρσιες φορτίσεις.....	66
3.3.3 Προσάραξη και σύγκρουση.....	67
3.3.4 Δυναμικές φορτίσεις.....	67
3.3.5 Αδρανειακές φορτίσεις.....	68
3.3.6 Σφυρόκρουση και υδροδυναμική κρούση.....	69
3.3.7 Υδροελαστική ανάλυση.....	70
3.4 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	71
3.5 ΤΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ (THE SHIP GIRDER)	73
3.5.1 Η Κατασκευαστική Διαμόρφωση των Ναυπηγικών Κατασκευών	75
3.6 Η ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ	78
3.6.1 Η επιβιωσιμότητα (survivability) των ναυπηγικών κατασκευών	81
3.6.2 Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των ναυπηγικών υλικών.....	84
3.7 ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	86
3.8 Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	87
3.9 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΤΙΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ	90

3.10	ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	- 91 -
3.11	ΔΙΑΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΝΔΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΕΣ ΘΡΑΥΣΕΙΣ	- 91 -
3.11.1	Θραύσεις κατ' αποχωρισμό και κατ' ολίσθηση.....	- 92 -
3.11.2	Ψαθυρά και όλκιμα υλικά	- 93 -
3.11.3	Ψαθυρή και όλκιμη αστοχία.....	- 94 -
3.11.4	Ιστορικό της ψαθυρής θραύσης των συγκολλητών κατασκευών.....	- 96 -
3.11.5	Το φαινόμενο της κόπωσης στις ναυπηγικές κατασκευές	- 98 -
3.11.6	Χαρακτηριστικά της θραύσης από κόπωση	- 99 -
3.12	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΤΕΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΚΟΠΩΣΗ.....	- 100 -
3.12.1	Οι κοπωτικές φορτίσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.....	- 100 -
3.12.2	Υλικά και κατασκευαστικοί παράγοντες.....	- 101 -
3.12.3	Σχεδιαστικοί παράγοντες και κόπωση	- 102 -
3.12.4	Μηχανισμοί κόπωσης τη μεταλλικής κατασκευής του πλοίου	- 105 -
3.12.5	Μορφές αστοχίας των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής λόγω κόπωσης.....	- 105 -
3.13	Ο ΚΟΠΩΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	- 107 -
3.14	ΟΙ ΡΩΓΜΕΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	- 108 -
3.14.1	Παράγοντες που επιδρούν στην αστοχία των μεταλλικών κατασκευών.....	- 109 -
3.14.2	Όλκιμες ρωγμές.....	- 111 -
3.14.3	Ψαθυρές ρωγμές.....	- 112 -
3.14.4	Διάδοση ρωγμών και ψαθυρή θραύση	- 112 -
3.14.5	Ο προσανατολισμός, ο τρόπος διάδοσης και η κατεύθυνση της πορείας των ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα	- 114 -
3.14.6	Οι μέθοδοι επισκευής των ρωγμών.....	- 116 -
3.15	Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	- 119 -
3.16	ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	- 120 -
3.17	Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	- 121 -
3.17.1	Μοντέλα συμπεριφοράς των ναυπηγικών υλικών.....	- 124 -
3.18	Η ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ	- 126 -
3.18.1	Εξισώσεις για τον συντελεστή έντασης τάσης.....	- 130 -
3.18.2	Ρυθμός μεταβολής της ελαστικής ενέργειας	- 133 -
3.18.3	Ανάλυση του ανοίγματος της ρωγμής.....	- 134 -
3.18.4	Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης.....	- 135 -
3.18.5	Πειραματικός προσδιορισμός του K_{IC}	- 137 -
3.18.6	Δυσθραυστότητα κατ' εγκοπή	- 138 -
3.19	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ.....	- 139 -
3.19.1	Ορισμός γενικών επιπέδων συμπεριφοράς των υλικών.....	- 140 -
3.20	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	- 142 -
3.20.1	Μέθοδοι ασφαλούς αστοχίας.....	- 143 -
3.21	Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ.....	- 144 -
3.21.1	Ολική και τοπική αντοχή της μεταλλικής κατασκευής.....	- 144 -
3.21.2	Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου.....	- 145 -
3.21.3	Οριακές καταστάσεις ναυπηγικών κατασκευών	- 146 -
3.21.4	Οι εντατικές καταστάσεις σε ναυπηγικές κατασκευές.....	- 147 -
3.21.5	Οριακές συνθήκες ελασμάτων ναυπηγικών κατασκευών	- 149 -
3.21.6	Η μεταβλητότητα των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής.....	- 150 -
3.21.7	Η επίδραση των αρχικών ατελειών στην αντοχή.....	- 151 -
3.21.8	Ο σχεδιασμός των ναυπηγικών κατασκευών με βάση τις αρχές της Μηχανικής... - 154 -	
3.21.9	Τα ελάσματα του εξωτερικού περιβλήματος.....	- 156 -
3.21.10	Η ενίσχυση του εξωτερικού περιβλήματος	- 157 -
3.21.11	Ενισχυμένα ελάσματα υπό καμπτικές φορτίσεις.....	- 158 -
3.21.12	Η μελέτη των ενισχυμένων ελασμάτων σε λεπτότοιχες μεταλλικές κατασκευές... - 160 -	
3.21.13	Οι φορτίσεις σε ενισχυμένα ελάσματα πλοίων	- 161 -
3.22	ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	- 163 -
3.22.1	Τα συστήματα ενίσχυσης της γάστρας των πλοίων.....	- 164 -
3.22.2	Διατομές πρωτενουσών (χυτών) ενισχύσεων	- 166 -
3.22.3	Ρεαλιστική εκτίμηση των κατασκευαστικών στοιχείων.....	- 167 -
3.23	Η ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ – ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ.....	- 169 -
3.23.1	Λυγισμός των ενισχυτικών.....	- 170 -
3.23.2	Οι διαφοροποιήσεις στην συμπεριφορά των αλουμινένιων ενισχυμένων ελασμάτων.....	- 172 -

4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	- 174 -
4.1	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	- 174 -
4.2	Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	- 176 -
4.2.1	Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΟΜΑΔΕΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	- 178 -
4.2.2	Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ Ο ΤΥΠΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΑΚΡΩΝ ΤΟΥΣ	- 180 -
4.2.3	Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ	- 182 -
4.2.4	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	- 185 -
4.2.5	ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ	- 186 -
4.2.6	Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	- 187 -
4.2.7	Η ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (<i>Experimental set-up</i>)	- 188 -
4.3	1 ^η ΟΜΑΔΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ: Ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΥΠΟΥ “DOG BONE”	- 191 -
4.3.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	- 191 -
4.3.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	- 192 -
4.3.3	Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	- 193 -
4.3.4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	- 196 -
4.3.5	ΚΥΡΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΗΚΑΝ	- 204 -
4.4	2 ^η ΟΜΑΔΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ : ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΔΟΚΙΜΙΑ	- 208 -
4.4.1	Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ CT (<i>Compact tension specimens</i>)	- 208 -
4.4.2	ΜΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ CT ΔΟΚΙΜΙΑ	- 209 -
4.4.3	ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ CT ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΕΞΕΛΑΣΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΑ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ	- 216 -
4.4.4	Ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T (<i>extruded specimens</i>)	- 216 -
4.4.5	Ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας (<i>Welded Specimens</i>)	- 227 -
4.4.6	ΚΥΡΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΗΚΑΝ	- 240 -
4.4.7	Η ΕΝΑΡΞΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ (<i>Crack Initiation</i>)	- 240 -
4.4.8	Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ (<i>Crack Propagation</i>)	- 242 -
4.5	ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 246 -
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	- 248 -
5.1	ΣΥΝΟΨΗ	- 248 -
5.2	ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	- 250 -
5.3	ΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΑΝ	- 252 -
5.4	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	- 256 -
5.4.1	Η ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	- 257 -
5.4.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ΠΟΙΚΙΛΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΥΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	- 257 -
5.4.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ	- 258 -
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	-261-
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	-267-
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	-271-

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Η προσάραξη του πετρελαιοφόρου σε βράχο προκάλεσε τη ρύπανση του θαλάσσιου χώρου και των ακτών	- 17 -
Εικόνα 2-2: Καταπόνηση εμπορικού πλοίου σε δυσμενείς συνθήκες διαρκούς θαλασσοταραχής.....	- 19 -
Εικόνα 2-3: Ελικοειδής Καμπύλη Μελέτης Ναυπηγικών Κατασκευών του J. H. Evans.....	- 21 -
Εικόνα 2-4: Ανέγερση νέων προηγμένων τύπων πλοίων υψηλών επιδόσεων με σημαντικά διαφορετική μορφή γάστρας εξ ολοκλήρου από κράματα αλουμινίου	- 27 -
Εικόνα 2-5: Η ιστορική εξέλιξη της εφαρμογής του αλουμινίου στη ναυπηγική .	- 28 -
Εικόνα 2-6: Εφαρμογή των κραμάτων αλουμινίου στην κατασκευή των σφαιρικών δεξαμενών πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου αερίου (LNG).....	- 29 -
Εικόνα 2-7: Εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου κατασκευασμένη από κράματα αλουμινίου	- 30 -
Εικόνα 2-8: Εφαρμογές των κραμάτων αλουμινίου στην ναυπηγική.....	- 32 -
Εικόνα 2-9: Ταχύπλοα σκάφη υψηλών επιδόσεων με μονή γάστρα κατασκευάζονται κυρίως από τα κράματα αλουμινίου 5052 – H32, 5052 – H34, 5083, 5086, 5454, 5456, 5383-H113/H321 και 6061 – T6, 6061 – T4.....	- 43 -
Εικόνα 2-10: Το τριμαράν "Benchiijigua Express", είναι μέχρι σήμερα το μεγαλύτερο εμπορικό πλοίο στον κόσμο κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο, με μήκος 126.7 m και ταχύτητα 40.5 knots. Κατασκευάστηκε και παραδόθηκε το 2005 από την εταιρία Austal	- 44 -
Εικόνα 2-11: Ναυτικά ατυχήματα στο παρελθόν : Προσάραξη (αριστερά) δεξαμενόπλοιου 147.000 dwt το 1996 και (δεξιά) το καταστροφικό αποτέλεσμα της σύγκρουσης επίσης ενός δεξαμενόπλοιου 100.000 dwt από ένα πλοίο μεταφοράς τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων	- 57 -
Εικόνα 2-12 : Βύθιση πλοίων λόγω κατάρρευσης της μεταλλικής κατασκευής τους....	- 58 -
Εικόνα 2-13: Ανάπτυξη ρωγμών, λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων στην αλουμινένια μεταλλική κατασκευή πλοίου	- 60 -
Εικόνα 3-1: Στατικές φορτίσεις σε εγκάρσια τομή πλοίου.....	- 65 -
Εικόνα 3-2: Τοπική φόρτιση στον πυθμένα του πλοίου με κάμψη του διπυθμένου συνολικά και των ελασμάτων μεταξύ των σημείων στήριξης.....	- 66 -
Εικόνα 3-3: Διαβροχή του καταστρώματος και κρούση κυμάτων στην πρωραία κατασκευή λόγω θαλασσοταραχής (αριστερά) και φόρτιση πρωραίας κατασκευής λόγω κρούσης κύματος (δεξιά).....	- 69 -
Εικόνα 3-4: Τυπική μορφή ενός ενισχυμένου ελάσματος για ναυπηγικές κατασκευές με διαμήκη, εγκάρσια ενισχυτικά και ορθογώνια ενισχυμένα πλαίσια.....	- 71 -
Εικόνα 3-5: Τυπική κατασκευαστική διαμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος πλοίου.....	- 76 -
Εικόνα 3-6: Τυπική μορφή μέσης τομής μεταλλικής κατασκευής πλοίου	- 79 -
Εικόνα 3-7: Παρουσίαση της σταδιακής αύξησης της ικανότητας των υλικών να αναπτύσσουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις στις επιβαλλόμενες τάσεις καθώς αυξάνεται η ολκιμότητά τους.....	- 93 -
Εικόνα 3-8: Τελική κατάρρευση, κοπή σε δύο τμήματα και βύθιση του πλοίου ..	- 95 -
Εικόνα 3-9: Ψαθυρές θραύσεις σε δεξαμενόπλοια τύπου T2 (αριστερά) και φορτηγά πλοία τύπου Liberty (δεξιά).....	- 98 -

Εικόνα 3-10: Ρωγμές σε νομέα σε συνδέσεις με διαμήκη ενισχυτικά.....	- 108 -
Εικόνα 3-11: Όλκιμη (ductile) και ψαθυρή (brittle) θραύση σε δοκίμια.....	- 111 -
Εικόνα 3-12: Η διαδικασία επέκτασης των ρωγμών με τη συνένωση μικροκενών.....	- 112 -
Εικόνα 3-13: Το ατύχημα του πλοίου MV Kurdistan που υπέστη ψαθυρή θραύση το 1979.....	- 113 -
Εικόνα 3-14: Τρία είδη προσανατολισμού των ρωγμών ως προς τα ενισχυτικά. Ρωγμές κάθετες, οριζόντιες και υπό γωνία.....	- 115 -
Εικόνα 3-15: 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).....	- 116 -
Εικόνα 3-16: Τα μοντέλα συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών.....	- 125 -
Εικόνα 3-17: Τυπικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης γραμμικού ελαστικού υλικού (αριστερά) και γραμμικού ελαστικού-πλαστικού υλικού (δεξιά).....	- 126 -
Εικόνα 3-18: Οι τρεις βασικοί τύποι ρωγμής.....	- 127 -
Εικόνα 3-19: Σύστημα συντεταγμένων και συνιστώσες των τάσεων στην περιοχή του άκρου της ρωγμής.....	- 129 -
Εικόνα 3-20: Πλάκα πεπερασμένου πλάτους με κεντρική διαμερή ρωγμή.....	- 130 -
Εικόνα 3-21: Πλάκα πεπερασμένου πλάτους με διπλή ακραία διαμερή ρωγμή.....	- 131 -
Εικόνα 3-22: Πλάκα πεπερασμένου πλάτους με απλή ακραία διαμερή ρωγμή.....	- 132 -
Εικόνα 3-23: Συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού (CTS).....	- 133 -
Εικόνα 3-24: Ανάλυση του ανοίγματος ρωγμής.....	- 134 -
Εικόνα 3-25: Σχηματική παράσταση της σχέσης μεταξύ τάσης, μεγέθους σφάλματος και δυσθραυστότητας του υλικού.....	- 136 -
Εικόνα 3-26: Συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού για τον πειραματικό προσδιορισμό του K_{IC}	- 137 -
Εικόνα 3-27: Τυπική γεωμετρική διάταξη συνεπίπεδων στοιχείων σύλληψης των ρωγμών (crack arrestors).....	- 143 -
Εικόνα 3-28: Ιεράρχηση των τάσεων σε ναυπηγικές κατασκευές.....	- 148 -
Εικόνα 3-29: Αρχικό βέλος κάμψης ελάσματος οφειλόμενο στη συγκόλληση με το ενισχυτικό.....	- 151 -
Εικόνα 3-30: Μορφές διαμήκους κάμψης ενισχυμένου ελάσματος λόγω διαμήκους συστολής του υλικού συγκόλλησης.....	- 152 -
Εικόνα 3-31: Μικτό σύστημα ενίσχυσης. Διάμηκες σύστημα ενίσχυσης στο κύριο κατάστρωμα και στον πυθμένα και εγκάρσιο στα πλευρά και στις διαμήκεις φρακτές..	- 165 -
Εικόνα 3-32: Οι διάφορες διατομές ενισχύσεων που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές κατασκευές.....	- 167 -
Εικόνα 3-33: Ελαστο-πλαστική κατάρρευση ελάσματος με ορθογώνιο σύστημα ενισχύσεων λόγω μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης (αριστερά) και στρεπτική αλληλεπίδραση ελάσματος και ενισχυτικού (δεξιά).....	- 170 -
Εικόνα 3-34: Μορφές αστοχίας σε ενισχυμένα ελάσματα.....	- 171 -
Εικόνα 4-1: Μακρο-ρωγμή μήκους 24 m στο κύριο κατάστρωμα του δεξαμενοπλοίου Castor [24] [πηγή IMO].....	- 175 -
Εικόνα 4-2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεχνητών ρωγμών των δοκιμίων με αρχικό μήκος είτε 55 mm είτε 71 mm και διαφορετική διαμόρφωση των άκρων τους...	- 181 -
Εικόνα 4-3: Φωτογραφίες από στερεοσκόπιο που παρουσιάζουν τα δύο είδη των αρχικά διαμορφωμένων άκρων των τεχνητών ρωγμών των δοκιμίων: ημικυκλικό άκρο τύπου U (αριστερά) και τριγωνικό άκρο τύπου V (δεξιά).....	- 182 -

Εικόνα 4-4: Ναυπηγικά ελάσματα και ενισχυμένα πλαίσια αλουμινίου με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές και από τα οποία κόπηκαν τα εξεταζόμενα δοκίμια εφελκυσμού	- 183 -
Εικόνα 4-5: Η επίδραση του βασικού στοιχείου πρόσμιξης και της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στην ευαισθησία των κραμάτων αλουμινίου όσον αφορά την ανάπτυξη των ρωγμών [15]	- 185 -
Εικόνα 4-6: Οι κυριότεροι τύποι ενισχυτικών που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές.....	- 186 -
Εικόνα 4-7: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις των ενισχυτικών τύπου-T (αριστερά) και απλής λάμας (δεξιά) που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των εξεταζόμενων εξελασμένων και συγκολλητών δοκιμίων CT, αντίστοιχα (διαστάσεις σε mm)	- 186 -
Εικόνα 4-8: Η πειραματική διάταξη κατά τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561 με τη χρήση δοκιμίων τύπου “dogbone”. Διακρίνονται επίσης το επιμηκυνσίόμετρο και οι χρησιμοποιούμενες αρπάγες της μηχανής για τη συγκράτηση των δοκιμίων.....	- 189 -
Εικόνα 4-9: Η πειραματική διάταξη για τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού στα ενισχυμένα και μη συμπαγή δοκίμια CT, όπου διακρίνονται το εξεταζόμενο δοκίμιο, οι αρπάγες και τα μπουλόνια συγκράτησής του, οι πείροι ασφαλείας, καθώς και η χρησιμοποιούμενη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής... ..	- 191 -
Εικόνα 4-10: Χαρακτηριστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό. Συμπεριφορά ψαθυρού (αριστερά) και όλκιμου (δεξιά) υλικού.....	- 193 -
Εικόνα 4-11: Διάγραμμα σ-ε κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (αριστερά) και σχηματική παράσταση θραύσης δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (δεξιά)	- 194 -
Εικόνα 4-12: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις των ορθογώνιων δοκιμίων τύπου “dogbone” τα οποία εξετάστηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561 (διαστάσεις σε mm).....	- 196 -
Εικόνα 4-13: Οι απαιτούμενες διαστάσεις (αρχικό εμβαδό και μήκος μέτρησης) των δοκιμίων τύπου “dogbone” για τον υπολογισμό των πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων (αριστερά) και σχηματική αναπαράσταση της μορφής της επιβαλλόμενης εφελκυστικής φόρτισης (δεξιά)	- 198 -
Εικόνα 4-14: Οι καμπύλες συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AX τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του μήκους (L-direction)	- 201 -
Εικόνα 4-15: Οι καμπύλες συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AY τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του πλάτους (T-direction)	- 201 -
Εικόνα 4-16: Οι καμπύλες πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AX τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του μήκους (L-direction)	- 202 -
Εικόνα 4-17: Οι καμπύλες πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AY τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του πλάτους (T-direction)	- 202 -
Εικόνα 4-18: Η τελική μορφή των έξι δοκιμίων τύπου “dogbone” μετά τη θραύση.....	- 204 -
Εικόνα 4-19: Ο τρόπος θραύσης που παρατηρήθηκε στην πρώτη ομάδα πειραμάτων στα δοκίμια εφελκυσμού “dogbone”	- 205 -

Εικόνα 4-20: Σύγκριση των καμπυλών συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων οι οποίες προέκυψαν και από τα έξι δοκίμια AX και AY τύπου “dogbone” της πρώτης πειραματικής ομάδας	206 -
Εικόνα 4-21: Σύγκριση των καμπυλών πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων οι οποίες προέκυψαν και από τα έξι δοκίμια AX και AY τύπου “dogbone” της πρώτης πειραματικής ομάδας	207 -
Εικόνα 4-22: Η μορφή και οι διαστάσεις των μη ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT: Δοκίμια CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4) με τριγωνικό άκρο ρωγμής (αριστερά) και CTiUHC (i = 1, 2, 3, 4) με ημικυκλικό άκρο ρωγμής (δεξιά) (διαστάσεις σε mm).....	209 -
Εικόνα 4-23: Μη ενισχυμένα CT δοκίμια με την ονομασία CTiUHC (i = 1, 2, 3, 4), αρχικό μήκος ρωγμών 71 mm και ημικυκλικό (αμβλύ τύπου U) άκρο ρωγμής, τα οποία εξετάστηκαν με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης που κυμαινόταν από 0.5 έως 2.0 mm/min αυξανόμενος κατά 0.5 mm/min. Η διάδοση της ρωγμής έγινε κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης.....	211 -
Εικόνα 4-24: Μη ενισχυμένα CT δοκίμια με την ονομασία CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4), αρχικό μήκος ρωγμών 71 mm και τριγωνικό (οξύ τύπου V) άκρο ρωγμής, τα οποία εξετάστηκαν με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης που κυμαινόταν από 0.5 έως 2.0 mm/min αυξανόμενος κατά 0.5 mm/min. Η διάδοση της ρωγμής έγινε κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης.....	212 -
Εικόνα 4-25: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUHC (i = 1, 2, 3, 4) με ημικυκλικό άκρο ρωγμής	213 -
Εικόνα 4-26: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4) με τριγωνικό άκρο ρωγμής.....	213 -
Εικόνα 4-27: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης της ομάδας των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUHC και CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4) για διάφορους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης (0.5 έως 2.0 mm/ min). Παρατηρείται η κατηγοριοποίηση των καμπυλών σε δύο ομάδες (περιοχές τιμών), ανάλογα με τη γεωμετρία του άκρου των ρωγμών.....	215 -
Εικόνα 4-28: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διαδικασίας στην οποία αναπαρίστανται τα μη ενισχυμένα δοκίμια CT με τα δύο διαφορετικά είδη γεωμετρίας του άκρου των ρωγμών (τριγωνικό ή ημικυκλικό άκρο) να υποβάλλονται σε ποικίλους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης.....	216 -
Εικόνα 4-29: Η μορφή και οι διαστάσεις των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T και ημικυκλικό άκρο ρωγμών: δοκίμια CTiE (i = 1, 2, 3) (αριστερά) και CTEB (Rear Plate = 0) (δεξιά) (διαστάσεις σε mm).....	217 -
Εικόνα 4-30: Τελική μορφή των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTiE (i = 1, 2, 3) και CTEB με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T μετά τη θραύση. Παρατηρούμε ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η ρωγμή απέτυχε να διαδοθεί μέσω του ενισχυτικού.....	219 -
Εικόνα 4-31: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των ενισχυμένων δοκιμίων CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-Ta.....	220 -
Εικόνα 4-32: Παρουσίαση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο CT1E με ημικυκλικό άκρο ρωγμής και διαστάσεις της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό τύπου-T, 65 × 120 × 4 mm. Παρατηρείται: η έναρξη της ρωγμής υπό γωνία 60°, η στροφή και αλλαγή κατεύθυνσης και τέλος η διάδοσή της παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και το ενισχυτικό.....	221 -
Εικόνα 4-33: Παρουσιάζονται τα διακριτά βήματα της πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT2E με εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και τα φαινόμενα	

που παρατηρήθηκαν: έναρξη της ρωγμής, διάδοσή της υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, παύση, στροφή, επανέναρξη, αλλαγή κατεύθυνσης και διάδοση παράλληλα (0°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και το ενισχυτικό.....

- 223 -

Εικόνα 4-34: Παρουσιάζονται τα διακριτά βήματα της πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT3E με εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν: έναρξη της ρωγμής, διάδοσή της υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, παύση, στροφή, επανέναρξη, αλλαγή κατεύθυνσης κατά 30° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και τέλος διάδοση παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης

- 224 -

Εικόνα 4-35: Παρουσιάζεται η ακολουθούμενη πορεία διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CTEB με εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και μηδενική επιφάνεια του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής: έναρξη της ρωγμής, διάδοσή της αρχικά υπό γωνία 90° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, καθώς διαδιδόταν έστριψε υπό γωνία 60° , στα $\frac{3}{4}$ της απόστασης παύση, στροφή και αλλαγή κατεύθυνσης, επανέναρξη διάδοσης κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης (90°) προς το ενισχυτικό, αποτυγχάνει να το διαπεράσει, αλλάζει ξανά κατεύθυνση και διαδίδεται παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και το ενισχυτικό

- 226 -

Εικόνα 4-36: Η μορφή και οι διαστάσεις των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας και ημικυκλικό άκρο ρωγμών: δοκίμια CTiW ($i = 1, 2, 3$) (αριστερά) και CTiWB ($i = 1, 2$) (rear plate = 0) (δεξιά) (διαστάσεις σε mm).....

- 228 -

Εικόνα 4-37: Τελική μορφή των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTiW ($i = 1, 2, 3$) και CTiWB ($i = 1, 2$) με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας μετά τη θραύση. Παρατηρούμε ότι η ρωγμή σε δύο περιπτώσεις, συγκεκριμένα στα δοκίμια CT2W και CT2WB, κατάφερε να διαδοθεί μέσω της συγκόλλησης και του ενισχυτικού. Στο δοκίμιο CT2W η ρωγμή διαπέρασε με την πρώτη τη συγκόλληση καθώς πλησίαζε στο ενισχυτικό. Αντίθετα, στο δοκίμιο CT2WB η ρωγμή τελικά εισχώρησε στη συγκόλληση υπό γωνία αφού όμως αρχικά είχε αποτύχει στην προσπάθειά της να περάσει μέσω της συγκόλλησης, συνεχίζοντας να διαδίδεται παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης

- 229 -

Εικόνα 4-38: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας

- 231 -

Εικόνα 4-39: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT1W με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και παρουσίαση των φαινομένων που παρατηρήθηκαν: έναρξη της ρωγμής, διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, αλλαγή κατεύθυνσης και διάδοση παράλληλα αλλά αντίθετα (υπό γωνία 180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης.....

- 233 -

Εικόνα 4-40: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT2W με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και παρουσίαση των φαινομένων που παρατηρήθηκαν: έναρξη και διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 30° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, στροφή και αλλαγή προσανατολισμού με κατεύθυνση κάθετα (90°) στη διεύθυνση της φόρτισης, διάδοση της ρωγμής διαμέσου της συγκόλλησης και του ενισχυτικού, συνεχίζοντας την πορεία της στην επιφάνεια του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό (rear plate) με τον ίδιο ρυθμό προχώρησης.....

- 234 -

Εικόνα 4-41: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT1WB με συγκολλητό

ενισχυτικό απλής λάμας και μηδενική επιφάνεια ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate = 0). Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής: έναρξη και διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, φτάνει στη συγκόλληση και στο ενισχυτικό, αποτυγχάνει να τα διαπεράσει, στρίβει αλλάζει κατεύθυνση και συνεχίζει να διαδίδεται παράλληλα αλλά αντίθετα (υπό γωνία 180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης	- 237 -
Εικόνα 4-42: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT2WB με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και μηδενική επιφάνεια ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate = 0). Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής: έναρξη και διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, στροφή σε μια κατεύθυνση κάθετα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, αρχικά αποτυγχάνει στην προσπάθειά της να διαδοθεί μέσω της συγκόλλησης και του ενισχυτικού, στρίβει, αλλάζει προσανατολισμό και διαδίδεται παράλληλα αλλά αντίθετα (υπό γωνία 180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, και σε κάποιο σημείο καταφέρνει να διαπεράσει τη συγκόλληση και το ενισχυτικό υπό ορισμένη γωνία και να διαδοθεί ταυτόχρονα στο ενισχυτικό αλλά και στην επιφάνεια του ελάσματος πίσω από αυτό με παρόμοιο ρυθμό προχώρησης	- 238 -
Εικόνα 4-43: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT, τόσο με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T CTiE (i = 1, 2, 3) και CTEB, όσο και με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας CTiW (i = 1, 2, 3) και CTiWB (i = 1, 2).....	- 239 -
Εικόνα 4-44: Επίπεδα ολίσθησης γύρω από το άκρο μιας ρωγμής τύπου-I (opening mode) σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης (αριστερά) και επίπεδης παραμόρφωσης (δεξιά)	- 240 -
Εικόνα 4-45: Η μορφή της έναρξης της ρωγμής που παρατηρήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.....	- 241 -
Εικόνα 4-46: Σύγκριση της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών ανάμεσα στα δύο διαφορετικά είδη γεωμετρίας του άκρου των ρωγμών που εξετάστηκαν, ημικυκλικό αμβλύ άκρο τύπου U (επάνω) και τριγωνικό οξύ άκρο τύπου V (κάτω)	- 243 -
Εικόνα 4-47: Μεταβολή του επιπέδου διάδοσης της ρωγμής (Forsyth [65]).....	- 244 -
Εικόνα 4-48: Σχηματικό διάγραμμα της αναμενόμενης ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών στα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων, όπως προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση του πειραματικού προγράμματος, σε συνάρτηση με το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού	- 246 -
Εικόνα B-1: Σχέδιο και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων συγκράτησης των συμπαγών δοκιμίων εφελκυσμού CT μικρής κλίμακας	- 268 -
Εικόνα B-2: Σχηματική απεικόνιση της τελικής μορφής της πειραματικής διάταξης των εξαρτημάτων συγκράτησης και των μικρής κλίμακας δοκιμίων εφελκυσμού CT λίγο πριν τοποθετηθούν στις αρπάγες της μηχανής.....	- 269 -
Εικόνα B-3: Εγκατάσταση και στήριξη των δοκιμίων εφελκυσμού CT στα κατάλληλα διαμορφωμένα εξαρτήματα συγκράτησης	- 270 -

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Εισαγωγή

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών με τη χρήση δοκιμίων μικρής κλίμακας. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση και η παρατήρηση της «συμπεριφοράς» των αναπτυσσόμενων ρωγμών στις αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές, με απώτερο στόχο τη χαρτογράφηση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους, με έμφαση στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων. Συνήθως, υποτίθεται ότι η πορεία των ρωγμών είναι γνωστή ή αναμενόμενη είτε από τις θεωρητικές εκτιμήσεις είτε από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, αλλά παρά τις μέχρι σήμερα έρευνες, οι παράγοντες που ελέγχουν και καθορίζουν την πορεία διάδοσης μιας ρωγμής δεν είναι ακόμα εντελώς κατανοητοί.

Αυτή η ανάγκη προσδιορισμού και κατανόησης των παραμέτρων που επιδρούν στην ανάπτυξη και την κατεύθυνση διάδοσης των ρωγμών, αποτέλεσε το κίνητρο αυτής της διπλωματικής εργασίας, ώστε τελικά να μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά και η διάδοσή τους στη μεταλλική κατασκευή των σύγχρονων πλοίων. Η επίτευξη αυτού του στόχου θα οδηγήσει στην αύξηση της αξιοπιστίας των ναυπηγικών κατασκευών και στον καθορισμό των ορίων αστοχίας, προβλέποντας με ακρίβεια την επικινδυνότητα της ρωγμής για την κατασκευαστική ακεραιότητα. Το κίνητρο πηγάζει, επομένως, από διάφορα πραγματικά περιστατικά θραύσης ναυπηγικών κατασκευών λόγω της αναπάντεχης και απρόβλεπτης διάδοσης ρωγμών, οι οποίες είτε προϋπήρχαν είτε αναπτύχθηκαν στη μεταλλική κατασκευή εξαιτίας των επιβαλλόμενων λειτουργικών φορτίων. Επομένως, για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να δοθεί ώθηση στην ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων που αφορούν τη χρήση των υλικών και τον κατασκευαστικό και σχεδιαστικό τομέα ώστε να μειωθούν και να αποφεύγονται φαινόμενα κατασκευαστικής αστοχίας.

Τα πλοία είναι κατασκευές με πολύ σύνθετες δομές και υπόκεινται σε ένα πολύ ευρύ φάσμα φορτίων στο δύσκολο και σκληρό περιβάλλον της θάλασσας. Η πρόοδος σε τεχνολογίες που σχετίζονται με τη σχεδίαση και κατασκευή πλοίων είναι συνεχής

και αφορά μία έντονη επιδίωξη για βελτιωμένες κατασκευές με τη χρήση σύγχρονων κατασκευαστικών υλικών οι οποίες θα αλλάξουν σε μεγάλο βαθμό τα μελλοντικά πλοία. Το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι μία κατηγορία υλικών, η οποία τα τελευταία χρόνια βρίσκει ποικίλες εφαρμογές στη ναυπηγική και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο από τη ναυπηγική βιομηχανία για την κατασκευή σύγχρονων πλοίων υψηλής τεχνολογίας. Για το λόγο αυτό η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην πειραματική ανάλυση της θραύσης των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών, τα αποτελέσματα της οποίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την εξέταση και άλλων ναυπηγικών κατασκευαστικών υλικών σε μελλοντικές πειραματικές μελέτες.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, το οποίο είναι εισαγωγικό, γίνεται παρουσίαση στον αναγνώστη 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 την κατασκευαστική ανάλυση και σχεδιασμό των ναυπηγικών κατασκευών. Επίσης, προβάλεται η επιδίωξη της ναυπηγικής βιομηχανίας για την κατασκευή σύγχρονων πλοίων με τη χρήση νέων ελαφρύτερων ναυπηγικών υλικών, με σημαντικότερο το αλουμίνιο και τα κράματά του. Έτσι, γίνεται περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του αλουμινίου και των κραμάτων του, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους και αναφέρονται οι ποικίλες εφαρμογές τους στη ναυπηγική.

Στο τρίτο κεφάλαιο συνοψίζονται οι φορτίσεις και αποκρίσεις των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων, αναλύονται η φύση της αστοχίας των ναυπηγικών κατασκευών και οι βασικές αρχές της θραύσης και περιγράφονται τα είδη των ρωγμών και τα χαρακτηριστικά ανάπτυξης και διάδοσής τους. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι αρχές της θεωρίας της μηχανικής της θραύσης και τέλος η μελέτη των βασικών κατασκευαστικών στοιχείων και η ολική και τοπική αντοχή της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων.

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 δύο ομάδες πειραμάτων. Η πρώτη ομάδα πειραμάτων περιλαμβάνει δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια τύπου «dogbone» για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561. Η δεύτερη πειραματική ομάδα διαιρείται σε δύο

υποομάδες. Στην πρώτη υποομάδα διενεργήθηκαν εφελκυστικές δοκιμές σε μη ενισχυμένα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT, ενώ στη δεύτερη υποομάδα χρησιμοποιήθηκαν ενισχυμένα πλαίσια αλουμινίου είτε με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T είτε με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας, τα οποία αποκάλυψαν ότι φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση και σύλληψη των ρωγμών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία, τον τύπο και τη διάταξη των ενισχυτικών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται, τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου κράματος αλουμινίου 1561, η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, η επιμέρους ανάλυση κάθε δοκιμής εφελκυσμού και τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά. Η χαρτογράφηση και η εξέταση της μορφής των αναπτυσσόμενων ρωγμών και της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους στις αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές αποτελεί ένα ενδιαφέρον και πολύ σημαντικό πρόβλημα καθώς το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε διάφορες κλίμακες μεγέθους, που κυμαίνονται από την εμφάνιση των μικροσκοπικών κενών ως την δημιουργία ρωγμών και τη θραύση των αλουμινένιων ενισχυμένων και μη πλαισίων. Η μεθοδολογία για το σχεδιασμό των πειραμάτων προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτής της μελέτης παρουσιάζεται, στοχεύοντας στην παρατήρηση και περιγραφή όλων των σημαντικών παραγόντων και πτυχών της θραύσης στις αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές. Σκοπός είναι η κατανόηση των μηχανισμών θραύσης που είναι αποτέλεσμα της απόκρισης των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών που περιέχουν ρωγμές.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πραγματοποίηση του πειραματικού προγράμματος, επαναπροσδιορίζεται ο αρχικός στόχος και εξετάζεται κατά πόσο η πειραματική μελέτη συνέβαλε αποτελεσματικά στην επίτευξή του. Επιπρόσθετα, αναφέρονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, ώστε τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας να επεκταθούν και για άλλα ναυπηγικά υλικά.

Η ολοκλήρωση του συνόλου των πειραμάτων παρέχει τις πληροφορίες και τα στοιχεία της συμπεριφοράς σε θραύση των αλουμινένιων ενισχυμένων και μη ελασμάτων των ναυπηγικών κατασκευών, το οποίο ήταν ένας από τους κύριους στόχους αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αυτά τα στοιχεία που αποκομίσαμε, με τις κατάλληλες αναλύσεις μπορούν να καλύψουν το κενό για τη γνώση των διαδικασιών της έναρξης, διάδοσης και σύλληψης των ρωγμών που ισχύουν τόσο για τις αλουμινένιες όσο και για άλλες μεταλλικές κατασκευές. Εύχομαι η διπλωματική

εργασία αυτή να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στα χέρια εκείνων που θα συνεχίσουν το πειραματικό πρόγραμμα για την πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση των ναυπηγικών κατασκευών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες 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 και καταλυτική συμβολή του στην εκπόνηση και ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ για την υποστήριξη τόσο κατά τη διάρκεια του πειραματικού προγράμματος όσο και κατά το διάστημα της συγγραφής της, καθώς επίσης και για τις γνώσεις και τον τρόπο σκέψης που μου μετέδωσε τόσο ως καθηγητής μου αλλά και κατά τη διάρκεια της άριστης συνεργασίας μου μαζί του. 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, καθώς και για τις χρήσιμες γνώσεις και επιστημονικές συμβουλές με τις οποίες με εφοδίασε. Τον ευχαριστώ για τις ώρες που μου αφιέρωσε κάθε φορά που τον χρειαζόμουν και ακόμα για την άψογη συνεργασία μου μαζί του. Θέλω ακόμα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Τσούβαλη, Αναληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για τη βοήθειά του στην πειραματική διαδικασία, καθώς και τον κ. Αθανάσιο Μαρκουλή, τεχνικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, υπεύθυνο για το χειρισμό της μηχανής δοκιμών που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία. Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στους γονείς μου για την συμβολή τους όλα αυτά τα χρόνια σε κάθε μου προσπάθεια και την υποστήριξη που μου προσφέρουν σε κάθε μου βήμα.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 Η Γενική Τάση στη Ναυπηγική Βιομηχανία

Η ναυπηγική βιομηχανία διεθνώς αντιμετωπίζει σημαντική άνοδο στις νέες παραγγελίες για την ανέγερση σύγχρονων πλοίων, γεγονός που καταδεικνύει τη σπουδαία ανάπτυξη των θαλάσσιων μεταφορών, απόρροια της οικονομικής παγκοσμιοποίησης, των ενεργειακών αναγκών και της επακόλουθης αύξησης στο φορτίο.

Τα πλοία είναι κατασκευές με πολύ σύνθετες δομές έναντι άλλων τύπων κατασκευών. Υπόκεινται σε ένα πολύ ευρύ φάσμα φορτίων στο δύσκολο και σκληρό περιβάλλον της θάλασσας. Η πρόοδος σε τεχνολογίες που σχετίζονται με τη σχεδίαση και κατασκευή πλοίων είναι συνεχής. Οι σχεδιαστές πλοίων προσπαθούν να αναπτύξουν ορθολογιστικά και βέλτιστα σχέδια βασισμένα σε άμεσες μεθόδους ανάλυσης της αντοχής, χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες προκειμένου να υλοποιήσουν τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Πολλά ναυπηγικά προγράμματα αντιμετώπισαν και αντιμετωπίζουν προβλήματα κατά τη μετάβαση από το σχέδιο στην κατασκευή. Επιπλέον, τα διάφορα θαλάσσια ατυχήματα επιφέρουν περισσότερα προβλήματα λόγω των σοβαρών επιπτώσεων που έχουν στους ανθρώπους ή/και το περιβάλλον.

Στον τομέα της ναυπηγικής και της κτήσεως νέων πλοίων η παραγωγικότητα εξαρτάται από διάφορες σημαντικές παραμέτρους. Μερικές από αυτές είναι :

- η ικανότητα ανάπτυξης των σχεδίων των νέων κατασκευών,
- η ύπαρξη αποτελεσματικού σχεδιασμού,
- ο προγραμματισμός για την οργάνωση και την ολοκλήρωση της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς, επίσης, και
- η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η εφαρμογή της προς όφελος της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας.

Οι ναυπηγοί κατά το σχεδιασμό νέων πλοίων μελετούν συνεχώς τους τρόπους για να μειώσουν το βάρος της κατασκευής προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το

ωφέλιμο φορτίο κάθε πλοίου για δεδομένο συνολικό εκτόπισμα και επίσης με τον τρόπο αυτό να ελαχιστοποιήσουν, όσο είναι δυνατόν, το κόστος των νέων κατασκευών. Η ευκολότερη επιλογή για το σχεδιαστή είναι να χρησιμοποιήσει ένα ελαφρύ κατασκευαστικό υλικό, όπως τα σύνθετα υλικά και το αλουμίνιο, τα οποία έχουν πλέον μεγάλη εφαρμογή στην ναυπηγική, χάρη στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και τεχνογνωσίας ως προς την χρήση τους.

Το αλουμίνιο αποτελεί την βασική επιλογή κατασκευαστικού υλικού για τα ταχύπλοα σκάφη και τα σκάφη αναψυχής λόγω της υψηλής αντοχής του σε σχέση με το μικρό του βάρος. Όταν τα κράματα αλουμινίου παραμορφώνονται επιδεικνύουν υψηλή μηχανική αντοχή, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται η ολκιμότητά τους. Αυτή η ιδιότητα επηρεάζει άμεσα τη διαδικασία παρασκευής και διαμόρφωσης των ελασμάτων της γάστρας, κατά την οποία ενδεχομένως να δημιουργηθούν ατέλειες με τη μορφή ρωγμών στο εσωτερικό του ελάσματος. Οι ατέλειες αυτές, καθώς επίσης και τυχόν κακή ευθυγράμμιση των ελασμάτων ή μεγαλύτερο διάκενο από το απαιτούμενο μεταξύ τους κατά τη συγκόλληση, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων στη συγκόλληση που οδηγούν σε τοπικές υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων με απρόβλεπτες συνέπειες για την κατασκευή. Αυτό επιδρά αρνητικά όχι μόνο στη συγκόλληση, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της σε κόπωση, αλλά θέτει σε κίνδυνο και ολόκληρη την κατασκευή σε περίπτωση απρόβλεπτης διάδοσης μιας ρωγμής που ξεκινά από το μέταλλο συγκόλλησης.

Επομένως, για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να δοθεί ώθηση στην ανάπτυξη κατάλληλων μεθόδων που αφορούν τη χρήση των υλικών και τον κατασκευαστικό και σχεδιαστικό τομέα ώστε να μειωθούν και να αποφεύγονται φαινόμενα κατασκευαστικής αστοχίας και οι αρνητικές συνέπειες που αυτές συνεπάγονται ως προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Αυτό είναι ένα πολυσύνθετο και δύσκολο πρόβλημα, το οποίο χρειάζεται έρευνα σε βάθος από την Πανεπιστημιακή Κοινότητα αλλά και τις ναυπηγικές βιομηχανίες. Η ναυπηγική βιομηχανία που χρησιμοποιεί κυρίως ως υλικό κατασκευής πλοίων το αλουμίνιο πρέπει να ενισχύσει την έρευνα και την ανάπτυξη προς την κατεύθυνση αυτή σε συνεργασία με τους ναυπηγούς μηχανικούς και τους κατασκευαστές ώστε να εξελίξει, να προσαρμόσει και να εφαρμόσει τις καλύτερες ισχύουσες παγκόσμιες πρακτικές προς όφελός της.

2.2 Το Σύνθετο Πρόβλημα της Μελέτης της Μεταλλικής Κατασκευής των Πλοίων

Η χρήση των μεταλλικών υλικών και ειδικότερα του χάλυβα επέτρεψε την ελάττωση των διαστάσεων των κατασκευαστικών στοιχείων, σε τέτοιο βαθμό που οι κατασκευές που προέκυψαν μπορούν να συμπεριληφθούν στην κατηγορία των λεπτότοιχων κατασκευών. Τα πρώτα χρόνια της κατασκευής των μεταλλικών πλοίων, οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν βασίστηκαν σε σχετικά απλούς υπολογισμούς και στη διαθέσιμη μέχρι τότε εμπειρία και τεχνογνωσία. Η κατάσταση αυτή συνεχίστηκε μέχρι πριν από λίγα χρόνια, καθώς το πρόβλημα του προσδιορισμού πολλών από τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη υπήρξε ανυπέρβλητο.

Το πλοίο, σε σχέση με μια συμβατική δομοστατική κατασκευή, υποβάλλεται σε φορτίσεις οι οποίες μεταβάλλονται συνεχώς. Αυτό οφείλεται κυρίως στο θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά και λόγω της λειτουργίας της ίδιας της κατασκευής του πλοίου (μηχανολογικός εξοπλισμός) και του μεταφερόμενου φορτίου (φορτίσεις στο εσωτερικό δεξαμενών). Ο περιβάλλον χώρος αλληλεπιδρά με το πλοίο με πολύπλοκους μηχανισμούς και έτσι ο προσδιορισμός της απόκρισης καθίσταται δύσκολος. Για το λόγο αυτό οι μελετητές κατέφυγαν στη χρήση σχετικά απλών μοντέλων που μπορούν να δώσουν κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα όσον αφορά στις καταπονήσεις της κατασκευής.

Με τη σταδιακά αυξανόμενη χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων και αργότερα με τη χρήση θεωρητικών εργαλείων (και τις τελευταίες δεκαετίες με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων), σχετικά με την απόκριση της κατασκευής, έγινε δυνατό να διατυπωθούν οι παράμετροι αναφοράς και να προσεγγισθεί ο ορθολογικός σχεδιασμός της κατασκευής. Ειδικότερα, ο ορθολογικός σχεδιασμός αποβλέπει στη συστηματική χρήση μαθηματικών εργαλείων έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη αφενός μεν οι συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής, αφετέρου δε οι απαιτήσεις των χρηστών της όπως η διάρκεια ζωής της. Μπορούν δηλαδή και πρέπει να εισάγονται και οικονομικές παράμετροι στο πρόβλημα του σχεδιασμού ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη συνεχιζόμενη λειτουργία της κατασκευής. Οι σύγχρονες μέθοδοι ορθολογικού σχεδιασμού περιλαμβάνουν αφενός μεν τις εξωτερικές φορτίσεις, αφετέρου δε τις ιδιότητες της μεταλλικής κατασκευής.

Ως αποτέλεσμα των εξελίξεων αυτών τα τελευταία χρόνια έχουν εισαχθεί στη μελέτη της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου μια πληθώρα τεχνικών που βασίζονται στη μαθηματική ανάλυση της συμπεριφοράς των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής. Έτσι, στους κανονισμούς των Νηογνομώνων έχουν προστεθεί κεφάλαια σχετικά με τον λυγισμό των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής (buckling manuals), το σχεδιασμό της κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τις κοπωτικές φορτίσεις (fatigue design procedures) και σε ορισμένες περιπτώσεις και σχετικά με τη χρήση των μεθόδων της θεωρίας αξιοπιστίας ναυπηγικών κατασκευών (marine structural reliability methods).

Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα γίνεται σημαντική προσπάθεια εφαρμογής σύγχρονων μεθόδων σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων για τη μετάβαση από την κλασική μέθοδο των επιτρεπόμενων τάσεων (permissible stress approach) στη σύγχρονη μέθοδο σχεδιασμού βάσει οριακών καταστάσεων (limit state design) στις ναυπηγικές κατασκευές.



Εικόνα 2-1: Η προσάραξη του πετρελαιοφόρου σε βράχο προκάλεσε τη ρύπανση του θαλάσσιου χώρου και των ακτών

Στα πλοία που είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμες κατασκευές, επιβάλλονται επίσης και οικονομικοί περιορισμοί. Οι οικονομικοί αυτοί περιορισμοί εκφράζονται κατ' αρχή από το κόστος κτήσης του κάθε πλοίου, γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Τα τελευταία χρόνια, όμως, γίνεται

αντιληπτό ότι ο πλοιοκτήτης θα πρέπει να ενδιαφέρεται και για το συνολικό κόστος της δια βίου εκμετάλλευσης, που περιλαμβάνει και τα κόστη συντήρησης και επισκευής σε περίπτωση βλάβης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται έμμεσα ο αρχικός σχεδιασμός, καθότι για να περιορισθούν οι ζημιές της μεταλλικής κατασκευής, επιλέγονται διατάξεις που δεν υποφέρουν από κοπωτικές αστοχίες αλλά και διευκολύνουν τις επισκευές.

Τέλος, έχει καταστεί σαφές ότι μετά τις συχνές προσαράξεις και ατυχήματα μεγάλων δεξαμενόπλοιων που είχαν ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη ρύπανση του θαλάσσιου χώρου και των ακτών, και η προστασία του περιβάλλοντος επίσης επηρεάζει τις επιλογές των σχεδιαστών, Εικόνα 2-1.

Διαφαίνεται λοιπόν ότι η μελέτη της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι μια σύνθετη διαδικασία που πρέπει να λαμβάνει υπόψη τεχνικές, οικονομικές αλλά και περιβαλλοντολογικές απαιτήσεις. Επιδιώκοντας να δώσουμε ένα σύγχρονο ορισμό του σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής, μπορούμε να πούμε ότι :

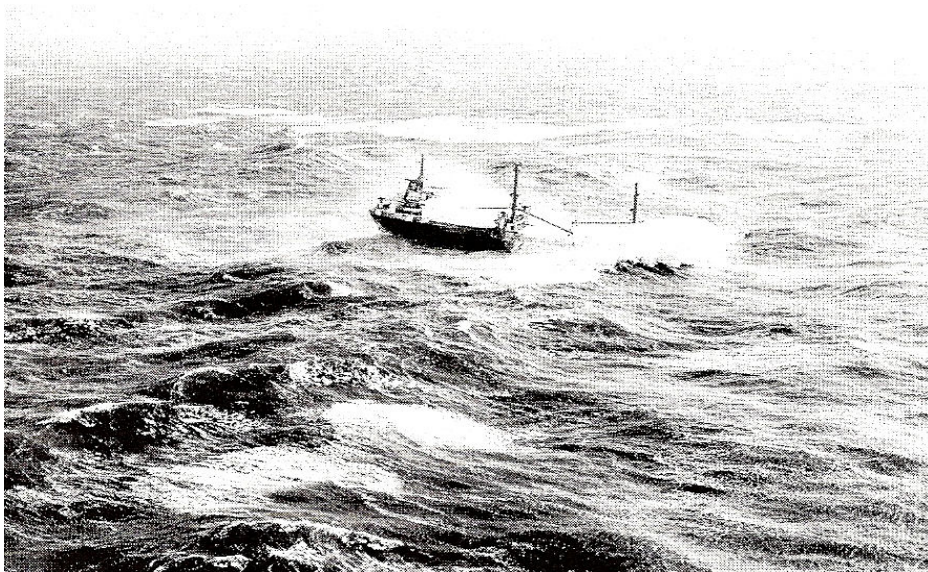
«Ο σχεδιασμός της κατασκευής ενός πλοίου είναι η διαδικασία κατά την οποία επιλέγονται παράμετροι μορφολογίας και διαστάσεων, έτσι ώστε αυτό να λειτουργήσει υπό συνθήκες φόρτισης, οικονομικής και λειτουργικής εκμετάλλευσης και προστασίας του περιβάλλοντος, που να είναι σύμφωνες με τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, του κατασκευαστή και των σχετικών Εθνικών και Διεθνών κανονισμών και διατάξεων».

2.3 Κατασκευαστική Ανάλυση και Σχεδιασμός των Ναυπηγικών Κατασκευών

Οι ναυπηγικές κατασκευές στο δυσμενές περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν και στις συνθήκες υπηρεσίας τους, υποβάλλονται συνεχώς σε ένα σύνθετο φάσμα από επιβαλλόμενα φορτία. Έτσι, είναι μεγάλη η ανάγκη ώστε τα κατασκευαστικά υλικά και οι συγκολλήσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πλοίου να επιδεικνύουν υψηλή αντοχή σε θραύση σε αυτές τις ακραίες και δύσκολες συνθήκες λειτουργίας.

Τα πιο συνηθισμένα και συχνά επαναλαμβανόμενα δυναμικά φορτία που συναντά κάθε ναυπηγική κατασκευή στο περιβάλλον λειτουργίας της κατά τη

διάρκεια της ζωής της είναι λόγω κυματισμών, σφυρόκρουσης, κραδασμών, θερμοκρασιακών μεταβολών μεταξύ των διαφορετικών περιοχών πλεύσης και οι επιδράσεις του φορτίου και της φορτοεκφόρτωσης. Σε μερικές περιπτώσεις, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, επιδρούν επίσης δυναμικά φορτία από τη λειτουργία οπλικών συστημάτων στην περίπτωση πολεμικών πλοίων. Η κατασκευαστική ακεραιότητα της γάστρας των πλοίων πρέπει να εξασφαλίζεται κάτω από όλες τις παραπάνω αναφερθείσες αντίξοες περιπτώσεις επιβολής δυναμικών φορτίων, τόσο σε συνθήκες υπηρεσίας όσο και σε ακραίες καιρικές συνθήκες διαρκούς θαλασσοταραχής, καθώς επίσης και συνθήκες μάχης για τα πολεμικά πλοία, Εικόνα 2-2.



Εικόνα 2-2: Καταπόνηση εμπορικού πλοίου σε δυσμενείς συνθήκες διαρκούς θαλασσοταραχής

Η κατασκευαστική ανάλυση και ο σχεδιασμός είναι δύο έννοιες οι οποίες συνδέονται πολύ στενά μεταξύ τους. Πολλές φορές χρησιμοποιείται η μία στη θέση της άλλης, λανθασμένα όμως, αφού υπάρχουν αρκετές σημαντικές διαφορές ανάμεσα στο σχεδιασμό και τη μεταφορά αυτού μέσω της κατασκευαστικής ανάλυσης στην αποπεράτωση της κατασκευής. Η κατασκευαστική ανάλυση αφορά την αξιολόγηση των αναπτυσσόμενων τάσεων και της αντοχής της κατασκευής και απαιτεί πληροφορίες για τα επιβαλλόμενα φορτία, καθώς επίσης χρειάζεται ένα αρχικό κατασκευαστικό σχέδιο. Το αποτέλεσμα της κατασκευαστικής ανάλυσης είναι η απόκριση της κατασκευής που καθορίζεται με βάση τις αναπτυσσόμενες τάσεις, τις δημιουργούμενες παραμορφώσεις και, τέλος, την αντοχή. Κατόπιν, η κατ' εκτίμηση

απόκριση της κατασκευής συγκρίνεται με τα κριτήρια που είχαμε θέσει στο στάδιο του σχεδιασμού.

Η κατασκευαστική ανάλυση και ο σχεδιασμός των πλοίων είναι θέμα παραχωρήσεων και συμβιβασμών :

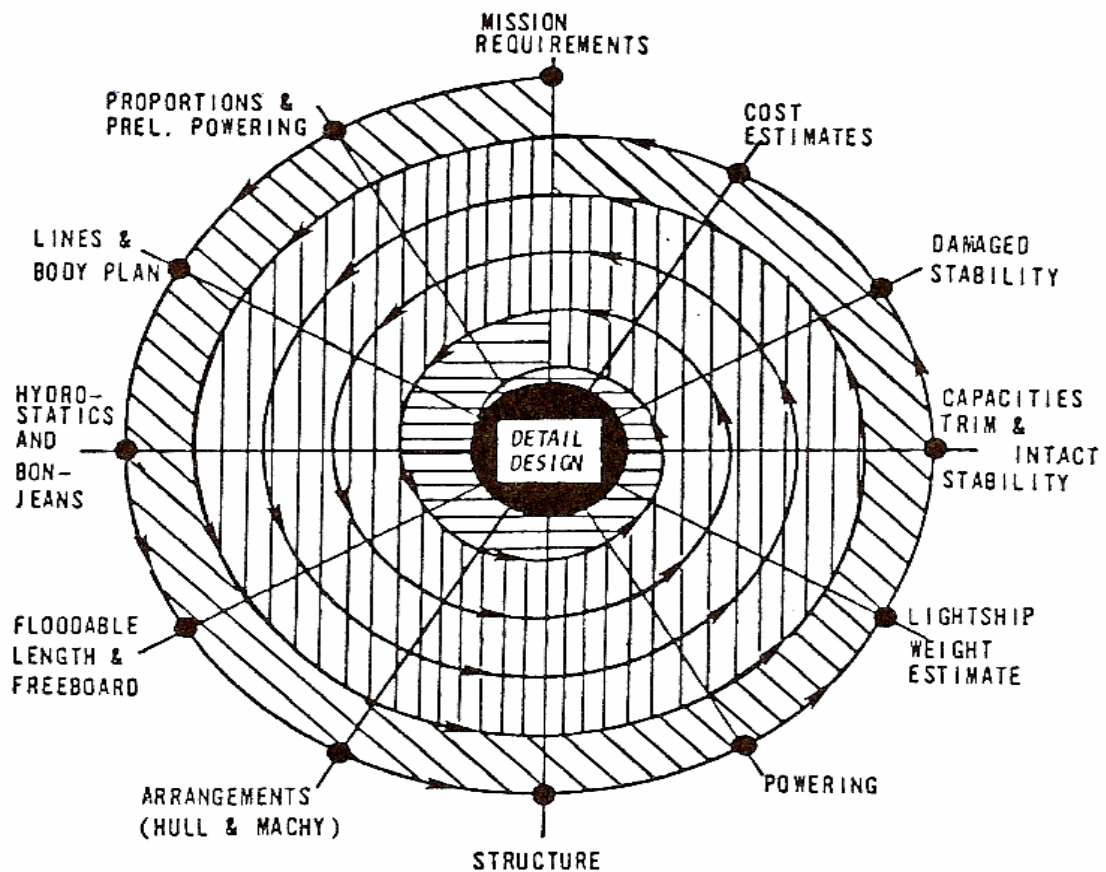
- συμβιβασμός ανάμεσα στην κατασκευαστική ακρίβεια με πιστή εφαρμογή του σχεδίου και του απαιτούμενου χρόνου για να εκτελεστεί το προβλεπόμενο σχέδιο,
- περιορισμός της αβεβαιότητας και αύξηση της ασφάλειας της κατασκευής με ταυτόχρονη ελάττωση του συντηρητισμού στο σχεδιασμό,
- συμβιβασμός μεταξύ του βάρους της κατασκευής και του κόστους κτήσης του πλοίου,
- συμβιβασμός μεταξύ του ελάχιστου κόστους κατασκευής, και του συνολικού κόστους της δια βίου εκμετάλλευσης του πλοίου, και, τέλος,
- το βέλτιστο σχέδιο για τον μελετητή ναυπηγό μηχανικό και τον κατασκευαστή μπορεί να είναι διαφορετικό από το βέλτιστο σχέδιο για τον πλοιοκτήτη, εκπληρώνοντας και στις δύο περιπτώσεις τις ίδιες απαιτήσεις.





Οι διαδικασίες του σχεδιασμού και της ανάλυσης διαφέρουν σε θεμελιακό επίπεδο και, παρόλο που είναι συμπληρωματικές, ακολουθούν αντίστροφες πορείες. Κατά τα αρχικά στάδια της ανάλυσης, γίνονται ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές σχετικά με τις φορτίσεις και την απόκριση της κατασκευής. Η χρήση νεότερων δεδομένων και αντίστοιχα πιο σύνθετων μεθόδων επιτρέπει την σταδιακά ακριβέστερη προσέγγιση στην τελική μορφή της μεταλλικής κατασκευής.

2.3.1 Η ελικοειδής καμπύλη μελέτης ναυπηγικών κατασκευών

Οι φάσεις της μελέτης και σχεδίασης μιας ναυπηγικής κατασκευής μπορούν να εριγραφούν παραστατικά μέσω της Ελικοειδούς Καμπύλης Μελέτης του J. H. Evans.

Η ελικοειδής αυτή καμπύλη δείχνει αφενός τη διαδοχική διέλευση από τα διάφορα στάδια της μελέτης και αφετέρου τη βαθμιαία προσέγγιση του τελικού στόχου σχεδιασμού, Εικόνα 2-3.



PHASE	LARGE MERCHANT SHIP TYPICAL EFFORT
 CONCEPT DESIGN	20-MAN-DAYS
 PRELIMINARY DESIGN	300-MAN-DAYS
 CONTRACT DESIGN	5,000-MAN-DAYS
 DETAIL DESIGN	60,000-MAN-DAYS

Εικόνα 2-3: Ελικοειδής Καμπύλη Μελέτης Ναυπηγικών Κατασκευών του J. H. Evans

Το στάδιο της μελέτης και σχεδίασης μιας ναυπηγικής κατασκευής στο οποίο θα εξεταστούν οι διαστάσεις και οι αναλογίες τους εξαρτάται κατά πολύ από τη φύση της διερεύνησης και τις απαιτήσεις των ιδιοκτητών. Ανεξάρτητα από το αν εξετάζονται ή όχι κατά τη διάρκεια της μελέτης αρχικού σχεδιασμού και της

προμελέτης δυνατοτήτων, είναι σίγουρο ότι πρέπει να διερευνηθούν, προτού το πλοίο διαμορφωθεί ως μία βιώσιμη πρόταση. Υπάρχει μεγάλος αριθμός βοηθητικών παραμέτρων για τους ναυπηγούς. Αντιμέτωποι με όλες αυτές, δεν είναι εύκολο να αποκτήσουμε μία έννοια αναλογίας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν μερικές παράμετροι που υπερисχύουν και που επιπλέον βοηθούν ιδιαίτερα στον προσανατολισμό των επιλογών, προτού επιχειρηθούν οι λεπτομερείς υπολογισμοί.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι παρουσίασης της συγκλίνουσας διαδικασίας σχεδιασμού του πλοίου, αλλά ένας από τους πιο παραστατικούς είναι η ελικοειδής καμπύλη σχεδιασμού, η οποία αποδίδει τόσο την αλληλεπιδρώσα όσο και την επαναληπτική φύση όλου του σχεδιασμού του πλοίου.

Σύμφωνα με την επικρατούσα διεθνή ορολογία διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες ή διαβαθμίσεις μελέτης :

A. Μελέτη Εφικτότητας Αρχικού Σχεδιασμού (Concept Design) – 1^η σπείρα

Μεταφράζει σε πρώτη προσέγγιση τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη σε τεχνικά χαρακτηριστικά, ναυπηγικά και μηχανολογικά. Αντιστοιχεί κατά μέρος σε μια μελέτη δυνατοτήτων ή σκοπιμότητας. Προϋπολογίζει βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου, δηλαδή το μήκος L , πλάτος B , κοίλο D , βύθισμα T , τον συντελεστή γάστρας C_B , την ισχύ πρόωσης P_B και εξετάζει εναλλακτικές λύσεις για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του πλοιοκτήτη με γνώμονα την οικονομικότερη λύση. Στο στάδιο αυτό επιτυγχάνεται ο βασικός συμβιβασμός ανάμεσα σε όλες τις αντικρουόμενες απαιτήσεις σε σχέση με το πλοίο. Τέλος, ο στόχος του σταδίου εφικτότητας είναι να διασφαλιστεί ότι όλα τα στοιχεία του σχεδίου του πλοίου συνθέτουν ένα ταιριαστό σύνολο.

B. Προμελέτη (Preliminary Design) – 2^η – 4^η σπείρα

Αποτελεί περαιτέρω λεπτομερέστερη επεξεργασία των επιμέρους βημάτων : Επακριβής καθορισμός των βασικών χαρακτηριστικών του σκάφους, μήκος L , πλάτος B , κοίλο D , βύθισμα T , συντελεστής γάστρας C_B , ισχύς πρόωσης P_B , έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη και να ανταποκρίνονται σε μια οικονομικά βέλτιστη λύση. Το αποτέλεσμα της προμελέτης χρησιμεύει ως βάση για τη σύνταξη των όρων του συμβολαίου μεταξύ πλοιοκτήτη και ναυπηγείου, καθώς και για τις επιμέρους τεχνικές προδιαγραφές.

Οι συνδυασμένες φάσεις Α και Β είναι γνωστές και ως Βασική Μελέτη (Basic Design).

Γ. Μελέτη Προδιαγραφών Συμβολαίου ή Συμβατική Μελέτη (Contract Design) – 5^η σπείρα

Στόχος της φάσης αυτής είναι η εκπόνηση των απαραίτητων υπολογισμών και σχεδίων, καθώς και η επακριβής σύνταξη των τεχνικών προδιαγραφών που αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του επίσημου συμβολαίου μεταξύ του πλοιοκτήτη και ναυπηγείου.

Η φάση αυτή εμπεριέχει τον επακριβή σχεδιασμό των εξομαλυμένων ναυπηγικών γραμμών, τον επακριβή υπολογισμό της ισχύος πρόωσης με βάση τα πειράματα προτύπου, τη θεωρητική ή πειραματική ανάλυση της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς (όχι πάντα), την ανάλυση των ελικτικών του ικανοτήτων (όχι πάντα), εναλλακτικές λύσεις της προωστήριου εγκατάστασης (έλικα – μηχανή), κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μεταλλικής κατασκευής, το σχεδιασμό των βοηθητικών δικτύων (ηλεκτρολογικά και σωληνώσεις) και, τέλος, τον ακριβέστερο υπολογισμό των επιμέρους βαρών, του ολικού βάρους και των αντίστοιχων κέντρων βαρών.

Δ. Μελέτη Λεπτομερούς Σχεδιασμού (Detailed Design)

Στην τελευταία φάση της μελέτης γίνεται η λεπτομερής σχεδίαση όλων των κατασκευαστικών στοιχείων, καθώς και η σύνταξη προδιαγραφών κατασκευής και εγκατάστασης για τους ναυπηγοεργάτες (ελασματοουργοί, συγκολλητές, εφαρμοστές), αλλά και τους προμηθευτές του μηχανολογικού υλικού και εξοπλισμού. Χαρακτηριστικό της φάσης αυτής είναι ότι, ενώ τα εκπονηθέντα σχέδια και οι προδιαγραφές είναι αποτέλεσμα μελέτης εξειδικευμένων μηχανικών, ναυπηγών και μηχανολόγων, η περαιτέρω διαδικασία της εφαρμογής των αποτελεσμάτων αυτών εναπόκειται στις ικανότητες του μηχανικού παραγωγής, των εργοδηγών και των ναυπηγοτεχνικών, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το κατασκευαστικό τμήμα του ναυπηγείου.

Ανασκοπώντας τις φάσεις της μελέτης Α έως Δ μπορεί να παρατηρηθεί ότι με βάση τα αποτελέσματα της Βασικής Μελέτης (Α και Β) είναι δυνατόν να

προεκτιμηθούν με σχετική βεβαιότητα τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και το κόστος ναυπήγησης ενός οικονομικά αποδοτικού σκάφους. Έτσι το ναυπηγείο μπορεί να προχωρήσει στη σύνταξη μιας προσφοράς προς τον ενδιαφερόμενο πλοιοκτήτη που σε περίπτωση επιτυχίας θα συμπληρωθεί από τις λεπτομερέστερες μελέτες Γ και Δ.

Στο στάδιο της προμελέτης ο ναυπηγός καλείται να πάρει τις πιο σημαντικές αποφάσεις με βάση τις υπάρχουσες διαθέσιμες επιλογές και τη βελτιστοποίηση της κατασκευής, έτσι ώστε αυτή να εκπληρώνει το σκοπό της και να ικανοποιεί τις διάφορες απαιτήσεις και τους περιορισμούς.

2.3.2 Προκαταρκτικός σχεδιασμός της μεταλλικής κατασκευής

Ένας τρόπος προκαταρκτικού σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής των ναυπηγικών κατασκευών με βάση τις αρχές της μηχανικής, συνίσταται στο να προσδιορίσουμε τη διάταξη και τις διαστάσεις των διαφόρων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου χωρίς να γίνει χρήση των κανονισμών των Νηογνωμόνων. Κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη ορισμένοι παράγοντες όπως η διαμήκης και η τοπική αντοχή της κατασκευής. Άλλες εντατικές καταστάσεις όπως για παράδειγμα οι τέμνουσες δυνάμεις και οι στρεπτικές ροπές (διατμητικές τάσεις) και οι τάσεις που οφείλονται στην κόπωση εξετάζονται σε μεταγενέστερα στάδια της μελέτης.

Σκοπός του προκαταρκτικού σχεδιασμού είναι ο προσδιορισμός των κύριων χαρακτηριστικών και της μορφολογίας της κατασκευής με βάση την κατηγορία του πλοίου, τη διάταξη των κύριων στοιχείων της κατασκευής και τις κύριες φορτίσεις. Σημειώνεται ότι ο σχεδιασμός της μεταλλικής κατασκευής, όπως άλλωστε και αυτός του πλοίου στο σύνολό του, είναι μία επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία αποκτώνται σε κάθε στάδιο ακριβέστερα αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι έννοιες του σχεδιασμού και της ανάλυσης των κατασκευών είναι άρρηκτα συνδεδεμένες, καθώς η συνθετική διαδικασία του σχεδιασμού ουσιαστικά αποτελείται από επί μέρους αναλύσεις, οι οποίες όμως στοχεύουν στην τελική ικανοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Στις σύγχρονες ναυπηγικές κατασκευές είναι πλέον δυνατό όχι μόνο να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις αντοχής αλλά και να γίνει μια προσπάθεια βελτιστοποίησής της. Η βελτιστοποίηση μπορεί να έχει πολλαπλά οφέλη,

όπως την αυξημένη ασφάλεια, το μειωμένο κόστος κατασκευής, συντήρησης ή και της δια βίου εκμετάλλευσης του πλοίου.

Το βέλτιστο πλοίο μπορεί να ορισθεί ως εκείνο για το οποίο ο λόγος του συνόλου των αποδοχών προς το συνολικό κόστος είναι ο υψηλότερος. Εάν υιοθετήσουμε τον παραπάνω ορισμό, πρέπει να λάβουμε υπόψη τον πλήρη κύκλο δραστηριοτήτων του πλοίου. Για να μεγιστοποιηθούν οι αποδοχές θα πρέπει να σχεδιασθεί το μικρότερο δυνατό πλοίο που έχει όμως και την απαιτούμενη μεταφορική ικανότητα. Για το πλοίο αυτό, μπορούμε σε πρώτη θεώρηση να ορίσουμε τη βέλτιστη μεταλλική κατασκευή ως εκείνη η οποία εξασφαλίζει επαρκή αντοχή. Πλεονάζουσα αντοχή έχει συνεπώς ως επακόλουθο μεγαλύτερο βάρος από το αναγκαίο, και κατά συνέπεια μεγαλύτερο βύθισμα για την ίδια ποσότητα φορτίου. Απαιτούνται δηλαδή ισχυρότερα μηχανήματα πρόωσης από τα αναγκαία για την ίδια μεταφορική ικανότητα. Γίνεται δηλαδή αντιληπτό ότι τα κόστη ανέγερσης και εκμετάλλευσης αυξάνονται όταν η μεταλλική κατασκευή δεν είναι η βέλτιστη από πλευράς βάρους.

Το πρόβλημα σχεδιασμού της βέλτιστης κατασκευής προϋποθέτει τη δυνατότητα επιλογής της βέλτιστης διάταξης και χρήσης αντίστοιχων υλικών. Κατά κανόνα, στην πράξη το αποτέλεσμα είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των βέλτιστων λύσεων ελάχιστο βάρος – ελάχιστο κόστος κατασκευής. Όμως, και μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών πλοίων, τα κριτήρια διαφοροποιούνται. Οι ναυπηγικές κατασκευές υψηλών επιδόσεων (μικρότερων διαστάσεων πλοία) συνήθως κλίνουν προς την ελαχιστοποίηση του βάρους, με αντίστοιχες αυξήσεις του κόστους κατασκευής και εκμετάλλευσης. Κλασικά παραδείγματα αποτελούν τα εμπορικά πλοία προηγμένης τεχνολογίας όπως καταμαράν, υδροπτέρυγα, αλλά και τα πολεμικά πλοία και οι εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου. Από την άλλη πλευρά, στα συμβατικά εμπορικά πλοία συνήθως αναζητείται κάποια συμβιβαστική λύση.

Τα κύρια συμβατικά κριτήρια συμπεριφοράς της μεταλλικής κατασκευής των ναυπηγικών κατασκευών από πλευράς αντοχής είναι :

- η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, δηλαδή η τάση σχεδιασμού, και
- η επαρκής ακαμψία.

Τα κριτήρια αυτά βρίσκουν εφαρμογή κατά τον σχεδιασμό με βάση τους κανονισμούς των Νηογνομώνων και με άμεσους υπολογισμούς. Η μέγιστη

επιτρεπόμενη τάση αποτελεί ένα χρήσιμο μέτρο σύγκρισης στα προκαταρκτικά στάδια σχεδιασμού, δεν είναι όμως παρά μια απλοποίηση του πραγματικού προβλήματος. Σημειώνεται, επίσης, ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση δεν αποτελεί μέτρο της μέγιστης αντοχής της κατασκευής του πλοίου. Παράλληλα οφείλουμε να πούμε ότι η συμπεριφορά των μεταλλικών κατασκευών περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό φαινομένων για πολλά από τα οποία η τάση σχεδιασμού πράγματι αποτελεί επαρκές κριτήριο, όχι όμως όταν προκύπτει μη γραμμική (ελαστική και ελαστοπλαστική) συμπεριφορά. Το δεύτερο κριτήριο που αναφέρθηκε προηγουμένως είναι η ακαμψία. Για καθαρά πρακτικούς λόγους, απαιτείται επαρκής ακαμψία της γάστρας συνολικά αλλά και των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής σε τοπικό επίπεδο για να μην προκύψουν :

- Μείωση μεταφορικής ικανότητας (πλοίο στην κορυφή κύματος).
- Βλάβες σε μηχανολογικό εξοπλισμό (αξονικά συστήματα, δίκτυα, κ.ά.).
- Ελάττωση του αποδεκτού αριθμού επαναλήψεων τάσης κόπωσης.
- Ταλαντώσεις, με αντίστοιχα αρνητικά αποτελέσματα.

2.4 Κατασκευή Πλοίων από Ναυπηγικό Αλουμίνιο

Όσον αφορά στον τομέα της κατασκευής πλοίων από αλουμίνιο, υπάρχει μία έντονη επιδίωξη για βελτιωμένες κατασκευές και καινούργιες μεθόδους ανέγερσης οι οποίες θα αλλάξουν σε μεγάλο βαθμό τα μελλοντικά πλοία. Πρόκειται να έχουν σημαντικά διαφορετικές και προηγμένες μορφές γάστρας, να κατασκευάζονται σε μεγάλο βαθμό με αυτοματοποιημένες μεθόδους και να χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο ελαφρά μέταλλα, όπως το αλουμίνιο και άλλα υβριδικά υλικά κατασκευής σε σχέση με τα υφιστάμενα, Εικόνα 2-4.

Η ανάπτυξη του Eurocode 9 για αλουμινένιες κατασκευές οδήγησε τον Tryland [13], να μελετήσει αριθμητικά τη συμπεριφορά των ενισχυτικών τύπου-I και των κατατομών καταστρωμάτων σε καταστάσεις συγκεντρώσεων φορτίων στα ενισχυτικά κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από τα δεδομένα που προέκυψαν από ένα πειραματικό πρόγραμμα. Συγκρίσεις που έγιναν έδειξαν ότι οι φόρμουλες που έχουν αναπτυχθεί για τον σχεδιασμό των ενισχυτικών από χάλυβα

(Eurocode 3) πρέπει να μεταβληθούν συνυπολογίζοντας τις διαφορές στις ιδιότητες του υλικού όταν εφαρμόζονται για την κατασκευή ενισχυτικών από αλουμίνιο.



Εικόνα 2-4: Ανέγερση νέων προηγμένων τύπων πλοίων υψηλών επιδόσεων με σημαντικά διαφορετική μορφή γάστρας εξ ολοκλήρου από κράματα αλουμινίου

Η μέγιστη αντοχή ενισχυτικών σε θλίψη, έχει εξεταστεί από τους Xiao και Menzemer [12]. Η σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών αποτελεσμάτων και των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων έδειξε, ότι η ισχύουσα σχεδίαση των στοιχείων αυτών όσον αφορά στην αντοχή σε θλίψη είναι συντηρητική. Θεωρείται ότι οι διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών.

Η αστοχία κάποιας διάταξης ή κατασκευής μπορεί να επέλθει από κάθε μία ξεχωριστά ή από οποιοδήποτε συνδυασμό των επιμέρους αποκρίσεων της κατασκευής, σε φορτία και συνθήκες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Για παράδειγμα, πολύ υψηλή ή χαμηλή ελαστική παραμόρφωση μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Ένα κατασκευαστικό στοιχείο που φέρει φορτία και έχει υποστεί θραύση μπορεί να προκαλέσει αστοχία. Η διάδοση μιας ρωγμής εξαιτίας της διακύμανσης των ποικίλων επιβαλλόμενων φορτίων ή του δυσμενούς περιβάλλοντος λειτουργίας είναι πιθανό να οδηγήσει σε κατασκευαστική αστοχία με την πάροδο του χρόνου.

Η πρωταρχική ευθύνη ενός ναυπηγού μηχανικού είναι να εξασφαλίσει ότι αυτό που έχει σχεδιάσει θα λειτουργήσει όπως αναμενόταν και είχε θέσει ως στόχο για τον καθορισμένο χρόνο ζωής σύμφωνα με το σχεδιασμό, ενώ ταυτόχρονα θα είναι και ανταγωνιστικό στην αγορά. Η επιτυχία στη σχεδίαση ανταγωνιστικών κατασκευών και η αποτροπή πρόωρων μηχανικών θραύσεων μπορεί να επιτευχθεί εξετάζοντας και αποτιμώντας όλους τους δυνατούς μηχανισμούς αστοχίας που σχετίζονται με τη

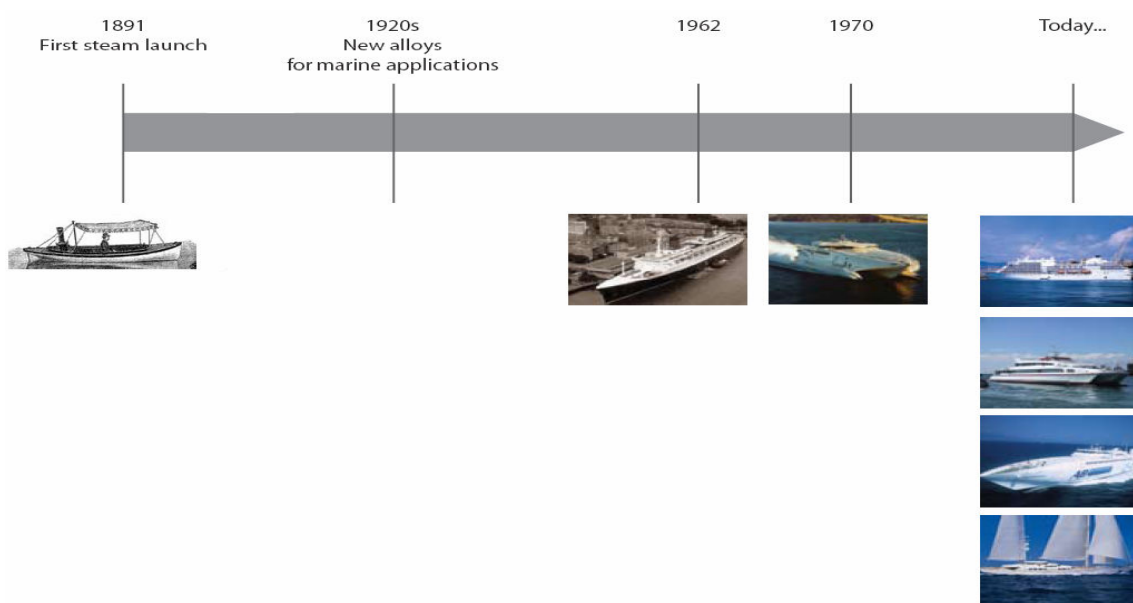
σχεδίαση. Για τη μελέτη των μηχανισμών αστοχίας, ο ναυπηγός θα πρέπει να γνωρίζει καλά τους ποικίλους μηχανισμούς που παρατηρούνται γενικά στην πράξη και που με τις κατάλληλες συνθήκες οδηγούν σε αστοχία την κατασκευή.

2.5 Το Αλουμίνιο και τα Κράματα του

2.5.1 Ιστορική αναδρομή για τη χρήση του αλουμινίου στη ναυπηγική

Παρά το γεγονός ότι το αλουμίνιο και τα κράματά του ήταν γνωστά από το τέλος του 19ου αιώνα, η επιτυχής εφαρμογή τους στη ναυπηγική είναι σχετικά πρόσφατη.

Η πρώτη χρήση του αλουμινίου στην ναυπηγική είναι γύρω στο 1891 όταν ο Escher Wyss κατασκεύασε το πρώτο πλοiάριο από αλουμίνιο που δούλευε με ατμό. Το 1894 ναυπηγήθηκε στην Αγγλία από τους Yarrow & Co η πρώτη τορπιλάκατος μήκους 20 m εξ ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου που περιείχε 6 % χαλκό.



Εικόνα 2-5: Η ιστορική εξέλιξη της εφαρμογής του αλουμινίου στη ναυπηγική

Οι ανεπαρκείς όμως, μέθοδοι ανέγερσης κατασκευών από αλουμίνιο κατέστησε το υλικό αυτό πολύ δύσχρηστο, με αποτέλεσμα την εγκατάλειψή του ως ναυπηγικού υλικού, μαζί με τον σίδηρο, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1920 παρατηρείται επάνοδος και μεγαλύτερη εξάπλωση του αλουμινίου στη ναυπηγική, τόσο για εμπορικές όσο και

για στρατιωτικές εφαρμογές, κάτι που οφείλεται σε νέες εξελίξεις στην τεχνολογία παραγωγής του, που είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της μηχανικής αντοχής τους και της αντοχής τους σε διάβρωση, αλλά και στην ανάπτυξη της απαιτούμενης τεχνογνωσίας. Λίγο αργότερα, η εφεύρεση της μεθόδου συγκόλλησης με τόξο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) δημιουργεί όλες τις προϋποθέσεις για την ανέγερση συγκολλητών κατασκευών από αλουμίνιο.

Σημαντικότερη εφαρμογή βρήκε το αλουμίνιο στην ανέγερση υπερκατασκευών και υπερστεγασμάτων τόσο σε πολεμικά όσο και σε εμπορικά πλοία. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, ενώ το 1940 υπήρχαν περί τα 100 πολεμικά σκάφη με αλουμινένιες υπερκατασκευές, το 1960 πάνω από 1.000 εμπορικά πλοία είχαν σημαντικές ποσότητες αλουμινίου στις υπερκατασκευές τους.

Κράματα αλουμινίου έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί σε τμήματα υποβρυχίων, με σκοπό τη μείωση του βάρους τους, και την αύξηση της ταχύτητάς τους και της ακτίνας ενεργείας τους. Σημειώνεται ακόμη ότι το 1965 ναυπηγήθηκε το ALUMINAUT, καταδυτικό σκάφος μεγάλων βαθών (deep submergence vehicle), εξ ολοκλήρου από το κράμα αλουμινίου 7079-T6. Το κυλινδρικής μορφής αυτό σκάφος είχε μήκος 15 m, εσωτερική διάμετρο 2 m και είχε δυνατότητα κατάδυσης μέχρι βάθους 4.900 m.

Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές του αλουμινίου στη ναυπηγική τα τελευταία χρόνια αποτέλεσαν και οι μεγάλες σφαιρικές δεξαμενές των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου αερίου (Liquefied Natural Gas, LNG), Εικόνα 2-6.



Εικόνα 2-6: Εφαρμογή των κραμάτων αλουμινίου στην κατασκευή των σφαιρικών δεξαμενών πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου αερίου (LNG)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι σφαιρικές δεξαμενές των πλοίων LNG μεταφορικής ικανότητας 125.000 m^3 , που ναυπηγήθηκαν από την General Dynamics, Η.Π.Α το 1977. Κάθε μία από τις πέντε δεξαμενές των πλοίων αυτών έχει διάμετρο 36.6m και είναι κατασκευασμένη από το ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 5083.

Οι σημαντικότερες άλλες πρόσφατες εφαρμογές κραμάτων αλουμινίου στη ναυπηγική, περιλαμβάνουν τη μεταλλική κατασκευή υδροπτερυγίων (hydrofoils), αμφίβιων πλοίων (hovercrafts), ναρκαλιευτικών (minesweepers), κανονιοφόρων (gunboats), σκαφών αναψυχής (leisure craft), αλιευτικών (fishing boats), σκαφών μεταφοράς προσωπικού (passenger ships) και εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου (offshore platforms), Εικόνα 2-7.



Εικόνα 2-7: Εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου κατασκευασμένη από κράματα αλουμινίου

2.6 Γενικές Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά των Κραμάτων Αλουμινίου για Ναυπηγική Χρήση

Η σύγχρονη απαίτηση για γρήγορα θαλάσσια μέσα μεταφοράς τόσο για εμπορικές όσο και για στρατιωτικές εφαρμογές έχει αναδείξει την ανάγκη για χρήση ελαφρύτερων υλικών κατασκευής τα οποία εξασφαλίζουν μια σειρά πλεονεκτημάτων που οφείλονται στον κατάλληλο συνδυασμό πολύ χρήσιμων επιθυμητών ιδιοτήτων τους.

Το κύριο χαρακτηριστικό των κραμάτων αλουμινίου, που είναι η υψηλή τιμή του λόγου αντοχής προς βάρος, το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό υλικό για χρήση σε σκάφη υψηλών επιδόσεων. Οι περισσότερες εφαρμογές του αλουμινίου οφείλονται

στη μικρή του πυκνότητα (0.16 kg/m^3) και στη σχετικά υψηλή αντοχή των κραμάτων του. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η πολύ καλή αντίσταση σε διάβρωση, η καλή επεξεργασιμότητά του, η υψηλή ηλεκτρική και θερμική του αγωγιμότητα και η υψηλή του δυσθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για τη χρήση του αλουμινίου πρέπει να λαμβάνεται όμως υπόψη το χαμηλό μέτρο ελαστικότητάς του ($69 \times 10^3 \text{ MPa}$), καθώς και ο υψηλός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ($2.3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$).

Το αλουμίνιο και τα κράματά του γενικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της γάστρας, στις υπερκατασκευές – υπερστεγάσματα, στα καλύμματα των στομιών κυτών εμπορικών πλοίων, πτυσσόμενες γέφυρες, καθώς επίσης και για τον εξοπλισμό του πλοίου όπως διαφόρων ειδών σκάλες, κάγκελα, κιγκλιδώματα, πόρτες και παράθυρα, καθώς και κατασκευές πυρασφάλειας και πολλές άλλες εφαρμογές. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα από τη χρήση του αλουμινίου και των κραμάτων του, ακόμα και σε συγκολλητές κατασκευές, είναι η εξοικονόμηση βάρους σε σχέση με τον χάλυβα που μπορεί να φτάσει ακόμα και το 55 – 67 % για κατασκευές με τις ίδιες απαιτήσεις όσον αφορά στην αντοχή. Ακόμα και αν αντισταθμίσουμε το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου έτσι ώστε η κατασκευή να συμπεριφέρεται σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια, ακόμα και τότε παρατηρείται, σχετικά μικρότερη όμως, εξοικονόμηση βάρους.

Η χρήση του αλουμινίου αυξάνει την ταχύτητα και το μέγεθος του σκάφους μειώνοντας το βάρος του, γεγονός που επιφέρει οφέλη όσον αφορά στην οικονομία στην κατανάλωση καυσίμων, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει την ικανότητα πλευσης, την ασφάλεια και την αξιοπιστία. Η επιλογή κατάλληλων κραμάτων αλουμινίου οδηγεί στη μείωση των απαιτήσεων και των εξόδων συντήρησης λόγω της πολύ καλής αντίστασης σε διάβρωση που έχουν όταν βρίσκονται εκτεθειμένα στο φυσικό περιβάλλον και ιδιαίτερα το θαλάσσιο.

Η εξοικονόμηση βάρους από τη χρήση του αλουμινίου στη γάστρα των πλοίων μπορεί να φτάσει το 35 – 45 % και στις υπερκατασκευές το 55 – 67 % συγκριτικά με το χάλυβα. Το αλουμίνιο είναι αναγνωρισμένο και συμφωνεί με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί από το «High Speed Code of the International Maritime Organization», για τον σχεδιασμό των πλοίων, την ασφάλεια, και τον έλεγχο σε περίπτωση πυρκαγιάς. Επίσης, η συμπεριφορά του σε καταστάσεις στρεπτικής, καμπτικής και θλιπτικής φόρτισης αλλά και κρουστικών φορτίων κατά την πλευση με μεγάλες ταχύτητες είναι αν όχι εξίσου καλές, καλύτερες με τις αντίστοιχες του χάλυβα.



Εικόνα 2-8: Εφαρμογές των κραμάτων αλουμινίου στην ναυπηγική

Το αλουμίνιο δίνει στους σχεδιαστές τη δυνατότητα να δημιουργούν από τις πιο απλές μέχρι τις πιο πολύπλοκες κατασκευές εύκολα και γρήγορα λόγω της πολύ καλής επεξεργασιμότητας που επιδεικνύει. Μπορεί να συνδεθεί και να ενσωματωθεί εύκολα χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία από ενδεδειγμένες μηχανικές μεθόδους και η συγκόλλησή του γίνεται τρεις φορές γρηγορότερα από τον χάλυβα, με πολύ οικονομικότερες τεχνικές συγκόλλησης.

2.6.1 Τα κράματα του αλουμινίου

Το αλουμίνιο ανήκει στην κατηγορία των ελαφρών μετάλλων, των μετάλλων, δηλαδή, των οποίων η πυκνότητα έχει χαμηλές τιμές. Η σημασία τους για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη, διότι τα μέταλλα αυτά, καθώς και τα κράματά τους, παρουσιάζουν υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας E / ρ και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή σ_{TS} / ρ , σε σχέση με τα άλλα μέταλλα και κράματα.

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνον από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί, κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Έχει επίσης καλή αντοχή σε διάβρωση, λόγω της μεγάλης χημικής συγγένειας με το οξυγόνο και αν αφεθεί στον αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό επιφανειακό και συνεχές στρώμα το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία.

Τα κράματα του αλουμινίου, διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθουμένη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κυρίες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος.

Η επίδραση των προσθηκών στις ιδιότητες του αλουμινίου φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1

ΚΥΡΙΕΣ ΠΡΟΣΘΗΚΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ	
ΠΡΟΣΘΗΚΗ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
ΧΑΛΚΟΣ	Σε ποσοστό έως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
ΣΙΔΗΡΟΣ	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα και ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
ΜΑΓΓΑΝΙΟ	Βελτιώνει την ολκιμότητα και σε συνδυασμό με το σίδηρο τη χυτευσιμότητα.
ΜΑΓΝΗΣΙΟ	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
ΠΥΡΙΤΙΟ	Βελτιώνει, κατά πολύ, τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ	Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.

2.6.2 Ονοματολογία και σύστημα προσδιορισμού των κραμάτων αλουμινίου (Designation System)

Το καθαρό αλουμίνιο κραματοποιείται εύκολα με πολλά άλλα μέταλλα, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα επίτευξης μεγάλης ποικιλίας φυσικών και μηχανικών

ιδιοτήτων. Τα κράματα του αλουμινίου επιδεικνύουν καλύτερα μηχανουργικά χαρακτηριστικά και μηχανικές ιδιότητες από το καθαρό αλουμίνιο και γι' αυτό η χρήση τους είναι πιο διαδεδομένη. Τα κράματα αλουμινίου διαίρονται σε δύο κατηγορίες που κάθε μία έχει το δικό της σύστημα ονοματολογίας :

- (i) κράματα διαμόρφωσης και
- (ii) κράματα χύτευσης.

Για την εύκολη κατάταξη των διαφόρων κραμάτων, η Aluminum Association A.A. (Η.Π.Α.), χρησιμοποιεί ένα σύστημα που αποτελείται από τέσσερα αριθμητικά ψηφία με τα ακόλουθα ενδεικτικά :

1ο ψηφίο	=	Κύριο Συστατικό
2ο ψηφίο	=	Χαρακτηριστικό Παραλλαγής
3ο και 4ο ψηφίο	=	Διακριτικό Συγκεκριμένου Κράματος

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Aluminum Association, αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερις αριθμούς, των οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράμα διαμόρφωσης ή για κράμα χύτευσης :

A.) Κράματα Διαμόρφωσης του Αλουμινίου

Στη περίπτωση των κραμάτων διαμόρφωσης, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης (Πίνακας 1.2). Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί στην περίπτωση της σειράς 1xxx, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99 %, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2

Κωδικοποίηση κατά το σύστημα Α.Α. των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης	
ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1xxx	Αλουμίνιο Ελάχιστης Καθαρότητας 99 % (Al)
2xxx	Χαλκός (Cu)
3xxx	Μαγγάνιο (Mn)
4xxx	Πυρίτιο (Si)
5xxx	Μαγνήσιο (Mg)
6xxx	Μαγνήσιο και Πυρίτιο (Mg₂Si)
7xxx	Ψευδάργυρος (Zn)
8xxx	Άλλα Στοιχεία
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

B.) Κράματα Χύτευσης του Αλουμινίου

Στη περίπτωση των κραμάτων χύτευσης, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει επίσης, το κύριο στοιχείο προσθήκης (Πίνακας 1.3). Ο δεύτερος και τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης.

Με 0 υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατευθείαν χύτευση, ενώ με 1 υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό.

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας, τόσο για τα κράματα διαμόρφωσης, όσο και για τα κράματα χύτευσης αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, την οποία έχουν υποστεί.

Για παράδειγμα, το 1060 - H14 είναι αλουμίνιο καθαρότητας 99.60 %, το οποίο έχει υποστεί μόνο ενδοτράχυνση, η οποία έχει οδηγήσει σε αύξηση της σκληρότητάς του κατά 50 %.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3

Κωδικοποίηση κατά το σύστημα Α.Α. των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης	
ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1xx.x	Αλουμίνιο Ελάχιστης Καθαρότητας 99 % (Al)
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
9xx.x	Άλλα Στοιχεία

2.6.3 Κατεργασμένα ή μη κράματα αλουμινίου

Το καθαρό αλουμίνιο είναι πολύ μαλακό και όλκιμο. Στις περισσότερες όμως πρακτικές εφαρμογές απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή. Αυτό επιτυγχάνεται καταρχήν με την προσθήκη άλλων στοιχείων για την παρασκευή διαφόρων κραμάτων. Περαιτέρω αύξηση της αντοχής επιτυγχάνεται με διαφόρων ειδών κατεργασίες, θερμικές ή όχι.

Έτσι, πέρα από τον διαχωρισμό των κραμάτων αλουμινίου σε κράματα διαμόρφωσης και κράματα χύτευσης, κατατάσσονται και ανάλογα με το αν έχουν υποστεί ή όχι θερμική κατεργασία.

Α) Μη Θερμικά Κατεργασμένα Κράματα

Η αύξηση της αντοχής στα κράματα της κατηγορίας αυτής οφείλεται στην ύπαρξη στοιχείων, όπως μαγνήσιο, πυρίτιο, μαγγάνιο και σίδηρος, μόνων τους ή σε συνδυασμό. Τα κράματα αυτά ανήκουν στις σειρές 1000, 3000, 4000 και 5000. Περαιτέρω αύξηση της αντοχής τους είναι δυνατή με την εφαρμογή κατεργασίας διαμόρφωσης εν ψυχρώ (cold working), που συνίσταται σε πλαστική παραμόρφωση

σε τέτοια θερμοκρασία και με τέτοιο ρυθμό ώστε να προκληθεί ενδοτράχυνση (strain hardening).

Σημειώνεται, ότι στα κράματα που περιέχουν σημαντικό ποσοστό μαγνησίου, την κατεργασία αυτή ακολουθεί συνήθως μια κατεργασία σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία, καλούμενη σταθεροποιητική (stabilizing) με σκοπό τη σταθεροποίηση των ιδιοτήτων.

B) Θερμικά Κατεργασμένα Κράματα

Πρόκειται για κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000. Η βασική αντοχή των κραμάτων αυτών οφείλεται στην ύπαρξη στοιχείων, όπως χαλκός, μαγνήσιο, ψευδάργυρος και πυρίτιο. Επειδή τα στοιχεία αυτά, μόνα τους ή σε συνδυασμούς, αυξάνουν την ικανότητά τους να διαλύονται στο αλουμίνιο με αύξηση της θερμοκρασίας, είναι δυνατό να υποβληθούν σε θερμικές κατεργασίες που αυξάνουν την αντοχή τους.

Το πρώτο βήμα στη θερμική κατεργασία, καλούμενο κατεργασία διαλυτοποίησης ή υπερβαφή (solution heat treatment), συνίσταται σε θέρμανση του κράματος σε κατάλληλη θερμοκρασία και για αρκετό χρονικό διάστημα, με σκοπό την τοποθέτηση των διαλυτών στοιχείων σε στερεό διάλυμα. Αυτό ακολουθείται από γρήγορη βαφή (quenching), συνήθως σε νερό, η οποία προσωρινά «παγώνει» τη μεταλλουργική δομή που έχει σχηματιστεί (υπερκεκορεσμένο διάλυμα), κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασιμότητα του υλικού για σύντομο χρονικό διάστημα. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή υψηλότερη, η κατάσταση αυτή μετά την βαφή δεν είναι σταθερή, οπότε αρχίζει κατακρήμνιση (precipitation) των συστατικών. Μετά την πάροδο αρκετών ημερών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, διαδικασία που καλείται γήρανση (aging), το κράμα είναι πλέον σημαντικά ισχυρότερο από άποψη αντοχής. Μερικά κράματα φτάνουν σε κατάσταση ισορροπίας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, άλλα όμως, και ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν μαγνήσιο και πυρίτιο ή μαγνήσιο και ψευδάργυρο, συνεχίζουν να σκληρύνονται με γήρανση (age hardening) επί μεγάλα χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Είναι δυνατή η περαιτέρω αύξηση της αντοχής και σταθεροποίηση των ιδιοτήτων με θέρμανση για ελεγχόμενο χρονικό διάστημα σε σχετικά υψηλές

θερμοκρασίες. Η διαδικασία αυτή καλείται τεχνητή γήρανση (artificial aging) ή σκλήρυνση με κατακρήμνιση (precipitation hardening).

Με κατάλληλο συνδυασμό των διαδικασιών θερμικής κατεργασίας διαλυτοποίησης, βαφής, διαμόρφωσης εν ψυχρώ και τεχνητής γήρανσης είναι δυνατή η παρασκευή κραμάτων πολύ μεγάλης αντοχής.

Για τη διευκόλυνση των χρηστών των κραμάτων αλουμινίου, το τετραψήφιο χαρακτηριστικό κάθε κράματος που αναφέρθηκε πριν συνοδεύεται από ένα γράμμα και από ένα έως τρία ψηφία, όπου απαιτείται, τα οποία υποδηλώνουν την ακολουθία των κατεργασιών θερμικών ή όχι που υπέστη το κράμα με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του. Η επεξήγηση των χρησιμοποιούμενων συμβολισμών του συστήματος χαρακτηρισμού κατεργασιών των κραμάτων αλουμινίου, δίνεται στον Πίνακα Α.1 του Παραρτήματος Α.

2.6.4 Επίδραση των στοιχείων πρόσμιξης στις ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου – Κατάταξη τους σε σειρές

Οι σειρές κραμάτων αλουμινίου που προκύπτουν όπως περιγράψαμε παραπάνω με τον τρόπο προσδιορισμού και ονομασίας τους σύμφωνα με την Α.Α., μαζί με το κυριότερο στοιχείο του κράματος, παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Α) ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Τα κράματα διαμόρφωσης, μέσω της διαδικασίας της εξέλασης είναι διαθέσιμα σε πολλά τυποποιημένα σχήματα και μορφές κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές.

➤ Σειρά 1000:

Τα κράματα αυτής της σειράς είναι καθαρότητας τουλάχιστον 99 % Al και έχουν πολλές εφαρμογές. Χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντίσταση σε διαβρωτικό περιβάλλον (υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα), υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλη ευκολία διαμόρφωσης. Αντίθετα με τα παραπάνω έχουν χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Μικρή αύξηση της αντοχής τους επιτυγχάνεται με ενδοτράχυνση. Ο σίδηρος και το πυρίτιο αποτελούν τις σημαντικότερες ακαθαρσίες, σε συνολικό ποσοστό έως 1 %.

➤ **Σειρά 2000:**

Ο χαλκός αποτελεί την κύρια πρόσμιξη στα κράματα της σειράς αυτής, τα οποία απαιτούν θερμική κατεργασία υπερβαφής για να αποκτήσουν τις βέλτιστες ιδιότητές τους. Μετά την κατεργασία αυτή οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι ίδιες ή και καλύτερες από εκείνες του μαλακού χάλυβα. Περαιτέρω αύξηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι δυνατή με τεχνητή γήρανση, κάτι όμως που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ολκιμότητάς τους. Τα κράματα της σειράς 2000 δεν έχουν τόσο καλές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες όσο τα άλλα κράματα αλουμινίου. Το κράμα 2024 – T6 είναι το γνωστότερο και περισσότερο χρησιμοποιούμενο κράμα αλουμινίου στην αεροναυπηγική βιομηχανία.

➤ **Σειρά 3000:**

Το μαγγάνιο αποτελεί την κύρια πρόσμιξη στα κράματα της σειράς αυτής, τα οποία γενικά είναι μη θερμικά κατεργάσιμα. Τα κράματα Al – Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Επειδή, όμως, το μέγιστο ποσοστό πρόσμιξης μαγγανίου σε αλουμίνιο δεν μπορεί να ξεπεράσει το 1.5 %, η σειρά αυτή δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Εξαιρεση αποτελεί το δημοφιλές κράμα 3003 που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευχέρεια διαμόρφωσης του υλικού και όχι υψηλή αντοχή. Επίσης, συχνά αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1000, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

➤ **Σειρά 4000:**

Το κύριο πρόσθετο στοιχείο στη σειρά αυτή είναι το πυρίτιο, το οποίο είναι δυνατό να προστεθεί σε αρκετή ποσότητα, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της θερμοκρασίας τήξης χωρίς ταυτόχρονη αύξηση της ψαθυρότητας των δημιουργούμενων κραμάτων. Για τον λόγο αυτό κράματα Al – Si χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υλικών εναπόθεσης σε συγκολλήσεις. Τα περισσότερα κράματα της σειράς αυτής δεν υπόκεινται σε θερμική κατεργασία. Όταν, όμως, χρησιμοποιούνται για συγκόλληση κραμάτων που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία, απορροφούν ποσότητες στοιχείων που βρίσκονται στα τελευταία, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα περιορισμένης θερμικής κατεργασίας.

➤ **Σειρά 5000:**

Το μαγνήσιο, σε ποσοστά μικρότερα του 4 %, αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο για κραματοποίηση με το αλουμίνιο. Όταν χρησιμοποιείται ως το κύριο στοιχείο κραματοποίησης ή σε συνδυασμό με το μαγγάνιο, οδηγεί στη δημιουργία κράματος μέσης έως υψηλής αντοχής, το οποίο δεν επιδέχεται θερμική κατεργασία. Τα κράματα της σειράς αυτής παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά συγκολλητότητας και υψηλή αντοχή στο θαλασσίνο διαβρωτικό περιβάλλον, ενώ παρουσιάζουν και επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση.

➤ **Σειρά 6000:**

Τα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν τα στοιχεία πυρίτιο και μαγνήσιο (Al – Mg – Si) σε ποσοστά που να κάνουν δυνατή τη δημιουργία Mg_2Si , έτσι ώστε να είναι επιτρεπτή η θερμική τους κατεργασία. Ένα από τα σημαντικότερα κράματα της σειράς αυτής, με ευρείες εφαρμογές, είναι το 6061. Αν και τα κράματα της σειράς 6000 έχουν μικρότερη αντοχή από εκείνα των σειρών 2000 και 7000, διαθέτουν καλές ιδιότητες κατεργασιμότητας και παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Τέλος, τα κράματα της σειράς 6000 μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, συγχρόνως δε, παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους 150 °C.

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής, περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0.8 %, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0.3 %. Αυτές οι προσθήκες συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της δυσθραυστότητας. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει επίσης τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμένει μικρότερο του 0.5 %, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση που προκαλεί.

➤ **Σειρά 7000:**

Ο ψευδάργυρος αποτελεί το κυριότερο στοιχείο στα κράματα της σειράς αυτής, ο οποίος, σε συνδυασμό με μικρό ποσοστό μαγνησίου (Al – Zn – Mg) οδηγεί σε επίτευξη πολύ υψηλής αντοχής και δυνατότητα θερμικής κατεργασίας. Μετά από τις κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες

απ' όλα τα κράματα του αλουμινίου. Το κυριότερο, όμως, μειονέκτημα των κραμάτων αυτής της σειράς είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι, η θερμοκρασία χρήσης τους πρέπει να παραμένει χαμηλή έως 120 °C.

Ο σημαντικότερος εκπρόσωπος της σειράς αυτής είναι το κράμα 7075 το οποίο είναι από τα ισχυρότερα υπάρχοντα κράματα και χρησιμοποιείται στην αεροναυπηγική, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται πολύ υψηλές καταπονήσεις και όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή και αντοχή σε διάβρωση.

B) ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά ενός κράματος χύτευσης διαφέρουν από εκείνα των κραμάτων διαμόρφωσης. Τα χυτά εξαρτήματα έχουν οριστική και καθορισμένη μορφή και δεν υφίστανται πλέον καμία πλαστική παραμόρφωση.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι :

- η καλή χυτευσιμότητα,
- η απουσία ρωγματώσεων,
- η ομοιογενής κατανομή του πορώδους, ατέλειες που μπορεί να προκληθούν λόγω της συστολής του μετάλλου κατά τη στερεοποίηση,
- η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων,
- η καλή αντοχή εν θερμώ, και
- η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Επίσης, τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης, απ' ότι τα κράματα διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά επιδρούν στη μείωση των θερμοκρασιών χύτευσης.

Τα κυριότερα κράματα χύτευσης του αλουμινίου είναι :

- **Κράματα αλουμινίου της σειράς 2xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al – Cu, τα οποία χρησιμοποιούνται, πλέον, σπάνια, λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής σε διάβρωση.

➤ **Κράματα αλουμινίου της σειράς 3xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al – Si, κράματα Al – Si – Mg και κράματα Al – Si – Cu. Τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα είναι τα πρώτα. Αυτά περιέχουν πυρίτιο, σε ποσοστό 5 – 20 %. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Προσθήκη Mg, σε ποσοστό 0.3 – 1 % ή Cu, σε ποσοστό 3 – 5 %, βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Al – Si.

➤ **Κράματα αλουμινίου της σειράς 5xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al – Mg. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον, στην ατμόσφαιρα ή μέσα σε θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα.

➤ **Κράματα αλουμινίου της σειράς 7xx.x**

Πρόκειται για κράματα Al – Zn και κράματα Al – Zn – Mg. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Επιπλέον, υφίστανται φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από 1 μέχρι 2 μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης λίγο επηρεάζει τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.

2.7 Η Εφαρμογή των Κραμάτων Αλουμινίου στην Ναυπηγική

Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σήμερα στη ναυπηγική είναι κυρίως αυτά των σειρών 5000 και 6000.

Τα κυριότερα κράματα από τη σειρά 5000, που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία, είναι τα 5052, 5083, 5086, 5454 και 5456. Εάν αναμένονται υπηρεσιακές θερμοκρασίες υψηλότερες των 65 °C, συνιστάται η χρήση του κράματος 5454 για αποφυγή του φαινομένου της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση (stress corrosion cracking), φαινόμενο που παρατηρείται συνήθως σε κράματα αλουμινίου με υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο.

Από τα κράματα αλουμινίου που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία, το 6061 είναι αυτό που χρησιμοποιείται κύρια στη ναυπηγική. Με αυτό κατασκευάζονται οι διάφοροι μορφοδοκοί που χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά των ελασμάτων.

Τα κράματα 5086, 5083, και 5456 στην κατεργασία H116 είναι τα κυριότερα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου ή άλλων ναυπηγικών κατασκευών. Από αυτά, το κράμα 5086 συνιστάται όπου απαιτούνται μέσα επίπεδα αντοχής, χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, καλή συγκολλητότητα και καλά χαρακτηριστικά αντοχής σε διάβρωση και κατεργασιμότητα. Τυπικές εφαρμογές του είναι στη γάστρα, στο κατάστρωμα, στις φρακτές και σε ιστούς, πύργους, δεξαμενές και παρόμοιες κατασκευές.

Οι πρώτες εφαρμογές του αλουμινίου ήταν σε ταχύπλοα σκάφη, μικρά σκάφη αναψυχής και μικρές θαλαμηγούς μήκους μέχρι τα 6 m, γεγονός που το καθιστά σήμερα στον τομέα αυτό το κυρίαρχο κατασκευαστικό υλικό. Τέτοιου τύπου σκάφη, στα οποία πρωτεύοντα ρόλο παίζει ο μοντέρνος σχεδιασμός, κατασκευάζονται από ένα μεγάλο εύρος κραμάτων αλουμινίου, κυρίως των σειρών 5xxx και 6xxx, τα οποία χαρακτηρίζονται από τον ιδανικό συνδυασμό αντοχής, κόστους, ευκολίας στην κατασκευή και αντίστασης σε διάβρωση.



Εικόνα 2-9: Ταχύπλοα σκάφη υψηλών επιδόσεων με μονή γάστρα κατασκευάζονται κυρίως από τα κράματα αλουμινίου 5052 – H32, 5052 – H34, 5083, 5086, 5454, 5456, 5383-H113/H321 και 6061 – T6, 6061 – T4

Γενικά, μικρού μεγέθους γάστρες πλοίων κατασκευάζονται από τα κράματα 5052 – H32, 5052 – H34, 5083, 5383-H113/H321 και 6061 – T6, 6061 – T4. Επίσης τα κράματα αλουμινίου ενδείκνυνται για την κατασκευή και μεγαλύτερων σκαφών παρόμοιου τύπου, μήκους από 6 έως 38 m, στα οποία χρησιμοποιούνται

συγκολλήσεις για την κατασκευή της γάστρας και των εσωτερικών χώρων. Το πιο δημοφιλές κράμα αλουμινίου για την κατασκευή της γάστρας είναι το 5086 – H32, πάχους 4.5 έως 12.7 mm, ενώ και οι φρακτές, οι δεξαμενές καυσίμων και οι καμπίνες του πλοίου κατασκευάζονται συνήθως από το ίδιο κράμα, αλλά και από τα κράματα 5052 και 6061. Πολλά κατασκευαστικά τμήματα σε συγκολλητές κατασκευές, εξελασμένα σε διάφορα σχήματα είναι από κράματα 6061 – T6 ή 5086 – H112.

Τα ιστιοπλοϊκά σκάφη κατασκευάζονται επίσης από κράματα αλουμινίου, όπου τα 5052 ή 6061 χρησιμοποιούνται για καρφωτές κατασκευές μικρότερων ιστιοπλοϊκών σκαφών και το 5086 για συγκολλητές κατασκευές μεγάλων yacht. Το μικρό βάρος της αλουμινένιας γάστρας των ιστιοπλοϊκών σκαφών επιτρέπει στον σχεδιαστή να πειραματιστεί, βρίσκοντας την ισορροπία ανάμεσα στην κατάσταση πλεύσης με τον άνεμο και στην αναλογία έρματος – εκτοπίσματος. Επίσης, ο εξοπλισμός των αλιευτικών σκαφών είναι συνήθως από τα κράματα αλουμινίου 6061 – T6 ή 6063 – T6.

Τα κράματα 5083 και 5456 συνιστώνται όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές, υψηλότερη περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, καλή συγκολλητότητα, εξαιρετικές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες και μέτρια κατεργασιμότητα. Τυπικές εφαρμογές τους περιλαμβάνουν κατασκευές που απαιτούν πολύ υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, π.χ. γάστρες υδροπτερυγίων (hydrofoils), αμφίβια σκάφη (hovercrafts), Εικόνα 2-10.



Εικόνα 2-10: Το τριμαράν "Benchijigua Express", είναι μέχρι σήμερα το μεγαλύτερο εμπορικό πλοίο στον κόσμο κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο, με μήκος 126.7 m και ταχύτητα 40.5 knots. Κατασκευάστηκε και παραδόθηκε το 2005 από την εταιρία Austal

Τα υδροπτέρυγα είναι σύγχρονα επιβατηγά ταχύπλοα πλοία μεγάλων διαστάσεων που χρησιμοποιούνται για καθημερινά ταξίδια και τα οποία κατασκευάζονται κυρίως από κράματα αλουμινίου τύπου 6061.

Μικρότερα τέτοιου τύπου σκάφη κατασκευάζονται, επίσης, από αλουμίνιο, το οποίο είναι το αποδεκτό υλικό όχι μόνο για την κατασκευή της γάστρας αλλά και για άλλες εφαρμογές σε μορφή ελασμάτων χυτών κραμάτων αλουμινίου 356 – T6 και κραμάτων διαμόρφωσης 6061 – T 6.

Το αλουμίνιο είναι το υλικό που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε μεγάλες ποσότητες στις υπερκατασκευές και στον εξοπλισμό των επιβατηγών πλοίων. Έτσι, οι υπερκατασκευές που προκύπτουν είναι ελαφρότερες και επιτρέπουν τη μείωση των ενισχυτικών και των δοκών στήριξής τους στη γάστρα, κάτι που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής της γάστρας και μικρότερη απαιτούμενη ισχύ πρόωσης, διατηρώντας ταυτόχρονα την ικανότητα ανάπτυξης μεγάλων ταχυτήτων στο ταξίδι, κάτι που είναι απαραίτητο στις σύγχρονες και μοντέρνες θαλάσσιες μεταφορές.

Μεγάλες ευρωπαϊκές εταιρείες σχεδιάζουν και κατασκευάζουν τα πλοία τους χρησιμοποιώντας σε πολύ μεγάλο βαθμό αλουμίνιο στις υπερκατασκευές και τον εξοπλισμό τους, που αγγίζει τους 1000 έως 2000 τόννους ανά πλοίο. Οι αλουμινένιες κατασκευές ζυγίζουν μόνο το 40 % απ' όσο οι αντίστοιχες από χάλυβα, με πανομοιότυπες κατασκευαστικές λεπτομέρειες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε χαλύβδινες κατασκευές (συγκολλητά ελάσματα, ενισχυτικά μπρακέτα στα καταστρώματα). Ιδιαίτερα τα φορτηγά πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην αποκομίζουν άμεσα οφέλη από τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής με τη δυνατότητα μεταφοράς περισσότερου πρόσθετου φορτίου.

Η χημική σύσταση μερικών κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγική χρήση φαίνεται στον Πίνακα Α.2 (Παράρτημα Α). Στους Πίνακες Α.3 και Α.4 (Παράρτημα Α), αναγράφονται οι μηχανικές ιδιότητες των ίδιων κραμάτων αλουμινίου για διάφορες θερμικές κατεργασίες.

Σημειώνεται ότι οι ιδιότητες που αναγράφονται στους Πίνακες Α.3 και Α.4 αναφέρονται στις περιοχές του βασικού μετάλλου μακριά από την συγκόλληση. Στην περιοχή της συγκόλλησης, οι ιδιότητες αυτές χειροτερεύουν.

Συγκεκριμένα, για τα κράματα της σειράς 5000, η θερμότητα της συγκόλλησης μετασχηματίζει το βασικό μέταλλο σε κατάσταση που προσομοιάζει, με την ανοπτημένη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής στην περιοχή της

συγκόλλησης, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς αντοχής. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται πολύ πιο έντονα στα θερμικά κατεργάσιμα κράματα της σειράς 6000.

2.7.1 Μελέτη αλουμινένιων σκαφών

Η μελέτη και ο σχεδιασμός σκαφών από κράματα αλουμινίου γίνεται σήμερα σύμφωνα με κανονισμούς που έχουν εκδόσει οι διάφοροι Νηογνώμονες. Επειδή, όμως, τα κράματα αλουμινίου έχουν διαφορετικές μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλα κατασκευαστικά υλικά και για την καλύτερη κατανόηση των διαφορών που οι παραπάνω κανονισμοί έχουν σε σχέση με τους αντίστοιχους για χαλύβδινα πλοία, παρατίθενται στα ακόλουθα ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου, που κάθε μελετητής ναυπηγός θα πρέπει να κατέχει.

2.8 Τα Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Κραμάτων Αλουμινίου

Σε σχέση με τον χάλυβα, τα κράματα αλουμινίου προσφέρουν μια σειρά πλεονεκτημάτων που τα καθιστούν κατάλληλα για ναυπηγικές χρήσεις. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι :

- 1) Ελαφρότερη κατασκευή για τις ίδιες απαιτήσεις.
- 2) Μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση χωρίς προστασία.
- 3) Μακρύτερος χρόνος ζωής.
- 4) Ευχέρεια διαμόρφωσης.
- 5) Ευχάριστη όψη.
- 6) Μικρότερο ολικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, με την προϋπόθεση ότι λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες.

Για το τελευταίο αυτό πλεονέκτημα πρέπει να σημειωθεί ότι ισχύει αν στο αρχικό κόστος ανέγερσης, που είναι ασφαλώς πολύ μεγαλύτερο ανά μονάδα βάρους από εκείνο για χαλύβδινα πλοία, προστεθεί η δαπάνη συντήρησης για δέκα τουλάχιστον χρόνια.

Τα παραπάνω δεν σημαίνουν βέβαια, ότι δεν παρουσιάζονται προβλήματα στις ναυπηγικές κατασκευές από κράματα αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου τα οποία απαιτούν μεγάλη προσοχή και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή και τον σχεδιασμό τους. Τα προβλήματα αυτά πρέπει να επιλυθούν πριν θεωρηθεί το αλουμίνιο υλικό κατάλληλο για τη ναυπήγηση μεγάλων πλοίων. Ανάμεσά τους ξεχωρίζουν η συμπεριφορά σε σφυρόκρουση και η αντοχή σε πολυκυκλική και ολιγοκυκλική κόπωση. Συγκρίνοντάς το με τον χάλυβα, το αλουμίνιο είναι περισσότερο επιρρεπές σε θραύση από κόπωση λόγω ρωγμάτωσης (Mazzolani [15]).

Ένα επιπλέον μειονέκτημα των κραμάτων αλουμινίου, σε σύγκριση με τον χάλυβα, είναι το σχετικά χαμηλό σημείο τήξης τους, γύρω στους 535 °C, σαφώς χαμηλότερο από εκείνο του χάλυβα και το γεγονός ότι υφίστανται δραστική μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων με αύξηση της θερμοκρασίας πέρα των 93 °C περίπου. Επομένως, μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται σε χρήσεις κραμάτων αλουμινίου όπου απαιτείται διατήρηση της λειτουργικότητας της κατασκευής και μετά από πιθανή έκθεση σε πυρκαγιά προς αποφυγή πιθανής ανεπιθύμητης συμπεριφοράς.

Συνεπώς τα κράματα αλουμινίου δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν απαιτήσεις κατασκευαστικής αντοχής σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 260 °C και έκθεσής τους πάνω από τους 535 °C. Πιθανά προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν τη χρήση πυρομονωτικών υλικών, ελάττωση όγκου διαμερισμάτων (για μείωση της προσφοράς οξυγόνου για καύση), εγκατάσταση συστημάτων ταχείας ανίχνευσης πυρκαγιάς κλπ.

Σημαντική μείωση των ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου είναι δυνατόν ακόμα να προέλθει από διάβρωση που οφείλεται σε περιπατητικά ρεύματα (stray currents), γειώσεις ηλεκτρικών συστημάτων και διμεταλλικές ενώσεις.

2.9 Μηχανικές Ιδιότητες των Κραμάτων Αλουμινίου

➤ Η ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ:

Ένας γενικός κανόνας για τη σχέση τάσης – παραμόρφωσης $\epsilon = \epsilon(\sigma)$ των κραμάτων αλουμινίου έχει προταθεί από τους Ramberg και Osgood [14] και είναι :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n$$

όπου :

n = ανεξάρτητος συντελεστής, ο οποίος ορίζεται από τον Mazzolani [15] ως

$$n = \frac{\ln 2}{\ln(1+k\chi)} \quad \text{με} \quad k = \frac{\sigma_t - \sigma_y}{10\varepsilon_t} \frac{\sigma_t}{\sigma_y}$$

σ_t : μέγιστη εφελκυστική τάση

σ_y : ελάχιστη τάση διαρροής (0.2 % παραμόρφωση)

ε_t : παραμόρφωση θραύσης

➤ **ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ:**

Το μέγιστο όριο θραύσης και διαρροής των κραμάτων αλουμινίου είναι συγκρίσιμο με εκείνο των κοινών χαλύβων. Πράγματι, τα περισσότερα κράματα αλουμινίου της σειράς 5000 έχουν όριο θραύσης της τάξης των 214 με 434 MPa (31 με 63 ksi), έναντι 400 με 490 MPa (58 με 71 ksi) για τους περισσότερους ναυπηγικούς χάλυβες. Για το ίδιο βάρος, όμως, τα κράματα αλουμινίου έχουν μεγαλύτερη αντοχή.

Στον Πίνακα Α.5 (Παράρτημα Α) παρουσιάζεται σύγκριση της μηχανικής αντοχής και του βάρους διαφόρων ναυπηγικών υλικών.

➤ **ΒΑΡΟΣ:**

Η πυκνότητα των κραμάτων αλουμινίου (περίπου 2.7 g/cm³) είναι ίση προς το ένα τρίτο εκείνης του χάλυβα. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι μια κατασκευή από αλουμίνιο που εκπληρώνει τους ίδιους σκοπούς με μια άλλη αντίστοιχη από χάλυβα θα έχει βάρος τρεις φορές μικρότερο. Ένας γενικός εμπειρικός κανόνας είναι ότι ο λόγος βαρών θα πλησιάζει το ένα δεύτερο.

➤ **ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ / ΒΑΡΟΥΣ:**

Η σχετικά υψηλή αντοχή των κραμάτων αλουμινίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή τους πυκνότητα τα καθιστούν κατάλληλα έτσι ώστε σε πολλές περιπτώσεις

να αντικαθιστούν άλλα βαριά μέταλλα, όπου αυτό είναι απαραίτητο, χωρίς μείωση αλλά μάλλον με αύξηση της ικανότητας της κατασκευής να φέρει παρόμοια φορτία.

➤ **ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ:**

Τα κράματα αλουμινίου έχουν μεγαλύτερη ευκαμψία από τον χάλυβα και μπορούν να απορροφήσουν παραμορφούμενα τρεις φορές περισσότερη ενέργεια απ' αυτόν, δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι ίσο προς το 1/3 εκείνου του χάλυβα. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι πλεονέκτημα ή μειονέκτημα, ανάλογα με την περίπτωση.

Από τη μια πλευρά, το μικρό μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων αλουμινίου συμβάλλει στην αποφυγή αρμών (expansion joints) στη σύνδεση των υπερκατασκευών με το κατάστρωμα. Ακόμα, το μικρό μέτρο ελαστικότητας δίνει στα κράματα αλουμινίου κάποια υπεροχή έναντι του χάλυβα στην περίπτωση κρουστικών φορτίων, όπου η μεγαλύτερη παραμόρφωση που δημιουργείται επιτρέπει την απορρόφηση μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, το μικρό μέτρο ελαστικότητας αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στην περίπτωση που η παραμόρφωση είναι σημαντικό κριτήριο της στατικής μελέτης του σκάφους. Πράγματι, για ίδιες συνθήκες φόρτισης, κατασκευές από κράματα αλουμινίου με ταυτόσημες γεωμετρίες με αντίστοιχες κατασκευές από χάλυβα παρουσιάζουν τρεις φορές μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Στις ναυπηγικές κατασκευές οι παραμορφώσεις αυτές δεν είναι επιτρεπτές. Η γενικά ισχύουσα αντίληψη είναι ότι η υπέρβαση πρέπει να περιορίζεται στο 50 % σε σχέση με τον χάλυβα.

Η παραπάνω ανάπτυξη καθιστά φανερό το γεγονός ότι η ελαστική παραμόρφωση είναι συνήθως ο περιοριστικός παράγοντας σε αλουμινένιες κατασκευές. Πράγματι, αν πληρούνται οι απαιτήσεις της ελαστικής παραμόρφωσης, τότε η ροπή αντίστασης που προκύπτει είναι κανονικά υπερεπαρκής.

Συγκεκριμένα, για την ίδια ελαστική παραμόρφωση το αλουμίνιο απαιτεί τριπλάσια ροπή αδράνειας από εκείνη του χάλυβα για το ίδιο άνοιγμα στήριξης και φόρτισης, όπως προκύπτει από τη σχέση:

$$I_A = I_S \cdot E_S / E_A$$

όπου : I_A = ροπή αδράνειας αλουμινίου, m^4
 I_s = ροπή αδράνειας χάλυβα, m^4
 E_s = μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, MPa
 E_A = μέτρο ελαστικότητας αλουμινίου, MPa.

Για την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση του προβλήματος των μεγάλων παραμορφώσεων το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης προτιμάται σε σκάφη από κράματα αλουμινίου. Άλλες λύσεις που συνηθίζονται είναι η κυψελωτή κατασκευή (honeycomb construction) και η χρήση διελασμένων μορφοδοκών που διαθέτουν μεγάλη ροπή αδράνειας και που μπορούν να παρασκευαστούν εύκολα λόγω της εξαιρετικής ευχέρειας διαμόρφωσης που έχουν τα ναυπηγικά κράματα αλουμινίου.

➤ **ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ:**

Τα κράματα αλουμινίου, και ιδιαίτερα αυτά των σειρών 3xxx, 5xxx και 6xxx, είναι ιδανικά για χρήση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ακόμα και κάτω από τους $0^\circ C$, επειδή η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητά τους είναι το ίδιο υψηλές, ίσως και υψηλότερες από ότι σε θερμοκρασία δωματίου.

➤ **ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ:**

Η αντοχή σε κόπωση πολλών κραμάτων αλουμινίου είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη του χάλυβα.

➤ **ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ:**

Το αλουμίνιο έχει πολύ καλή αντοχή σε διάβρωση, κάτι που οφείλεται στον φυσικό σχηματισμό ενός λεπτού, ισχυρά προσφυόμενου οξειδικού επιφανειακού στρώματος Al_2O_3 . Αν το στρώμα αυτό διασπαστεί για οποιοδήποτε λόγο, τότε σχηματίζεται αμέσως νέο που προστατεύει το βασικό μέταλλο.

Τα κράματα αλουμινίου που είναι περισσότερο ευνοημένα λόγω αυτής τους της ιδιότητας είναι των σειρών 1xxx, 3xxx, 5xxx, και 6xxx και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές στις οποίες έρχονται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό.

Πειράματα έχουν δείξει ότι τα περισσότερα κράματα αλουμινίου εμφανίζουν σε θαλάσσιο περιβάλλον το φαινόμενο της διάβρωσης με βελονισμούς (pitting

corrosion). Το μέσο βάθος των δημιουργούμενων εσοχών είναι 2 με 3 mils σε περίοδο ενός ή δύο ετών. Με αύξηση του χρόνου έκθεσης η διάβρωση συνεχίζεται, αλλά με διαρκώς μειούμενους ρυθμούς αύξησης του βάθους των εσοχών. Έχει αποδειχθεί ότι η αντίσταση διαφόρων κραμάτων αλουμινίου σε αυτού του είδους διάβρωση εξαρτάται πολύ από το είδος της θερμικής ή μη κατεργασίας που έχουν υποστεί.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, το αλουμίνιο σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα και παρουσία ηλεκτρολύτη μπορεί να διαβρωθεί λόγω του σχηματισμού γαλβανικού στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρουσιαστεί στις επιφανειακές ενώσεις αλουμινίου με άλλα μέταλλα όπως στη σύνδεση της αλουμινένιας υπερκατασκευής με χαλύβδινο κατάστρωμα, στις περιοχές από όπου σωληνώσεις άλλων μετάλλων διαπερνούν αλουμινένιες φρακτές, καταστρώματα, κ.ά. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτούνται ειδικές διατάξεις.

Η προστασία του αλουμινίου έναντι γαλβανικής διάβρωσης επιτυγχάνεται βασικά με διαχωρισμό του από τα γειτονικά μέταλλα με χρήση παρεμβυσμάτων και δακτυλίων από μονωτικά υλικά και με προσεκτική εκτέλεση της απαιτούμενης εργασίας.

Μία σχετικά νεότερη μέθοδος για τη σύνδεση της αλουμινένιας υπερκατασκευής ενός σκάφους με το χαλύβδινο κατάστρωμά του βασίζεται στην χρήση μεταβατικών ενώσεων κατασκευασμένων από την εταιρεία DuPont και καλούμενων Detacouple. Το Detacouple αποτελείται από σειρά στρώσεων διαφορετικών υλικών, συνδεδεμένων μεταξύ τους με τη βοήθεια συγκόλλησης με εκρηκτικά (explosive welding).

➤ **ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ:**

Το αλουμίνιο, που έχει εδροκεντρωμένη κυβική ατομική δομή, είναι όλκιμο ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Γενικά, τα κράματα αλουμινίου είναι λιγότερο ευπαθή, σε θραύση κατ' εγκοπή (notch sensitive) σε σχέση με τους περισσότερους χάλυβες. Για τους παραπάνω λόγους οι Νηογνώμονες δεν απαιτούν δοκιμές δυσθραυστότητας (π.χ. δοκιμή Charpy) στα κράματα αλουμινίου για ναυπηγική χρήση.

Από παρατηρήσεις που έχουν γίνει στα επίπεδα ενέργειας σε δοκιμή Charpy V διαφόρων κραμάτων αλουμινίου ως συνάρτηση της αντοχής τους, συμπεραίνονται τα ακόλουθα :

1. Στα κράματα αλουμινίου δεν παρατηρείται δραστική μείωση της απορροφούμενης ενέργειας με τη θερμοκρασία, όπως συμβαίνει στους χάλυβες.
2. Με αύξηση του επιπέδου αντοχής των κραμάτων αλουμινίου παρατηρείται γενικά μείωση της απορροφούμενης ενέργειας.
3. Σε σύγκριση με τον χάλυβα και το τιτάνιο, η απορροφούμενη ενέργεια στα κράματα αλουμινίου είναι σημαντικά χαμηλότερη.

Γενικά, παρατηρείται ότι η δυσθραυστότητα μειώνεται με αύξηση του ορίου διαρροής. Τα κράματα της σειράς 5000 διαθέτουν τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα, ακολουθούμενα από τα κράματα των σειρών 6000, 2000 και 7000.

➤ **ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ:**

Το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι παρότι τήκονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από ότι ο χάλυβας, γύρω στους 535 °C, σε περίπτωση έκθεσής τους στη φωτιά φτάνουν σε υψηλές θερμοκρασίες με χαμηλότερο ρυθμό από τον χάλυβα.

➤ **ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ:**

Το καθαρό αλουμίνιο και μερικά από τα κράματά του έχουν εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.

➤ **ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ:**

Τα κράματα αλουμινίου μπορούν άμεσα και εύκολα να κατεργαστούν με μια ποικιλία από τεχνολογίες κατεργασίας μετάλλων και κυρίως με εξέλαση, μια διαδικασία κατά την οποία αποκτούν οποιοδήποτε σχήμα θέλουμε να τους δώσουμε. Αυτή η ικανότητα έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί το αλουμίνιο να παρασκευαστεί σε μια αξιοσημείωτη ποικιλία σχημάτων και μορφών, ώστε να επιτρέπεται στο μέταλλο να τοποθετηθεί σε σημεία της κατασκευής όπου να μπορεί πολύ αποτελεσματικά να φέρει τα επιβαλλόμενα φορτία.

➤ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΙΜΟΤΗΤΑ:

Το αλουμίνιο και τα κράματα του είναι από τα πιο εύκολα ανακυκλώσιμα κατασκευαστικά υλικά. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του αλουμινίου είναι ότι το αποτέλεσμα της ανακύκλωσής του έχει την ίδια υψηλή ποιότητα με την αρχική, σε αντίθεση με άλλα υλικά τα οποία μετά την ανακύκλωσή τους ξαναχρησιμοποιούνται αλλά σε χαμηλότερης ποιότητας προϊόντα.

2.9.1 Οι ιδιαίτερες συμπεριφορές των κραμάτων αλουμινίου κατά την ανέγερση αλουμινένιων κατασκευών

Κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών χρήσης του αλουμινίου και των κραμάτων του για μεταλλικές κατασκευές επικρατούσε η αντίληψη ότι η κατεργασία του ήταν προβληματική. Με την πείρα, όμως, που αποκτήθηκε σταδιακά και με την εισαγωγή νέων μεθόδων ανέγερσης, η αντίληψη αυτή τείνει σήμερα να ανατραπεί.

Στα παρακάτω γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα κράματα αλουμινίου στις διάφορες κατεργασίες που απαιτούνται για την ανέγερση αλουμινένιων σκαφών.

❖ Μηχανική Διαμόρφωση

Γενικά το αλουμίνιο μπορεί να υποστεί μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης με τα ίδια μηχανήματα που χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση του χάλυβα.

Ορισμένες, όμως, ιδιότητες του αλουμινίου απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή :

(α) Το αλουμίνιο παρουσιάζει μεγαλύτερη τάση επανόδου (spring - back characteristic) σε σχέση με τον χάλυβα στην περίπτωση αποφόρτισης μετά από παραμόρφωση στην πλαστική περιοχή. Αυτό οφείλεται στο πολύ μικρότερο μέτρο ελαστικότητάς του, και άρα στην ανάπτυξη μεγαλύτερων ελαστικών παραμορφώσεων για την ίδια επιβεβλημένη τάση. Αποτέλεσμα της συμπεριφοράς αυτής είναι η ανάγκη επίτευξης πολύ μεγαλύτερης ολικής παραμόρφωσης από την τελικά επιδιωκόμενη. Έτσι, για παράδειγμα, στις κατεργασίες κοίλανσης οι χρησιμοποιούμενες μήτρες πρέπει να έχουν μικρότερες ακτίνες καμπυλότητας για

αλουμίνιο σε σχέση με τον χάλυβα, για την επίτευξη πάντα της ίδιας τελικής καμπυλότητας.

(β) Τα θερμικά χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου είναι διαφορετικά από εκείνα του χάλυβα. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι τριπλάσιος και ο γραμμικός συντελεστής διαστολής είναι περίπου διπλάσιος από τις αντίστοιχες τιμές του χάλυβα.

❖ Κοπή

Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να κοπούν σχετικά εύκολα με μηχανικό πριόνι (saw), ιδιαίτερα σε μικρά πάχη. Η κοπή όμως, με φλόγα οξυγόνου – ακετυλενίου, η πιο συνηθισμένη μέθοδος κοπής χαλύβδινων ελασμάτων, δε μπορεί να εφαρμοστεί, λόγω της δημιουργίας οξειδίων με θερμοκρασία τήξης πολύ μεγαλύτερη εκείνης του αλουμινίου.

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι κοπής του αλουμινίου σήμερα χρησιμοποιούν τόξο πλάσματος (plasma arc) ή τόξο βολφραμίου (tungsten arc).

❖ Συγκόλληση

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι συγκόλλησης κραμάτων αλουμινίου είναι με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) και με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW). Από αυτές, η πρώτη δεν χρησιμοποιείται πολύ στη ναυπηγική επειδή είναι σχετικά αργή.

Το γεγονός ότι είναι δυνατή η συγκόλληση του αλουμινίου και των κραμάτων του δεν σημαίνει, όμως, ότι δεν εμφανίζονται προβλήματα. Τα σημαντικότερα από τα προβλήματα αυτά είναι :

(α) Πόροι στη συγκόλληση

Σε σύγκριση με τον χάλυβα, τα κράματα αλουμινίου είναι πιο ενεργά, με τη θερμοδυναμική έννοια του όρου. Έχουν, επομένως, μεγαλύτερη πιθανότητα να εγκλωβίσουν αέρια και να δημιουργήσουν πόρους στην συγκόλληση.

(β) Συστολή και παραμόρφωση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα κράματα αλουμινίου έχουν μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, μεγαλύτερο γραμμικό συντελεστή διαστολής και μικρότερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τον χάλυβα. Αποτέλεσμα των διαφορών αυτών είναι η ανάπτυξη μεγαλύτερων συστολών και παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση αλουμινίου.

(γ) Μείωση της αντοχής στην Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ)

Τα διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως το πάχος του υλικού, η διαδικασία συγκόλλησης, οι συνθήκες συγκόλλησης, και η απόσταση από την περιοχή συγκόλλησης, έχουν επιπτώσεις στις ιδιότητες της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ ή Heat Affected Zone – HAZ). Η επίδραση της θερμότητας στις περιοχές συγκόλλησης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Η μείωση αυτή παρατηρείται περισσότερο στα κράματα αλουμινίου που έχουν αποκτήσει τις ιδιότητές τους με θερμική κατεργασία.

2.9.2 Ζητήματα που απασχολούν την σύγχρονη ναυπηγική βιομηχανία

Το αυξημένο ενδιαφέρον για τις βλαβερές συνέπειες που προκαλούν τα ναυτικά ατυχήματα στο περιβάλλον, αλλά κυρίως η απώλεια ανθρώπινων ζωών, σε συνδυασμό με τη βαθύτερη γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών υπό την επίδραση κρουστικών φορτίων, αποτελεί κίνητρο για τους ερευνητές και τους κατασκευαστές ώστε να επιτύχουν βελτιωμένες κατασκευές για τα πλοία που θα ανθίστανται επιτυχώς στα αναπτυσσόμενα φορτία σε περίπτωση σύγκρουσης ή προσάραξης. Στον τομέα των θαλασσίων μεταφορών, η μεγαλύτερη ασφάλεια της κατασκευής επιφέρει εμπορικά πλεονεκτήματα, καθώς μπορούν να μεταφερθούν μεγαλύτερες ποσότητες φορτίου με μικρότερο ρίσκο.

Τα επιστημονικά πεδία που αφορούν στην κόπωση και τη θραύση έχουν μελετηθεί για περισσότερο από 150 χρόνια και ακόμα αναπτύσσονται και προκαλούν το ενδιαφέρον όχι μόνο για τα πλοία αλλά για κάθε είδους κατασκευή. Παρόλο που η ανάπτυξη ρωγμών σε ελάσματα και σε καρφωτά ενισχυτικά πλαισίων έχει αναλυθεί σε μεγάλο βαθμό, ελάχιστες έρευνες έχουν διενεργηθεί όσον αφορά στη διάδοση των ρωγμών σε πλαίσια με πολλαπλά συγκολλητά ενισχυτικά. Η συγκόλληση των

ενισχυτικών επηρεάζει την ανάπτυξη των ρωγμών κατά μοναδικό τρόπο λόγω των παραμενουσών τάσεων που προέρχονται από τη διαδικασία συγκόλλησης. Επίσης, σε αντίθεση με τα καρφωτά ενισχυτικά, η ρωγμή μπορεί να προχωρήσει στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης και να αποκόψει ολοκληρωτικά το ενισχυτικό. Οι καρφωτές κατασκευές διατηρούν την ακεραιότητά τους σε μεγάλο βαθμό λόγω του ότι η ανάπτυξη μιας ρωγμής σε κάποιο κατασκευαστικό στοιχείο δεν οδηγούσε στην ανεξέλεγκτη διάδοση της ρωγμής και στα γειτονικά με αυτό συνδεδεμένα κατασκευαστικά στοιχεία. Εάν, για παράδειγμα, διαδιδόταν κάποια ρωγμή στο εξωτερικό περίβλημα του πλοίου, τότε τα άθικτα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως τα ενισχυτικά, θα περιόριζαν το άνοιγμα και τη διάδοση της ρωγμής και θα οδηγούσαν στη σύλληψή της.

Ο συνδυασμός της χαμηλής δυσθραυστότητας κατ' εγκοπή και των ανεπαρκών μεθόδων συγκόλλησης του χάλυβα, με τις υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων σε κατασκευές που είναι ολόκληρες συγκολλητές συμβάλλει στην ψαθυρή τους θραύση. Επιπρόσθετα, κατά τη συγκόλληση αναπτύσσονται εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις κοντά στα ενισχυτικά, οι οποίες τείνουν να επιταχύνουν την ανάπτυξη των ρωγμών. Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη απαραίτητων κριτηρίων για τη δυσθραυστότητα κατ' εγκοπή στις συγκολλήσεις χαλύβδινων πλοίων, καθώς και βελτιωμένων μεθόδων συγκόλλησης, γεγονός που οδήγησε στη μείωση των περιστατικών ψαθυρής θραύσης.

Η αστοχία μιας κατασκευής περιγράφεται από τον συνδυασμό υψηλής τάσης, χαμηλής δυσθραυστότητας και κατασκευαστικής ατέλειας τα οποία απαιτούνται για την έναρξη της ψαθυρής θραύσης. Γι' αυτό υπάρχει πάντα η ανάγκη να γίνεται εκτίμηση του χρόνου που μεσολαβεί μέχρι η ανάπτυξη της ρωγμής να φτάσει το κρίσιμο μήκος, δηλαδή εκείνο το μήκος στο οποίο απειλείται η ακεραιότητα της κατασκευής του πλοίου.

Πολλά ατυχήματα ναυπηγικών κατασκευών που έχουν συμβεί στο παρελθόν έχουν αλλάξει εντελώς τη φιλοσοφία με την οποία η ναυπηγική βιομηχανία αντιμετωπίζει την κατασκευή των πλοίων, Εικόνα 2-11. Κάποια ατυχήματα περιλάμβαναν την απώλεια ολόκληρης της κατασκευής και κάποιες φορές ακόμα και ανθρώπινες απώλειες. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον γύρω από την ασφάλεια των πλοίων, τον κίνδυνο ατυχημάτων και ανησυχία για την πρόληψή τους.



Εικόνα 2-11: Ναυτικά ατυχήματα στο παρελθόν : Προσάραξη (αριστερά) δεξαμενόπλοιου 147.000 dwt το 1996 και (δεξιά) το καταστροφικό αποτέλεσμα της σύγκρουσης επίσης ενός δεξαμενόπλοιου 100.000 dwt από ένα πλοίο μεταφοράς τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων

Είναι εξίσου σημαντικό για την αποτίμηση του κινδύνου ατυχήματος να επικεντρωθούμε τόσο στην ενεργητική όσο και στην παθητική ασφάλεια, που είναι η πιθανότητα να συμβεί το ατύχημα και η πρόληψη των συνεπειών του. Η πρόληψη των συνεπειών ενός ατυχήματος προϋποθέτει την πρόβλεψη της κατασκευαστικής αστοχίας. Όταν συμβαίνει ένα ατύχημα, όπως σύγκρουση μεταξύ δύο πλοίων ή προσάραξη (Εικόνα 2-11), τότε για να εξακριβώσουμε το πεδίο των επιβαλλόμενων στην κατασκευή κρουστικών φορτίων, πρέπει να διενεργήσουμε ανάλυση του ατυχήματος η οποία θα περιλαμβάνει αρκετά σενάρια αστοχίας. Δεν θα ήταν σωστό να θεωρήσουμε ότι εφόσον το πλοίο έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανταπεξέρχεται σε μερικά από αυτά τα σενάρια αστοχίας ότι είναι γενικά ασφαλές, διότι παραμένει το πρόβλημα πιο από όλα τα σενάρια είναι πιο αντιπροσωπευτικό για το κάθε ατύχημα. Μια εμπειριστατωμένη ανάλυση του κινδύνου ατυχήματος πρέπει να περιλαμβάνει χιλιάδες σενάρια αστοχίας και να εκτιμά την πιθανότητα να συμβεί και τις δυνατές συνέπειες καθενός εξ αυτών.

2.10 Προσδιορισμός και Παρουσίαση του Προβλήματος

Η χρήση του αλουμινίου στη ναυπηγική σχετίζεται κατά πολύ με την κατανόηση της μηχανικής θραύσης που εμφανίζεται στα ελάσματα αλουμινίου, τα οποία καταπονούνται σε εξαιρετικά αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος και λειτουργίας οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην ολοκληρωτική απώλεια της κατασκευής, Εικόνα 2-12.



Εικόνα 2-12 : Βύθιση πλοίων λόγω κατάρρευσης της μεταλλικής κατασκευής τους

Το υψηλό κόστος επισκευής και συντήρησης των πλοίων μετά από θραύση κρίσιμων κατασκευαστικών στοιχείων ή και ολόκληρης της μεταλλικής κατασκευής και οι απαιτήσεις για υψηλού επιπέδου απόδοση και ποιότητα της κατασκευής έχει ωθήσει τη ναυπηγική βιομηχανία στην λεπτομερή ανάλυση του φαινομένου της ασταθούς διάδοσης των ρωγμών και της σύλληψής τους, προς αποφυγή της θραύσης και τελικά της αστοχίας.

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει γύρω από την ανάπτυξη ρωγμών σε πλαίσια με συγκολλητά ενισχυτικά και κάποιες αφορούσαν τη διάδοση της ρωγμής σε ελάσματα με συγκολλητά ενισχυτικά υπό την επίδραση αξονικής φόρτισης. Αντιθέτως, όμως, δεν υπάρχουν δημοσιευμένα στοιχεία για την επίδραση του τύπου και της διάταξης των ενισχυτικών στη διάδοση και τη σύλληψη της ρωγμής, με σκοπό τη βελτίωση της δυσθραυστότητας και της αντοχής, με εξαίρεση τη μελέτη των Simonsen και Ocaklı [18], σε ενισχυμένα πλαίσια τα οποία είναι κομμένα παράλληλα με τα ενισχυτικά.

Κατασκευαστικά στοιχεία που υποβάλλονται σε μεγάλο εύρους δυναμικά φορτία είναι επιρρεπή σε ανάπτυξη εκτεταμένης ρωγμάτωσης. Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην πιθανότητα ανάπτυξης κοπωτικής ρωγμάτωσης σε χαλύβδινα συγκολλητά κατασκευαστικά στοιχεία είναι η υψηλή συγκέντρωση τάσεων σε συγκεκριμένες ιδιόμορφες κατασκευαστικές λεπτομέρειες και η διακύμανση του εύρους των επιβαλλόμενων τάσεων. Τα διάφορα ατυχήματα και κατασκευαστικές αστοχίες που συνέβησαν σε χαλύβδινα πλοία δημιούργησαν την ανάγκη ανάπτυξης κριτηρίων που αφορούν την αντοχή της γάστρας, όπως είναι η διάρκεια ζωής της κατασκευής σε κόπωση με ύπαρξη ρωγμάτωσης, η φθορά λόγω διάβρωσης και η απώλεια λόγω σύγκρουσης ή προσάραξης.

2.11 Το Αντικείμενο της Έρευνας και ο Σκοπός της Μελέτης

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η κατανόηση των μηχανισμών θραύσης που είναι αποτέλεσμα της απόκρισης των ναυπηγικών κατασκευών. Η έρευνα θα επικεντρωθεί στα ταχύπλοα σκάφη που κατασκευάζονται από ελαφρά ναυπηγικά υλικά και συγκεκριμένα από αλουμίνιο. Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε μικρής κλίμακας πλαίσια και ελάσματα αλουμινίου, τα οποία αποκάλυψαν ότι φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάδοση και σύλληψη των ρωγμών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία και τη διάταξη των ενισχυτικών.

Η θραύση αποτελεί ένα πολύπλευρο και πολύπλοκο πρόβλημα το οποίο συνθέτουν πολλά μικρότερα επιμέρους ζητήματα, το καθένα από τα οποία απαιτεί ξεχωριστή παρατήρηση. Ο μηχανισμός της θραύσης σε αρχικό στάδιο ξεκινά από τη μικροδομή του υλικού με τον σχηματισμό και την ανάπτυξη μικροκενών τα οποία θα ενωθούν δημιουργώντας έτσι μικρορωγμές στην κατασκευή. Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο κατά το οποίο γίνεται η διάδοση των ρωγμών κατά το πάχος του ελάσματος της κατασκευής και τέλος στα τυπικά στοιχεία ενίσχυσης. Ρωγμές που αναπτύσσονται κατ' αυτόν τον τρόπο διαδίδονται διαμέσου των ελασμάτων και των πλαισίων της κατασκευής, των φρακτών και των διαχωριστικών γειτονικών διαμερισμάτων του πλοίο.

Για να καλύψουμε αυτό το ευρύ φάσμα των μηχανισμών αστοχίας είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός συστήματος προσέγγισης προκειμένου να διευκρινιστούν οι κανόνες που διέπουν την κατασκευαστική αστοχία από το αρχικό

στάδιο της δημιουργίας της μέχρι την πρόκληση βλάβης σε οποιοδήποτε τμήμα ή στοιχείο της κατασκευής. Για κάθε ένα από τα παραπάνω επίπεδα θα πρέπει να εφαρμόζονται διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου και πρόληψης της θραύσης. Επιπλέον, ολόκληρος ο σχεδιασμός πρέπει να περιλαμβάνει την πιθανότητα θραύσης, λόγω του ότι ο έλεγχος και η αποτροπή της θραύσης εξαρτώνται από την επιλογή των κατάλληλων υλικών, τον λεπτομερή κατασκευαστικό σχεδιασμό, την γενική σχεδιαστική αρχή που διέπει τη γάστρα (κατασκευή μονής ή διπλής γάστρας), κ.ά.



Εικόνα 2-13: Ανάπτυξη ρωγμών, λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων στην αλουμινένια μεταλλική κατασκευή πλοίου

Η πρόοδος στη μελέτη της θραύσης θα επιφέρει άμεσα οφέλη στη ναυπηγική βιομηχανία. Η χρήση των κραμάτων αλουμινίου στη ναυπηγική είναι πολλά υποσχόμενη, αντίθετα με τον χάλυβα, κυρίως για κατασκευές που επιδρά σημαντικά το βάρος τους, όπως τα ταχύπλοα σκάφη. Σε αυτό συντελεί ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος και επίσης τα πολύ καλά χαρακτηριστικά δυσθραυστότητας και αντίστασης σε διάβρωση. Από την άλλη πλευρά, όμως, τα κράματα αλουμινίου εμφανίζουν μειονεκτήματα όταν χρησιμοποιούνται ως στοιχεία ενίσχυσης της αντοχής, όπως χαμηλή ακαμψία και δυσκολία συγκόλλησης που οδηγούν σε σοβαρές αστοχίες της κατασκευής, Εικόνα 2-13.

Είναι καθοριστικής σημασίας η καλύτερη κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων αλουμινίου και των επιδράσεων της συγκόλλησης ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για το σχεδιασμό και την ανέγερση ελαφρών κατασκευών. Σε αυτό συνεισφέρει η μελέτη των χαρακτηριστικών της αντοχής σε εφελκυσμό των κραμάτων αλουμινίου του βασικού μετάλλου αλλά και των συγκολλητών ενισχυτικών κατά συμβολή σε ναυπηγικές εφαρμογές, συνυπολογίζοντας τη διαμόρφωση των συγκολλήσεων.

Μια σειρά πειραμάτων εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σε ημιστατικές συνθήκες φόρτισης, σε κράματα αλουμινίου, τόσο στο βασικό μέταλλο όσο και στα διαφόρων τύπων συγκολλητά σε αυτό ενισχυτικά. Τα αποτελέσματα της μελέτη θα αποτελέσουν χρήσιμα στοιχεία για τη σχεδίαση αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από πλαίσια αλουμινίου ενισχυμένα με ενισχυτικά τύπου-T που προέκυψαν με εξέλαση, ώστε να γίνει αποτίμηση της επίδρασης των διαφορετικών μεθόδων σχεδίασης και κατασκευής με διαφορετικού τύπου ενισχυτικά. Επίσης, έγινε αντιπαραβολή μεταξύ ενισχυμένων και μη ενισχυμένων κατασκευαστικών διατάξεων που ανταποκρίνονται σε πραγματικές ναυπηγικές κατασκευές. Τέλος, εξετάστηκε το πώς επηρεάζουν οι διαστάσεις και ο τύπος των ενισχυτικών τη διάδοση και τη σύλληψη των ρωγμών. Για το λόγο αυτό έγιναν μια σειρά πειραμάτων, μεταβάλλοντας το μήκος και το ύψος του κορμού του ενισχυτικού τύπου-I ενώ στη συνέχεια εξετάστηκε και η απόκριση ενισχυτικού τύπου-T.

Ο απώτερος στόχος αυτής της εργασίας είναι να αναπτυχθούν καινοτόμες πρακτικές για τη σχεδίαση ναυπηγικών κατασκευών, ώστε να αυξηθεί η αντοχή και ανοχή της κατασκευής σε βλάβες διασφαλίζοντας έτσι την επιβιωσιμότητα της έναντι ποικίλων ακραίων φορτίων, εκρήξεων και ατυχημάτων όπως συγκρούσεις με άλλα πλοία ή προσαράξεις καθώς επίσης και να αυξηθεί η διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής υπό την επίδραση της κόπωσης και της διάβρωσης.

Κύριος σκοπός είναι να βοηθήσει η μελέτη αυτή ώστε να αναπτυχθούν τα μέσα που θα οδηγήσουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας των ενισχυμένων αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών, μέσω της λεπτομερούς ανάλυσης μιας σειράς προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν κατά τη κατασκευή τέτοιων συγκολλητών ή εξελασμένων κατασκευών με σκοπό αυτά τα προβλήματα να περιοριστούν ή ακόμα και να εξαλειφθούν.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Φορτίσεις και Αποκρίσεις των Στοιχείων της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου

Κατά την πραγματοποίηση της ανάλυσης για την εξέταση της επιτευχθείσας αντοχής μιας κατασκευής, προκειμένου να διαπιστωθεί η ικανοποίησή της σε σχέση με τις αντίστοιχες απαιτήσεις, είναι απαραίτητο για το σχεδιαστή να διευκρινίσει και να αποσαφηνίσει σε κάθε επίπεδο της σχεδιαστικής αυτής ανάλυσης τους διάφορους παράγοντες που επιδρούν στην αντοχή με κύριο και σημαντικότερο την εκτίμηση και τον υπολογισμό των αναμενόμενων φορτίσεων που πρόκειται να υποστεί η κατασκευή. Τα φορτία που ενεργούν στη κατασκευή του πλοίου είναι ποικίλα και ιδιαίτερα, σε σύγκριση με εκείνα που ασκούνται στις στατικές δομές και επίσης χαρακτηρίζονται από διαφορετικό τρόπο δράσης.

Οι φορτίσεις και οι αποκρίσεις που ασκούνται στην μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου είναι ένα εκτενές και πολύπλοκο θέμα, καθώς εύκολα μπορούμε να προσδιορίσουμε μερικές από αυτές ενώ άλλες δεν προσδιορίζονται με την ίδια ευκολία, ούτε είναι γνωστή η συχνότητα και η ένταση με την οποία ασκούνται. Τα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου δέχονται φορτίσεις διαφόρων ειδών οι οποίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, όπως η φορά, η διεύθυνσή τους και η έντασή τους, επιφέρουν απρόσμενα και δυσάρεστα αποτελέσματα στη συμπεριφορά της κατασκευής.

3.2 Είδη Φορτίσεων στις Ναυπηγικές Κατασκευές

Οι φορτίσεις που ασκούνται στις ναυπηγικές κατασκευές μπορούν να υποδιαιρεθούν είτε ανάλογα με τη φύση τους, δηλαδή τη διάρκεια και την μεταβλητότητά τους στο χρόνο, είτε ανάλογα με την απόκριση της κατασκευής που τις παραλαμβάνει. Μια πρώτη προσέγγιση οδηγεί στη υποδιαίρεση τους σε στατικές και σε δυναμικές φορτίσεις.

Στην πρώτη περίπτωση των στατικών φορτίσεων περιλαμβάνονται κυρίως οι υδροστατικές φορτίσεις που ασκούνται στο εξωτερικό περίβλημα της γάστρας και στις εσωτερικές επιφάνειες (εγκάρσιες φρακτές, εσωτερικός πυθμένας) και που οφείλονται στο θαλάσσιο περιβάλλον και στα μεταφερόμενα ρευστά ή στερεά (όπως αργό πετρέλαιο, θαλάσσιο έρμα, ξηρό φορτίο χύδην). Οι στατικές φορτίσεις παραμένουν σταθερές στο χρόνο (τουλάχιστον για τη διάρκεια ενός ταξιδιού), και οι κυριότερες είναι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, η άντωση και το βάρος του μεταφερομένου φορτίου. Οι στατικές φορτίσεις επίσης μπορούν να υποδιαιρεθούν σε κάθετες ή πλάγιες (καμπτικές) και σε ομοεπίπεδες ή συνεπίπεδες (θλιπτικές, εφελκυστικές και διατμητικές), στις επίπεδες επιφάνειες της μεταλλικής κατασκευής.

Στο πλοίο ασκούνται όμως και δυναμικές φορτίσεις που μεταβάλλονται ραγδαία στο χρόνο και στο χώρο. Παραδείγματα δυναμικών φορτίσεων αποτελούν η κρούση κυμάτων στο εξωτερικό περίβλημα του πλοίου (σφυρόκρουση) καθώς και οι ταλαντώσεις που οφείλονται σε μηχανικά αίτια όπως οι κραδασμοί των μηχανολογικών εγκαταστάσεων πρόωσης, η περιστροφική λειτουργία της έλικας και η αλληλεπίδρασή της με τη γάστρα. Επίσης, στις δυναμικές φορτίσεις συγκαταλέγονται και οι θερμοκρασιακές μεταβολές στις οποίες υπόκεινται τα πλοία και κυμαίνονται συνήθως από 0 – 30 °C ανάλογα με την γεωγραφική θέση, την εποχή του έτους και το βάθος του νερού, και τέλος οι υδροδυναμικές και αδρανειακές φορτίσεις.

Κατά κανόνα πρέπει να γίνεται υπέρθεση των στατικών και δυναμικών φορτίσεων και αυτό επιτυγχάνεται στο στάδιο του σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής (προσδιορισμός φορτίων σχεδιασμού) κάνοντας ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές.

Στις πραγματικές κατασκευές κατά κανόνα ασκούνται όλα τα είδη φορτίσεων σε κάποιο βαθμό και για το λόγο αυτό θα πρέπει να εξετασθεί η συμπεριφορά των ελασμάτων υπό πιο συνθέτες συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εξισώσεων αλληλεπίδρασης, οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε για να σχεδιασθεί ένα έλασμα που θα παραλάβει κάποιο συγκεκριμένο συνδυασμό φορτίσεων είτε για να εξετασθεί η ακεραιότητά του υπό κάποιες φορτίσεις. Οι σημαντικότερες φορτίσεις που ασκούνται στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου δίνονται στον Πίνακα 3.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1

α/α	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ * ΦΟΡΤΙΣΗΣ
1	Διαμήκης κάμψη σε ήρεμο νερό	Σ
2	Τέμνουσες δυνάμεις λόγω διαμήκου κάμψης	Σ
3	Διαμήκης κάμψη σε (ψευδο-στατικό) κύμα	Σ
4	Τέμνουσες δυνάμεις σε (ψευδο-στατικό) κύμα	Σ
5	Δράση ανέμου (σε υπερκατασκευές)	Δ
6	Αδρανειακές φορτίσεις λόγω κίνησης μαζών	Σ
7	Θερμικές φορτίσεις	Σ
8	Φορτίσεις λόγω πάγων στη θάλασσα	Δ
9	Φορτίσεις οφειλόμενες στα μηχανήματα πρόωσης	Δ
10	Τοπικές φορτίσεις λόγω τροχοφόρων οχημάτων	Δ
11	Συγκεντρωμένες φορτίσεις σε καταστρώματα	Σ
12	Φορτίσεις κατά τον δεξαμενισμό και την καθέλκυση	Σ-Δ
13	Φορτίσεις προσάραξης	Σ-Δ
14	Συγκρούσεις	Δ
15	Φορτίσεις ρυμούλκησης	Σ-Δ
16	Φορτίσεις εκτόξευσης βλημάτων και πυραύλων	Δ
17	Υποθαλάσσιες και ατμοσφαιρικές εκρήξεις	Δ
18	Φορτίσεις κατά την ανέλκυση του σκάφους	Σ

* Σ: Στατική φόρτιση, Δ: Δυναμική φόρτιση

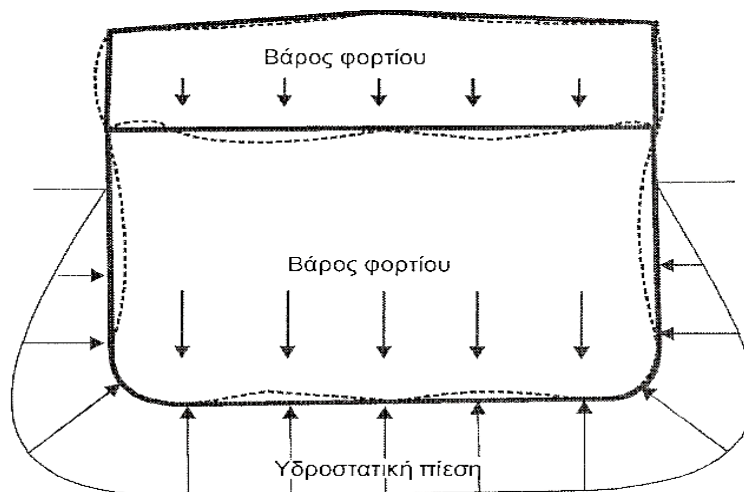
Στη συνέχεια ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των κυριότερων ειδών στατικών και δυναμικών φορτίσεων που ασκούνται στις ναυπηγικές κατασκευές κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής.

3.3 Στατικές φορτίσεις

3.3.1 Οι κύριες στατικές φορτίσεις

Οι κυριότερες τοπικές στατικές φορτίσεις που είναι το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, η εξωτερική υδροστατική φόρτιση και το βάρος του φορτίου περιγράφονται στην Εικόνα 3-1. Στη συγκεκριμένη διάταξη η συνιστώσα φόρτιση που δρα στον πυθμένα του πλοίου θα είναι (περίπου) η διαφορά της υδροστατικής

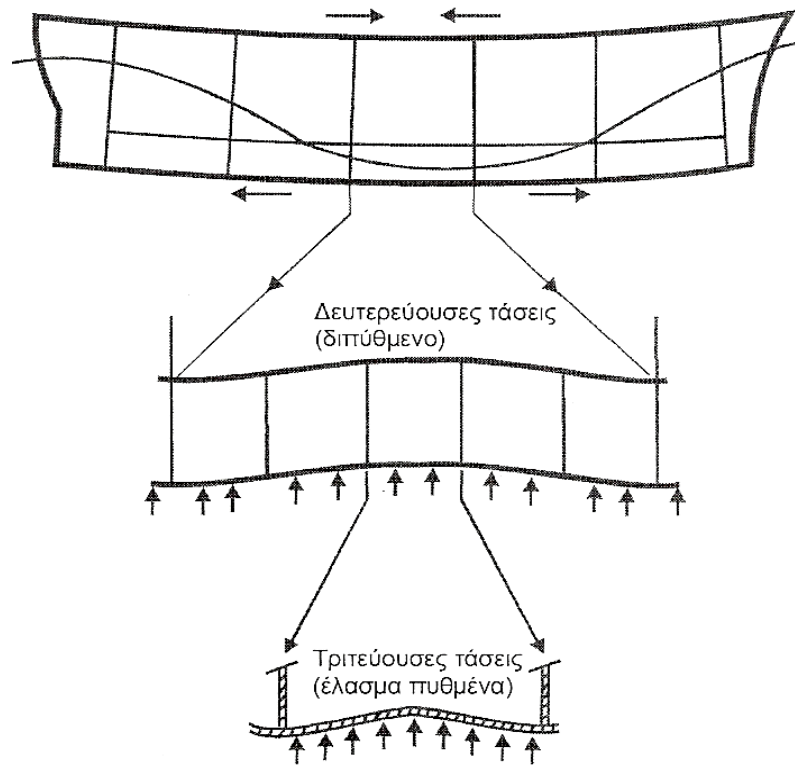
πίεσης από το βάρος των μεταφερόμενων φορτίων. Όπως γίνεται σαφές από την εικόνα, οι φορτίσεις αυτές προκαλούν κάμψη των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.



Εικόνα 3-1: Στατικές φορτίσεις σε εγκάρσια τομή πλοίου

Η κάμψη ως φαινόμενο διαφέρει ουσιωδώς από τη θλίψη, οι δε διαφορές τους αντικατοπτρίζονται στη μορφή και κυρίως στη λύση των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων. Η μηχανική διαφορά των δύο έγκειται στο ότι η κάμψη χαρακτηρίζεται από βαθμιαίες μεταβολές στη μορφή και τις μετατοπίσεις της κατασκευής, που στη γραμμική ελαστική περιοχή είναι ανάλογες της επιβαλλόμενης φόρτισης. Στην περίπτωση όμως της θλίψης, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή της μορφής της κατασκευής μέχρις ότου η φόρτιση φθάσει κάποια κρίσιμη τιμή, το φορτίο ή την τάση λυγισμού. Όταν η επιβαλλόμενη φόρτιση πλησιάσει το φορτίο λυγισμού, οι μετατοπίσεις κάθετα στον άξονα φόρτισης αρχίζουν να αυξάνονται ραγδαία. Η συμπεριφορά της κατασκευής στο στάδιο αυτό εξαρτάται άμεσα από την μορφολογία της, δηλαδή αν είναι συμπαγής πρισματική διατομή, έλασμα ή κέλυφος, και από τον τρόπο στήριξής της.

Στην Εικόνα 3-2 περιγράφεται η δράση μιας τοπικής καμπτικής φόρτισης στον πυθμένα του πλοίου. Παρατηρούμε ότι η κατασκευή κάμπτεται στο σύνολό της (περιλαμβάνονται δηλαδή και οι σταθμίδες που βρίσκονται στο διπύθμενο), αλλά και το έλασμα που στηρίζεται στις σταθμίδες αυτές. Έχουμε δηλαδή υπέρθεση των δύο μορφών κάμψης και για να υπολογίσουμε τις τάσεις που προκύπτουν πρέπει να προσθέσουμε διανυσματικά τα δυο εντατικά πεδία.



Εικόνα 3-2: Τοπική φόρτιση στον πυθμένα του πλοίου με κάμψη του διπυθμένου συνολικά και των ελασμάτων μεταξύ των σημείων στήριξης

3.3.2 Εγκάρσιες φορτίσεις

Η φόρτιση του εξωτερικού περιβλήματος της γάστρας λόγω υδροδυναμικής κρούσης των κυμάτων εξαρτάται από το βύθισμα, τη διαγωγή, τα χαρακτηριστικά της κατάστασης της θάλασσας και την κίνηση του πλοίου. Επειδή ο ακριβής προσδιορισμός της φόρτισης είναι μια περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, έχουν προταθεί διάφορες τιμές για χρήση στο στάδιο του σχεδιασμού της κατασκευής.

Οι εγκάρσιες φορτίσεις αποτελούνται από δύο συνιστώσες, μία που αντιστοιχεί στη δυναμική πίεση λόγω της περιστροφικής κίνησης του θαλάσσιου νερού και μία δεύτερη γραμμικά μεταβαλλόμενη φόρτιση που οφείλεται στην υδροστατική πίεση. Οι δυο φορτίσεις ασκούνται ταυτόχρονα στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου αλλά δεν προστίθενται, και επιλέγεται η μεγαλύτερη των δύο ως κρίσιμη. Η δεύτερη εφαρμόζεται μόνο στην θεωρούμενη πλευρά του πλοίου διότι λαμβάνει υπόψη τον διατοιχισμό. Κατά συνέπεια, τα καταστρώματα δεν υποβάλλονται σε θλίψη, καθόσον η πλάγια δύναμη επιφέρει επιτάχυνση στην εγκάρσια κατεύθυνση. Στις φορτίσεις αυτές δεν περιλαμβάνεται η σφυρόκρουση ούτε

η δράση των υδροδυναμικών φορτίων στα καταστρώματα, που εξετάζονται ξεχωριστά.

3.3.3 Προσάραξη και σύγκρουση

Η προσάραξη θεωρείται ως τυχαία, μη επιθυμητή φόρτιση (εκτός φυσικά ειδικών περιπτώσεων, όπως αποβατικών σκαφών) και κατά συνέπεια δεν λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής. Η διαδικασία αναγωγής των τοπικών φορτίων σε καμπτικές τάσεις που ασκούνται σε ολόκληρη την γάστρα είναι σχετικά απλή. Ο υπολογισμός των τοπικών φορτίων δεν είναι όμως εξίσου εύκολος καθόσον η συμπεριφορά εξαρτάται από την τοπική ακαμψία και τις ιδιότητες της επιφάνειας προσάραξης. Μια απλουστευτική προσέγγιση στο πρόβλημα βασίζεται στην παραδοχή ότι όλη η φόρτιση κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια ενός και μόνο ελάσματος.

Οι συγκρούσεις είναι επίσης τυχαία, απροσδόκητα και ανεπιθύμητα γεγονότα κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου και συνεπώς δεν λαμβάνεται ειδική μέριμνα. Μόνο τελευταία, με τις διατάξεις του Αμερικανικού «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. Η κατάρτιση μίας γενικής μεθοδολογίας υπολογισμού των φορτίων είναι ουσιαστικά αδύνατη, καθώς ο αριθμός των παραμέτρων που επιδρούν είναι πολύ μεγάλος. Την τρέχουσα περίοδο υπάρχει ερευνητικό ενδιαφέρον στο χώρο αυτό καθώς οι εξέδρες άντλησης πετρελαίου πρέπει να προστατευθούν από τυχόν συγκρούσεις με πλοία. Τα αποτελέσματα τέτοιων συμβάντων μπορούν να προκαλέσουν οικολογική καταστροφή τεραστίων διαστάσεων λόγω του ότι θα μπορούσε να απελευθερωθεί μεγάλη ποσότητα πετρελαίου στο θαλάσσιο χώρο.

3.3.4 Δυναμικές φορτίσεις

Εκτός των στατικών φορτίσεων που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα, στο πλοίο ασκούνται και φορτίσεις οι οποίες μεταβάλλονται στο χρόνο και οι οποίες μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δυο 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 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 στο συμβατικό σχεδιασμό, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

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

- 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 ταλάντωσης 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.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι δυναμικές φορτίσεις έχουν κατά κανόνα τοπική επίδραση στη συμπεριφορά της κατασκευής, στη δε περίπτωση της διαμήκου 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.

3.3.5 Αδρανειακές φορτίσεις

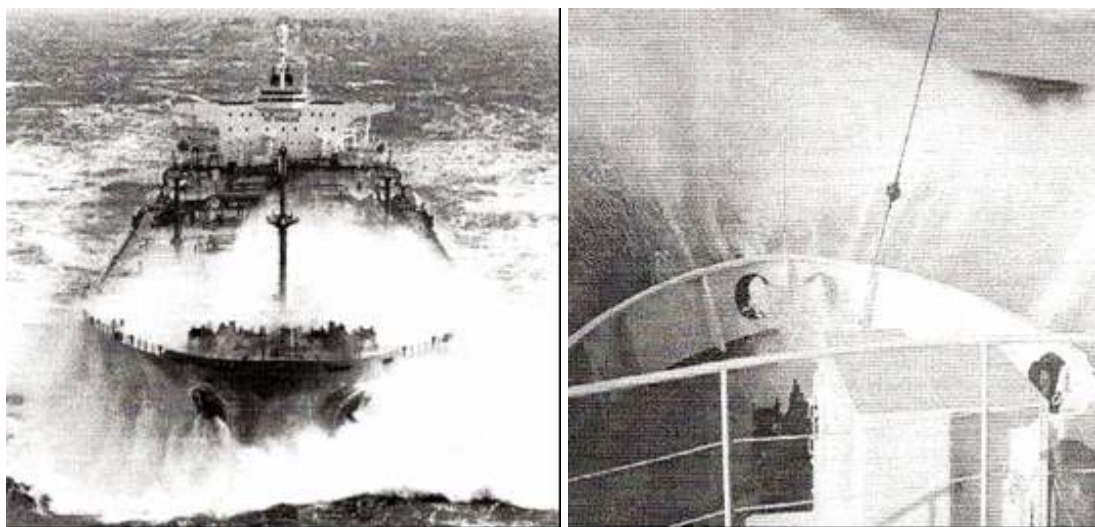
Οι αδρανειακές φορτίσεις οφείλονται στη μετακίνηση μεγάλων μαζών κατά την κίνηση του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι αδρανειακές φορτίσεις σε διάφορα σημεία του πλοίου καθίστανται κρίσιμες όταν η κίνηση του πλοίου περί κάποιο άξονα αναφοράς, για παράδειγμα τον διαμήκη άξονα, που οδηγεί σε διατοιχισμό, 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 σαν αποτέλεσμα των ταλαντώσεων στην περιοχή της πρύμνης (μηχανοστάσιο, εδράσεις μηχανημάτων και περιστροφή της έλικας).

Σε ορισμένες περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αδρανειακές φορτίσεις στο στάδιο του σχεδιασμού της κατασκευής. Κατά το σχεδιασμό των διαφόρων εξαρτημάτων αλλά και των σημείων στήριξής τους λαμβάνεται υπόψη η δράση των αδρανειακών φορτίσεων κάνοντας χρήση ισοδυνάμων στατικών φορτίων.

3.3.6 Σφυρόκρουση και υδροδυναμική κρούση

Η σφυρόκρουση είναι αποτέλεσμα της κρούσης της προωρίας 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. Η σφυρόκρουση προκύπτει κατά κανόνα στο προωαίο τμήμα του πυθμένα αλλά μπορεί επίσης να υποστεί σφυρόκρουση και η πρυμναία κατασκευή.



Εικόνα 3-3: Διαβροχή του καταστρώματος και κρούση κυμάτων στην προωρία κατασκευή λόγω θαλασσοταραχής (αριστερά) και φόρτιση προωρίας κατασκευής λόγω κρούσης κύματος (δεξιά)

Η απόκριση της κατασκευής προκύπτει σε επίπεδο πρωτεύουσας, δευτερεύουσας αλλά και τριτεύουσας κατασκευής. Η πρωτεύουσα κατασκευή ταλαντώνεται σε όλο το φάσμα συχνοτήτων από τις οποίες οι χαμηλότερες είναι και οι σημαντικότερες. Η απόκριση σε δευτερεύον και τριτεύον επίπεδο αφορά την τοπική κατασκευή και μπορεί να επιλυθεί με οποιαδήποτε μέθοδο, υποθέτοντας

ψευδο-στατική απόκριση καθώς η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης ενός πακτωμένου ελάσματος είναι σημαντικά διαφορετική από αυτή της διέγερσης.

Όταν το πλοίο κινείται σε θαλασσοταραχή μπορεί επίσης να υποστεί υδροδυναμική κρούση λόγω κυμάτων (διαβροχή) και το κύριο κατάστρωμα, Εικόνα 3-3. Κατά κανόνα αυτό προκύπτει συχνότερα στην περιοχή της πλώρας, δεν θα πρέπει όμως να αμελούνται και οι υπόλοιπες εκτεθειμένες περιοχές της κατασκευής (όπως ο καθρέπτης των υπερκατασκευών). Οι διαθέσιμες τιμές για τις φορτίσεις σχεδιασμού διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους διότι βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις που λαμβάνονται τοπικά και έτσι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό μεγάλων τμημάτων της κατασκευής. Οι Νηογνώμονες, επίσης, δίνουν τιμές ανάλογα με το μέγεθος και την περιοχή του πλοίου.

3.3.7 Υδροελαστική ανάλυση

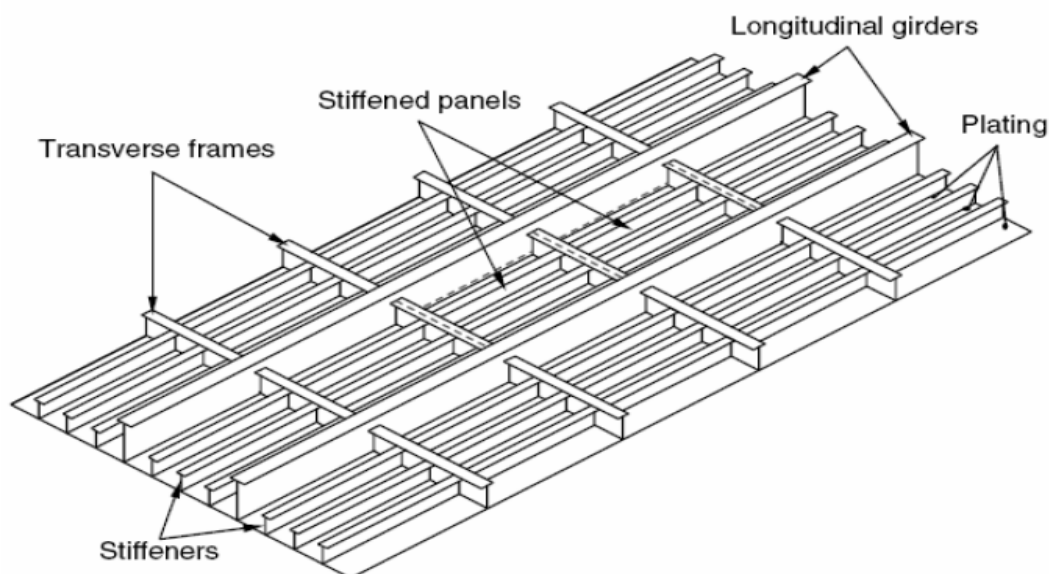
Το πλοίο σε μία κατάσταση θάλασσας συμπεριφέρεται ως ένα ελαστικό σώμα που υπόκειται σε κινήσεις στους έξι βαθμούς ελευθερίας και επίσης παραμορφώνεται ως προς τους τρεις άξονες. Οι παραμορφώσεις επηρεάζουν τη φόρτιση που δέχεται από τη θάλασσα και τόσο οι κατασκευαστικές όσο και οι υδροδυναμικές αποσβέσεις επηρεάζουν το πρόβλημα. Η ίδια η θάλασσα εκφράζεται μαθηματικά από μία τυχαία διαδικασία (random process).

Μέχρι πρόσφατα δεν είχε βρεθεί μία λογική ολοκληρωμένη μαθηματική περιγραφή και λύση για το δύσκολο αυτό πρόβλημα. Οι Bishop και Price [9] έχουν ασχοληθεί με αυτό το θέμα με συνεχώς αυξανόμενη επιτυχία. Έχουν συναγάγει τη δυναμική συμπεριφορά του πλοίου ως προς τους τρόπους παραμόρφωσης (modes of distortion), οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν και τις κινήσεις του άκαμπτου σώματος όπως καθ' ύψος κίνηση (heave) και προνευτασμός (pitch), συνδυάζοντας έτσι τις θεωρίες συμπεριφοράς σε κυματισμούς (seakeeping) και θεωρίες τις κατασκευαστικής αντοχής (structural theories). Η υπέρθεση του κάθε στοιχείου συμπεριφοράς σε σχέση με τα χαρακτηριστικά διέγερσης της θάλασσας επιτρέπει την πρόβλεψη της συνολικής συμπεριφοράς, συμπεριλαμβανομένων της σφυρόκρουσης (slamming) και της στρέψης (twisting) της γάστρας.

3.4 Η Κατασκευαστική Δομή του Πλοίου

Τα πλοία είναι ναυπηγικές κατασκευές που αποτελούνται από λεπτότοιχα ελάσματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του εξωτερικού περιβλήματος, των καταστρωμάτων 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.



Εικόνα 3-4: Τυπική μορφή ενός ενισχυμένου ελάσματος για ναυπηγικές κατασκευές με διαμήκη, εγκάρσια ενισχυτικά και ορθογώνια ενισχυμένα πλαίσια

Η δομή του πλοίου αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ορθογώνια κατά το διάμηκες και κατά το εγκάρσιο ενισχυμένα ελάσματα. Τόσο τα ελάσματα όσο και τα ενισχυτικά πρέπει να σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δέχονται και να συγκρατούν τα εφαρμοζόμενα λειτουργικά φορτία του πλοίου κατά τη διάρκεια της ζωής του.

Οι δοκιμές σε κόπωση είναι απαραίτητες ώστε να προσδιοριστούν οι ιδιότητες και η αντοχή των διάφορων τοπικών κατασκευαστικών στοιχείων και των

συγκολλήσεων τους. Έτσι, πρέπει πρώτα να γίνει εξέταση των τοπικών κατασκευαστικών στοιχείων πριν προχωρήσουμε στον ευρύτερο σχεδιασμό ολόκληρης της κατασκευής. Καθώς το σύνολο της κατασκευής αυξάνει σε μέγεθος, είναι αναγκαίο να περιοριστούν το μέγεθος και το μήκος των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής που φέρουν υψηλές φορτίσεις ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του λυγισμού. Για το λόγο αυτό, τα τμήματα αυτά της κατασκευής τα οποία αποτελούνται από πολλαπλά διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά, πρέπει να υπόκεινται σε δοκιμές ώστε να εκτιμηθεί ο μηχανισμός και το είδος της κατασκευαστικής αστοχίας και να καθοριστούν τα περιθώρια ασφαλείας για τον σχεδιασμό της κατασκευής προς αποφυγή της ολικής αστοχίας.

Είναι λοιπόν στις αρμοδιότητες του ναυπηγού μηχανικού να εξασφαλίσει ότι η διαδικασία σχεδίασης θα οδηγήσει στο κατασκευαστικά βέλτιστο πλοίο με βάση τα κύρια επιβαλλόμενα φορτία που πρόκειται να συναντήσει το πλοίο στη διάρκεια της ζωής του. Ο ναυπηγός βρίσκεται συνεχώς αντιμέτωπος με την πρόκληση για ελαφρύτερες και αποδοτικότερες κατασκευές, ενώ ταυτόχρονα έχει την υποχρέωση να ικανοποιεί τις αυξημένες απαιτήσεις και κανονισμούς ασφαλείας. Η εξοικονόμηση βάρους, η οποία είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με τη χρήση νέων ελαφρύτερων υλικών ή την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών έχει εντυπωσιακά αποτελέσματα στις περισσότερες εφαρμογές και αποτελεί θέμα εξέτασης και μελέτης εδώ και πολλές δεκαετίες.

Η ανάπτυξη των μεθόδων ανάλυσης και η διεύρυνση των βάσεων δεδομένων που αφορούν την συμπεριφορά των υλικών και των φορτίσεων τις τελευταίες δεκαετίες έχουν συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στην ακριβέστερη και ταυτόχρονα ορθολογικότερη ανάλυση και σχεδιασμό των ναυπηγικών κατασκευών.

Υπάρχουν όμως θέματα τα οποία και σήμερα παραμένουν ανοικτά και επιδέχονται διαφορετικές πιθανές αποδεκτές λύσεις. Ένα από αυτά είναι και ο προσδιορισμός της αποδεκτής πιθανότητας αστοχίας ολόκληρου του πλοίου ή και τμήματός του, δεδομένης μάλιστα και της αβεβαιότητας που περιβάλλει τις μέγιστες φορτίσεις. Δεν είναι εύκολο να επιλεγούν οι αποδεκτές τιμές πιθανοτήτων αστοχίας, δεδομένου ότι υπεισέρχονται εκτός των παραγόντων σχεδιασμού και άλλοι εξωτερικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα η κοινωνικά αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας. Εάν συγκριθεί η αποδεκτή πιθανότητα θανατηφόρου τραυματισμού σε οδικό ατύχημα με αυτό σε αεροπορικό ή ναυτικό ατύχημα βλέπουμε ότι οι κοινωνικά αποδεκτές πιθανότητες διαφέρουν. Έτσι λοιπόν, ο υπολογισμός της αποδεκτής

πιθανότητας αστοχίας σε πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) ή στην περίπτωση διαφυγής ραδιενεργών ουσιών από πυρηνικό αντιδραστήρα πρόωσης υποβρυχίου, δεδομένης της κλίμακας της καταστροφής στο περιβάλλον που θα ακολουθήσει εάν συμβεί ατύχημα δεν είναι μια εύκολη διαδικασία.

Οι πιθανοθεωρητικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν βαθμονομηθεί με υπάρχουσες κατασκευές οι οποίες έχουν αποδειχθεί ικανοποιητικές. Υπολογίζεται δηλαδή η πιθανότητα αστοχίας των κατασκευών αυτών και χρησιμοποιείται η τιμή αυτή για νεότερες μελέτες. Η διαδικασία αυτή γίνεται ουσιαστικά μέσω των κανονισμών των Νηογνομώνων και καλείται βαθμονόμηση των κανονισμών σχεδιασμού (code calibration), έχει δε εφαρμοσθεί σε όλους τους κανονισμούς που κάνουν χρήση πιθανοθεωρητικών διαδικασιών. Στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω οι συνέπειες δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτές των προβλημάτων αστοχίας σε συμβατικά πλοία, όπως δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγρών καυσίμων, και κατατάσσονται στην κατηγορία των μεγάλων οικολογικών καταστροφών.

Σήμερα όμως ο αριθμός των πιθανών πηγών τέτοιων καταστροφών αυξάνεται συνεχώς, και συνεπώς απαιτείται ολοκληρωμένη και μεθοδική αντιμετώπιση. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η μεθοδολογία που έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα δεν επαρκεί για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχουν ανακύψει ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής εξέλιξης (νέα μεγέθη, νέες εφαρμογές). Στο πεδίο της ναυπηγικής οι πιθανοθεωρητικές μέθοδοι βρίσκουν συνεχώς ευρύτερες εφαρμογές.

3.5 Το Κατασκευαστικό Σώμα του Πλοίου (The Ship Girder)

Η καταπόνηση του πλοίου αποτελεί πιθανότατα το πιο δύσκολο και περίπλοκο από όλα τα προβλήματα της μηχανικής κατασκευών από τις παρακάτω απόψεις:

- (α) τον καθορισμό της επιβαλλόμενης φόρτισης,
- (β) την απόκριση της κατασκευής.

Όπως συμβαίνει και με τα περισσότερα πολύπλοκα προβλήματα, είναι απαραίτητο να αναχθεί σε μία σειρά από ανεξάρτητα προβλήματα, τα οποία μπορούν να αντιμετωπισθούν μεμονωμένα και να υπερτεθούν. Τα μικρότερα στοιχεία της

κατασκευής που πρέπει να μελετηθούν είναι οι πλάκες των ελασμάτων (panels of plating) και τα μεμονωμένα ενισχυτικά (single stiffeners), τα οποία στηρίζονται στις άκρες τους από στοιχεία που είναι συγκριτικά πολύ πιο άκαμπτα. Υπόκεινται σε κάθετα και σε φορτία στο επίπεδο των στοιχείων, υπό την επίδραση των οποίων μπορεί να υπολογιστεί η συμπεριφορά τους σε κάμψη, εφελκυσμό και λυγισμό σε σχέση με τα στηρίγματα. Πολλά από αυτά τα μικρά στοιχεία μαζί αποτελούν μεγάλες επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες ελασμάτων και σύνολα ενισχυτικών που ονομάζονται πλέγματα (grillages), στηριζόμενα στα άκρα τους από φρακτές και άκρες καταστρώματος, που είναι συγκριτικά πολύ άκαμπτες. Τέλος, πολλές φρακτές, πλέγματα και καταστρώματα μαζί συνιστούν το ολοκληρωμένο κοίλο σώμα του πλοίου, του οποίου η συμπεριφορά μπορεί να καθοριστεί ως κιβωτοειδής δοκός (box girder).

Εξαιρώντας τα αδρανειακά φορτία λόγω της κίνησης του πλοίου, η φόρτιση του πλοίου προέρχεται από δύο μόνο πηγές, τη βαρύτητα και την άντωση. Είναι αδύνατο να φανταστούμε μία κατάσταση θάλασσας, στην οποία τα φορτία εξαιτίας της βαρύτητας και της πίεσης του νερού αλληλοεξουδετερώνονται κατά μήκος του πλοίου. Ακόμη και σε ήρεμο νερό, κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά απίθανο, πόσο μάλλον σε κυματισμό, οπότε η φόρτιση μεταβάλλεται συνεχώς. Υπάρχει λοιπόν, μία ανομοιόμορφη φόρτιση κατά μήκος του πλοίου και επειδή αυτό είναι μία ελαστική κατασκευή, κάμπτεται. Κάμπτεται σαν ένας ολοκληρωμένος στατικός φορέας, όπως μία δοκός με ελαστική στήριξη και ονομάζεται ship girder.

Τα φορτία στα οποία υπόκειται η συνολική κατασκευή της γάστρας είναι λοιπόν :

- (α) Φορτία που οφείλονται στη διαφορετική διαμήκη κατανομή των δυνάμεων βάρους και των δυνάμεων άντωσης, με το πλοίο στάσιμο σε ήρεμο νερό.
- (β) Τα επιπλέον φορτία που οφείλονται στη διέλευση ομάδας κυμάτων, με το πλοίο να παραμένει στάσιμο.
- (γ) Τα φορτία που οφείλονται στην υπέρθεση των κυμάτων τα οποία δημιουργούνται από την κίνηση του ίδιου του πλοίου σε ήρεμο νερό.
- (δ) Οι διακυμάνσεις της κατανομής του βάρους εξαιτίας των επιταχύνσεων που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου σε κυματισμούς.

Η εφαρμοσμένη μηχανική και τα εφαρμοσμένα μαθηματικά παρέχουν τα κατάλληλα εργαλεία για να γίνει κατανοητή η κατασκευαστική συμπεριφορά του πλοίου. Η διαφορετική οπτική γωνία και οι περιορισμοί των διάφορων θεωριών πρέπει να είναι γνωστά, ώστε οι θεωρίες αυτές να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς.

Συχνά όταν λέμε βέλτιστη σχεδίαση θεωρούμε μία κατασκευή με το ελάχιστο δυνατό βάρος, που να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτούμενες συνθήκες υπηρεσίας. Ενώ ο παράγοντας του βάρους είναι καθοριστικός, σημαντικό ρόλο έχουν επίσης το κόστος και η ευκολία κατασκευής και συντήρησης. Το κόστος αυξάνει ραγδαία, αν χρησιμοποιηθούν υλικά υψηλής ποιότητας. Η κατασκευή γίνεται δύσκολη με τη χρήση μερικών υλικών και ο αυτοματισμός έχει υψηλό κόστος. Είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μεθόδων εκτίμησης των ελάχιστων απαιτήσεων για ασφάλεια έναντι αστοχίας. Η κατασκευή που θα σχεδιαστεί θα πρέπει να αντανakλά όλες τις πλευρές του προβλήματος.

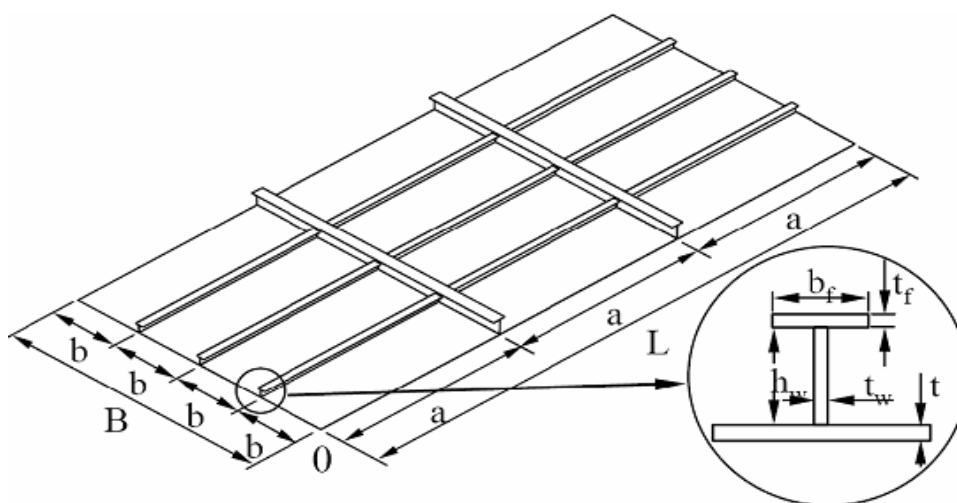
Το πλήρες κατασκευαστικό σώμα του πλοίου (ship girder) παρέχει το πλαίσιο και τα όρια για την τοπική κατασκευαστική σχεδίαση. Οι ανάγκες του πλοίου-δοκού (hull girder) σχετικά με τις επιφάνειες στο κατάστρωμα, την τρόπιδα και τις πλευρές πρέπει να ικανοποιηθούν. Πρέπει να οριστεί η ανάλυσή του σε ελάσματα και ενισχυτικά. Απαιτείται εξέταση επίσης σε μεγάλο μέρος της κατασκευής, το οποίο δε σχετίζεται με τη διαμήκη αντοχή. Τέλος, υπάρχουν ορισμένα εξαρτήματα, τα οποία απαιτούν ειδική και μεμονωμένη σχεδίαση. Πριν από την ανάλυση οποιασδήποτε κατασκευής και οποιουδήποτε εξαρτήματος, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των φορτίων και των κριτηρίων αστοχίας.

3.5.1 Η Κατασκευαστική Διαμόρφωση των Ναυπηγικών Κατασκευών

Οι σύγχρονες ναυπηγικές κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να επιβιώνουν σε περιπτώσεις έκθεσής τους σε ακραίες συνθήκες φορτίσεων (όπως συγκρούσεις, προσαράξεις, εκρήξεις, κ.α). Οι διάφοροι τρόποι κατασκευαστικής αστοχίας οδηγούν στην απώλεια της ακεραιότητας των ναυπηγικών κατασκευών που εκτίθενται σε τέτοιου είδους φορτίσεις, κάτι που εξαρτάται κατά πολύ και από την επιλογή του κατάλληλου κατασκευαστικού υλικού καθώς επίσης και από την κατασκευαστική διαμόρφωση.

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, Εικόνα 3-5.



Εικόνα 3-5: Τυπική κατασκευαστική διαμόρφωση ενισχυμένου ελάσματος πλοίου

Οι φορτίσεις που φέρουν τα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων μπορούν να προκαλέσουν αστοχία και παραμορφώσεις διαφόρων ειδών. Κατά τα αρχικά στάδια φόρτισης τα στοιχεία της κατασκευής υποβάλλονται σε καμπτική φόρτιση. Η διαμήκης κάμψη του πλοίου (καταστάσεις hogging και sagging) προκαλεί ποικίλες φορτίσεις και καταπονεί τα τμήματα από τα οποία αποτελείται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Οι κύριες φορτίσεις που αναπτύσσονται στα καταστρώματα, τον πυθμένα και τις φρακτές είναι ο μονοαξονικός εφελκυσμός και η μονοαξονική θλίψη.

Η μέγιστη αντοχή των ελασμάτων του κατασκευαστικού σώματος των πλοίων είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος τόσο από την άποψη του σχεδιασμού όσο και από την άποψη της ασφάλειας επειδή τα φορτία κατάρρευσης των ελασμάτων μπορούν συχνά να παίζουν το ρόλο του δείκτη της μέγιστης αντοχής ολόκληρης της ενισχυμένης διατομής των πλοίων (Hughes, [20]). Οι μέθοδοι που έχουν προταθεί για το σκοπό αυτό μπορούν να διαιρεθούν σε :

- (i) μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων,
- (ii) πειραματικές μέθοδοι,
- (iii) εμπειρικοί τύποι που είναι βασισμένοι είτε σε αριθμητικά είτε σε πειραματικά αποτελέσματα, και
- (iv) αναλυτικές μέθοδοι και ημι-αναλυτικές προσεγγίσεις.

Όπως περιγράψαμε παραπάνω οι ναυπηγικές κατασκευές υποβάλλονται σε διάφορους τύπους φορτίσεων κατά τη διάρκεια της υπηρεσιακής τους ζωής που μπορούν πολύ συχνά να προκαλέσουν την ανάπτυξη ρωγμών σε συνδυασμό με το δυσμενές περιβάλλον λειτουργίας. Η ανάπτυξη και η διάδοση των ρωγμών αυτών έχει αρνητικές επιπτώσεις στην λειτουργία και την κατασκευαστική ακεραιότητα, την αντοχή και επιβιωσιμότητα των ναυπηγικών κατασκευών. Μια λεπτομερής κατασκευαστική ανάλυση του περιθωρίου ασφαλούς αστοχίας μπορεί να προσφέρει στο σχεδιαστή ένα χρήσιμο εργαλείο προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι ναυπηγικές κατασκευές από άποψη αντοχής και να αυξηθεί σημαντικά η αξιοπιστία τους. Επίσης, η μηχανική της θραύσης οδηγεί στην ποιοτική, αλλά και ποσοτική προσέγγιση της εναπομείνουσας αντοχής και ζωής των ρωγματωμένων κατασκευών.

Οι ρωγμές στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων αποτελεί πάντα ένα θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος και μελέτης. Επειδή το κατασκευαστικό σώμα του πλοίου αποτελείται από πολλά ελάσματα με συνεχείς συγκολλήσεις μεταξύ τους, μια ρωγμή, εάν δεν συλληφθεί εγκαίρως, μπορεί να αυξηθεί και να διαδοθεί για μια μεγάλη απόσταση. Οι ρωγμές μπορούν να διαδοθούν στην κατασκευή των πλοίων κατά ασταθή ή σταθερό τρόπο και σε μήκος που να υπερβαίνει την απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών. Αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο στις ναυπηγικές κατασκευές, όπου η ανεξέλεγκτη αύξηση και διάδοση των ρωγμών μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια ολόκληρης του πλοίου. Επομένως, η σύλληψη των ρωγμών είναι πάντα ένα σημαντικό πεδίο μελέτης για τους ερευνητές, και ακόμα περισσότερο για τις εφαρμογές του αλουμινίου στις ναυπηγικές κατασκευές (Sielski, [21]). Το κλειδί για την διατήρηση της ακεραιότητας των ναυπηγικών κατασκευών είναι βασισμένο στην αποδοχή ότι η ικανότητα επιβίωσης έχει τρία σημαντικά χαρακτηριστικά στοιχεία, τα οποία είναι:

1. Αποφυγή ζημιάς (damage avoidance).
2. Ανοχή ζημιάς (damage tolerance).
3. Επισκευή ζημιάς (damage repair).

Η ανοχή και η αντοχή της κατασκευής στη ζημιά είναι ο κύριος παράγοντας που θα εξεταστεί κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης.

Ως εκ τούτου, είναι πρωταρχική η ανάγκη να γίνει κατανοητή η κατασκευαστική συμπεριφορά των ελασμάτων της γάστρας του πλοίου, τόσο για την αξιολόγηση της ευπάθειας όσο και για την ανάδειξη των τρόπων προστασίας και

αύξησης της ανθεκτικότητας της κατασκευής ενάντια σε κάθε είδους απειλή. Η κατασκευαστική ανάλυση είναι αρκετά σύνθετη περιλαμβάνοντας, την επιβαλλόμενη φόρτιση, την προκαλούμενη παραμόρφωση, τη μη γραμμικότητα του κατασκευαστικού υλικού και την αλληλεπίδραση του ρευστού μέσου (θάλασσα) με την κατασκευή. Η διάδοση και η σύλληψη των ρωγμών είναι ένα σημαντικό ζήτημα κατά την αξιολόγηση της κατασκευαστικής ακεραιότητας.

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 αντιστέκεται σε τυχόν προκαλούμενη ζημιά χωρίς να καταρρεύσει. Η κατασκευή των πλοίων πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παραλαμβάνει τα φορτία που επιβάλλονται από τη θάλασσα καθώς επίσης και να είναι σε θέση να ξεπερνά κάθε ζημιά που μπορεί να καταστρέψει ένα τμήμα της κατασκευής και να πλήξει τη συνοχής της.

Η αυξανόμενη ικανότητα επιβίωσης, το μειωμένο βάρος, και οι μειωμένες συνολικές δαπάνες των πλοιοκτητών (συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης και της επισκευασιμότητας) έχουν τεθεί ως πρωταρχικός στόχος της ναυπηγικής βιομηχανίας για τις μελλοντικές ναυπηγικές κατασκευές.

3.6 Η Αντοχή της Μεταλλικής Κατασκευής των Πλοίων

Από τη στιγμή που θεωρούμε τη δομή των πλοίων σαν άθροισμα πολλών διαφορετικών και ξεχωριστών κατασκευαστικών τμημάτων και στοιχείων ήταν επακόλουθο να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι όταν καθένα ξεχωριστά τμήμα και στοιχείο της κατασκευής ικανοποιεί απόλυτα τα ελάχιστα όρια των απαιτήσεων ασφαλείας, τότε ολόκληρη η κατασκευή πληρεί τους κανονισμούς ασφαλείας. Η επιθυμία εξυγχιτισμού των πλοίων οδήγησε σε νέους τύπους πλοίων, το οποίο αντανακλά τόσο στην ποικιλία των μεταφερόμενων φορτίων όσο και των πολυσύνθετων επιβαλλόμενων φορτίων. Επομένως, με την εμφάνιση των νέων τύπων πλοίων, οι ήδη υπάρχοντες κανονισμοί ασφαλείας ήταν πλέον ανεπαρκείς. Για το

λόγο αυτό οι Νηογνώμονες άρχισαν να αναπτύσσουν νέους κανονισμούς ασφαλείας ώστε αυτοί πλέον να είναι εναρμονισμένοι με την νέα κατάσταση.



Εικόνα 3-6: Τυπική μορφή μέσης τομής μεταλλικής κατασκευής πλοίου

Οι ισχύοντες κανονισμοί ασφαλείας για την αντοχή της κατασκευής της γάστρας αντιστοιχούν στην διαίρεση του προβλήματος αυτού σε τρία επιμέρους προβλήματα. Αυτά είναι :

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

Στο καθένα από τα παραπάνω τρία προβλήματα πρέπει να εφαρμοστούν θεωρητικά τέσσερα κριτήρια ασφαλείας, τα οποία είναι :

- η διαρροή του κατασκευαστικού υλικού,
- ο λυγισμός,
- η κόπωση των στοιχείων και των κατασκευαστικών λεπτομερειών (π.χ. συγκολλήσεις ενισχυτικών) της κατασκευής, και
- η μέγιστη αντοχή της κατασκευής.

Πρακτικά, το κριτήριο της μέγιστης αντοχής, σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς εφαρμόζεται μόνο σε κύρια τμήματα της κατασκευής, όπως για παράδειγμα τα καταστρώματα, οι φρακτές και το κριτήριο της αντοχής σε κόπωση μόνο για τις σχεδιαστικές απαιτήσεις μερικών συνδέσεων της κατασκευής όπως για τις συνδέσεις των διαμήκων ενισχυτικών, γεγονός που μειώνει τον αριθμό των προβλημάτων.

Συχνά ως βέλτιστη σχεδίαση θεωρούμε την επίτευξη μιας κατασκευής με το ελάχιστο δυνατό βάρος η οποία είναι ικανή να φέρει εις πέρας την αποστολή για την οποία σχεδιάστηκε. Συνήθως οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν κάποιες μεθόδους ώστε να αποτιμήσουν εκείνες τις ελάχιστες απαιτήσεις οι οποίες εξασφαλίζουν τη μη αστοχία της κατασκευής. Η θάλασσα επιβάλλει στα διάφορα τμήματα του πλοίου εξαιρετικά υψηλά φορτία τα οποία ακόμα και σήμερα δεν έχουν υπολογιστεί επακριβώς. Συνεπώς, ο προσδιορισμός της κατασκευαστικής αστοχίας και η διασφάλιση της κατασκευής έναντι αυτής είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα που απασχολεί τους κατασκευαστές των πλοίων, οι οποίοι προσπαθούν να το προσεγγίσουν και να το εξετάσουν λαμβάνοντας ταυτόχρονα σοβαρά υπόψη τις επιθυμίες του εκάστοτε πλοιοκτήτη, τους κανονισμούς των Νηογνομόνων, τον τύπο του πλοίου και τέλος την προσωπική τους εμπειρία.

Από κατασκευαστική άποψη υπάρχουν τέσσερις δυνατοί τρόποι για να φτάσει ένα πλοίο στην αστοχία :

- (α) Άμεση θραύση προκαλούμενη κυρίως από κάποιο τμήμα της κατασκευής το οποίο ξεπέρασε την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη ή διάτμηση.
- (β) Θραύση από κόπωση για κατασκευές οι οποίες λειτουργούν σε εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον με επιβαλλόμενα φορτία υψηλών συχνοτήτων.
- (γ) Μειωμένη ευστάθεια.
- (δ) 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.

Έτσι, ο ναυπηγός έχει να επιλύσει πολύ σημαντικά θέματα που έχουν να κάνουν με την δομή του πλοίου αποκλειστικά. Τέτοια είναι η μορφή και η αντοχή των κατασκευαστικών νομέων, οι συνδέσεις και οι συγκολλήσεις των ελασμάτων, η εφαρμογή του κατάλληλου συστήματος και διάταξης ενίσχυσης, η σωστή συνεργασία

ελάσματος – ενισχυτικού και η ομαλή λειτουργία των εξαρτημάτων του πλοίου. Όλα αυτά έχουν εξεταστεί λεπτομερώς για όλων των ειδών τα φορτία που συναντάμε στον τομέα της ναυπηγικής.

3.6.1 Η επιβιωσιμότητα (survivability) των ναυπηγικών κατασκευών

Τα πλοία και γενικά οι ναυπηγικές κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να διατηρούν την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους σε υψηλά επίπεδα μετά από βλάβη ή κάποιο ατύχημα (σύγκρουση, προσάραξη, πιθανή έκρηξη). Ο βασικότερος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση με γνώμονα την επιβίωση της κατασκευής είναι η εναπομείνουσα αντοχή του πλοίου σε κάποια από τις παραπάνω ενδεχόμενες περιπτώσεις.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ευπάθεια και να μην είναι πλέον οι ναυπηγικές κατασκευές ευάλωτες σε οποιαδήποτε βλάβη πρέπει να ληφθούν κάποια ειδικά μέτρα, όπως η ενσωμάτωση προστατευτικού εξοπλισμού για την αντιμετώπιση επικίνδυνων καταστάσεων και η χρήση επιπρόσθετων ενισχυτικών κατασκευαστικών στοιχείων για την αποφυγή της επέκτασης της ζημιάς. Ο σκοπός για τον οποίο σχεδιάζεται κάθε πλοίο καθώς και η λειτουργία του καθορίζουν τα κατώτατα αποδεκτά επίπεδα της ευπάθειας και της αντοχής του για την αποστολή που καλείται να φέρει εις πέρας.

Η ικανότητα επιβίωσης ενός πλοίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σχέδιο υποδιαίρεσής του, έτσι ώστε να μην εξαπλώνεται η προκαλούμενη ζημιά και από τις εφαρμοζόμενες κατασκευαστικές πρακτικές, οι οποίες εξασφαλίζουν την σχεδιαστική ακεραιότητα της κατασκευής. Είναι πολύ σημαντικό κατά την εξέταση του σχεδιασμού ενός πλοίου η επιλογή του συστήματος υποδιαίρεσης που υιοθετείται και εφαρμόζεται. Η έκταση και τα επίπεδα της υποδιαίρεσης έχουν σημαντική επίδραση στην ασφάλεια και την αντοχή (αντίσταση) των πλοίων σε πιθανή ζημιά λόγω κάποιου ατυχήματος. Η πολιτική της υποδιαίρεσης πρέπει να εξετάσει τις πτυχές του σχεδίου των πλοίων από την άποψη της αντίστασης στην κατάκλυση με νερό και στη διάδοση της πυρκαγιάς και του καπνού.

Η επιβιωσιμότητα (survivability) ενός πλοίου ορίζεται ως η ικανότητα του να αφομοιώνει τη ζημιά και να διατηρεί την ακεραιότητα της αποστολής για την οποία έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί. Γενικά, η επιβιωσιμότητα ενός πλοίου έχει ως στόχο να ενισχυθεί και να διατηρηθεί η ετοιμότητα και η λειτουργική ικανότητα κάθε

κατασκευαστικής και λειτουργικής μονάδας του πλοίου σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή βλάβης, με :

1. Μείωση της πιθανότητας ότι τα πλοία θα υποστούν βλάβη ή θα συμμετέχουν σε κάποιο ατύχημα.
2. Αύξηση της δυνατότητας των πλοίων να αντισταθούν στη προκαλούμενη βλάβη ή ζημιά και να αποτρέψουν την εξάπλωσή της.
3. Βελτιώνοντας τις ικανότητες και τις επιδεξιότητες του προσωπικού έτσι ώστε να είναι ικανό να διαχειριστεί με αποτελεσματικότητα την επικίνδυνη κατάσταση αποκαθιστώντας τη ζημιά σε περίπτωση βλάβης ή ατυχήματος και επαναφέροντας τα ζωτικής σημασίας λειτουργικά συστήματα του πλοίου.

Η συνολική ικανότητα επιβίωσης σκαφών (Total Ship Survivability – TSS), είναι μια αναλυτική και μηχανική προσέγγιση της ικανότητας επιβίωσης ενός πλοίου, και εξασφαλίζει μια αποδοτικότερη ενσωμάτωση του όρου της επιβιωσιμότητας στο σχεδιασμό και την κτήση των νέων πλοίων.

Σε περίπτωση ατυχήματος ή βλάβης, το πλοίο συνεχίζει να λειτουργεί ελαχιστοποιώντας την σοβαρότητα της προκαλούμενης ζημιάς και περιορίζοντας την εξάπλωσή της, παρέχοντας την απαιτούμενη ασφάλεια και ανακτώντας άμεσα και αποδοτικά τον έλεγχο ολόκληρου του πλοίου και των λειτουργιών του. Αν όλα τα παραπάνω αποτύχουν τότε το πλοίο πρέπει να εξασφαλίζει την εύκολη και ασφαλή εγκατάλειψή του από το πλήρωμα και τους επιβάτες.

Τα εφόδια για την ελαχιστοποίηση των καταστροφικών συνεπειών σε τέτοιες περιπτώσεις είναι σε συνάρτηση με τον σχεδιασμό του κάθε πλοίου. Σε αυτό συμβάλλουν η διαμερισματοποίηση του πλοίου, η αφθονία και η κατανομή των απαραίτητων συστημάτων καθώς και η σωστή επιλογή κατασκευαστικού υλικού και η θωράκιση και ενίσχυση της κατασκευής. Κατόπιν, το πλήρωμα αποτρέπει την περαιτέρω επέκταση της ζημιάς, όπως από κατάκλυση και πυρκαγιά, για να σώσει το πλοίο, και ανακτά τις λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της ελκτικής ικανότητας του πλοίου και της εφεδρικής του πλευστότητας. Τα πλοία πρέπει να είναι πιο ανεξάρτητα και αυτάρκη ως προς τον περιορισμό των ζημιών και την αποκατάσταση των λειτουργιών επειδή οι μέθοδοι που βασίζονται στον ανθρώπινο παράγοντα δεν θα είναι πάντα δυνατές.

Η επιβιωσιμότητα και η αξιοπιστία των πλοίων που έχουν υποστεί ζημιές μετά από σύγκρουση και προσάραξη έχουν μελετηθεί από τους Fang και Das [22]. Η πιθανότητα αστοχίας των πλοίων που έχουν υποστεί ζημιές ποικίλει ανάλογα με τον διαφορετικό τύπο, θέση και έκταση της ζημιάς και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες της θάλασσας. Η ανάλυση όμως όλων των παραπάνω παραγόντων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο κίνδυνος, δηλαδή η πιθανότητα αστοχίας ενός πλοίου, που προκαλείται από την προσάραξη είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που προκύπτει λόγω σύγκρουσης δύο πλοίων.

Η σχεδίαση των πλοίων δεν πρέπει απλά να ικανοποιεί τους απαιτούμενους κανονισμούς. Θα ζητηθεί από τους σχεδιαστές να παρουσιάσουν ένα σενάριο ασφαλείας (safety case), ώστε να αποδείξουν ότι έχουν εντοπίσει έξυπνα όλες τις επικίνδυνες καταστάσεις και ότι έχουν κάνει κάθε προσπάθεια για να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Η κρίση για την κάθε περίπτωση βασίζεται στη διακρινόμενη επικινδυνότητα, η οποία είναι μια σύνθεση της πιθανότητας ενός γεγονότος και των συνεπειών του. Υπάρχουν ξεκάθαρα βήματα στην ανάπτυξη του σεναρίου ασφαλείας :

- (α) Αναγνώριση όλων των κινδύνων (hazards) και της πιθανότητάς τους.
- (β) Αναγνώριση των συνεπειών και της διαβλεπόμενης επικινδυνότητας (risks).
- (γ) Εφαρμογή συστημάτων περιορισμού ή ελέγχου των κινδύνων και των συνεπειών, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάλειψης, της διαφυγής και της διάσωσης.
- (δ) Έκδοση κωδικών πρακτικής και επικοινωνίας, οι οποίοι αποτελούν το σύστημα διαχείρισης ασφαλείας (safety management system).
- (ε) Θεώρηση των μέσων ελέγχου του συστήματος διαχείρισης ασφαλείας.

Οι κύριοι κίνδυνοι στους οποίους εκτίθεται το πλοίο ως σύνολο είναι η κατάκλυση, η φωτιά και η έκρηξη, η απώλεια πηδαλιουχίας, η αστοχία της κατασκευής και η ανατροπή σε μια θαλασσοταραχή. Κάθε ένα από τα παραπάνω απαιτεί σαφή και μεμονωμένη μελέτη.

Τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία ελέγχονται τα νέα πλοία, εξάγονται όχι μόνο από τον αρχικό στόχο αλλά και από τους περιορισμούς μέσα στους οποίους θα αναζητηθεί η σχεδιαστική λύση, όπως είναι οι εθνικοί κανονισμοί ασφαλείας, το διεθνές δίκαιο και η αξιοπιστία. Έτσι, θα υπάρχουν κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιηθούν σε σχέση με την ευστάθεια, την κατασκευαστική συμπεριφορά, τον

έλεγχο της μόλυνσης, τη συμπεριφορά σε κυματισμούς, τις συνθήκες διαβίωσης, την ελκτική ικανότητα, το εσωτερικό περιβάλλον και την προστασία από κινδύνους, καθώς και ως προς την ταχύτητα και το μεταφερόμενο φορτίο.

3.6.2 Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των ναυπηγικών υλικών

Είναι πολύ σημαντικό να τονίσουμε ότι η κατανόηση της σημασίας των ιδιοτήτων των ναυπηγικών υλικών είναι απαραίτητη, για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε το πώς θα ληφθούν υπόψη.

Η επιλογή των υλικών για μια δεδομένη ναυπηγική κατασκευή ανάγεται, κατά κάποιο τρόπο, στο πρόβλημα του καθορισμού των χαρακτηριστικών εκείνων που σε συνδυασμό, είναι τα πιο κατάλληλα για τη θεωρούμενη εφαρμογή. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού ο μελετητής πρέπει να κατέχει σε βάθος τόσο τις ιδιότητες των διαφόρων υπαρχόντων υλικών, όσο και τις λειτουργικές απαιτήσεις των ναυπηγικών κατασκευών. Η τελευταία αυτή απαίτηση γίνεται σαφέστερη, αν αναλογιστεί κανείς τη μεγάλη ποικιλία εφαρμογών που συναντώνται στη ναυπηγική, το εύρος του φάσματος κατασκευαστικών απαιτήσεων κάθε εφαρμογής και τις ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος, όπου οι κατασκευές αυτές υπάρχουν και λειτουργούν.

Σημειώνεται ότι, παρά το γεγονός ότι ο μελετητής έχει σχετική ελευθερία επιλογής υλικών, η επιλογή αυτή υπόκειται σε ορισμένες προδιαγραφές και ελέγχους που επιβάλλονται από εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς οργανισμών, που στην περίπτωση της ναυπηγικής είναι κατά κύριο λόγο οι Νηογνώμονες.

Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων ιδιοτήτων που πρέπει να έχουν τα υλικά, ώστε να είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε στοιχεία αντοχής της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων.

1. Λόγος αντοχής – βάρους

Το ειδικό βάρος είναι συνήθως σημαντικό χαρακτηριστικό ενός υλικού, επειδή το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου αποτελεί σχεδόν πάντα πολύ κρίσιμο στοιχείο στη διαδικασία της μελέτης. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο το ειδικό βάρος από μόνο του, όσο ο λόγος αντοχής προς βάρος. Αυτός εκφράζεται από το λόγο του ορίου διαρροής ή της τάσης θραύσης προς το

ειδικό βάρος. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται όποτε απαιτείται η επίτευξη ορισμένης αντοχής για το ελάχιστο βάρος κατασκευής.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα, που δείχνει τη σημασία της παραμέτρου αυτής, είναι η συνεχιζόμενη ερευνητική δραστηριότητα για την παρασκευή χαλύβων πολύ υψηλής αντοχής. Σημειώνεται ότι η δραστηριότητα αυτή δεν κατευθύνεται τόσο στην επίτευξη της επιθυμητής υψηλής αντοχής, κάτι που είναι σήμερα δυνατό με βάση τις γνώσεις μας από την επιστήμη των υλικών, όσο στην απαλοιφή των διαφόρων μειονεκτημάτων που συνοδεύουν τα υλικά υψηλής αντοχής. Μεταξύ αυτών αναφέρονται το υψηλό κόστος, τα προβλήματα συγκόλλησης και η χαμηλή δυσθραυστότητά τους.

2. Δυσθραυστότητα

Η δυσθραυστότητα (fracture toughness) αποτελεί ένα μέτρο της ικανότητας του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν τη θραύση του, παραμορφώμενο πλαστικά. Αυτή η αντίσταση του υλικού σε θραύση εκφράζεται στη διεθνή τεχνική βιβλιογραφία με διάφορους όρους, όπως ολκιμότητα (ductility), δυσθραυστότητα κατ' εγκοπή (notch toughness) και δυσθραυστότητα ή στερρότητα. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η απορροφούμενη ενέργεια πριν τη θραύση, τόσο πιο όλκιμο ή πιο δύσθραυστο είναι το υπ' όψη υλικό.

Στο σημείο αυτό αρκεί να αναφερθεί ότι η δυσθραυστότητα είναι συνήθως σημαντικό πρόβλημα στην περίπτωση υλικών υψηλής αντοχής, επειδή παρατηρείται η γενική τάση να μειώνεται η δυσθραυστότητα με αύξηση της αντοχής. Επιπλέον, η ιδιότητα αυτή είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση που η κατασκευή λειτουργεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, λόγω της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα.

3. Αντοχή σε κόπωση

Είναι πιθανόν φορτία ή παραμορφώσεις, που δεν προκαλούν θραύση του υλικού αν εφαρμοστούν μια μόνο φορά, να οδηγήσουν σε θραύση στην περίπτωση επαναληπτικής εφαρμογής τους. Ο μηχανισμός της θραύσης σε εναλλασσόμενη καταπόνηση ή της θραύσης από κόπωση (fatigue fracture), είναι αρκετά πολύπλοκος. Σε γενικές γραμμές όμως, συνίσταται στη δημιουργία μικρών ρωγμών, συνήθως

επιφανειακών, και στην προοδευτική αύξησή τους υπό την επίδραση εναλλασσόμενης καταπόνησης. Στη ναυπηγική ενδιαφέρει επίσης το φαινόμενο της κόπωσης σε διαβρωτικό περιβάλλον (corrosion fatigue).

4. Αντοχή σε διάβρωση και σε διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές οι οποίες έρχονται σε επαφή με το θαλασσινό νερό πρέπει να έχουν ικανή αντοχή σε διάβρωση (corrosion) και σε διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση (stress corrosion cracking).

Με τον όρο διάβρωση εννοείται κάθε αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, η οποία οδηγεί σε απώλεια υλικού και που οφείλεται στην ενέργεια χημικών ή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση αναφέρεται στο φαινόμενο της ψαθυρής θραύσης του υλικού κάτω από τη συνδυασμένη επίδραση διαβρωτικού περιβάλλοντος και μηχανικών τάσεων.

5. Άλλες ιδιότητες

Άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες που αξίζουν ιδιαίτερη προσοχή για τα ναυπηγικά υλικά είναι η ευχέρεια συγκόλλησης, η ευχέρεια διαμόρφωσης, το κόστος, η ευχέρεια ανεύρεσης, η διαδικασία συντήρησης, κ.α.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η βέλτιστη επιλογή του υλικού για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να είναι αποτέλεσμα συστηματικής διερεύνησης όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή, το βάρος, την ασφάλεια και το κόστος της κατασκευής.

3.7 Θεωρήσεις των Υλικών

Μια συγκέντρωση τάσεων παρουσιάζεται σε μία περιορισμένη περιοχή στην κατασκευή, όπου η τάση είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτήν του περιβάλλοντος υλικού και μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητή ως μία διαταραχή ή ασυνέχεια στην

ομαλή ροή των γραμμών της τάσης. Υπάρχουν δύο ειδών ασυνέχειες που προκαλούν συγκέντρωση τάσεων στις ναυπηγικές κατασκευές :

- (α) Ασυνέχειες που δημιουργήθηκαν στα πλοία ακούσια από τις μεθόδους κατασκευής, όπως εξέλαση, συγκόλληση, χύτευση.
- (β) Ασυνέχειες που έχουν εισαχθεί ηθελημένα στο κατασκευαστικό σχέδιο για λόγους αρχιτεκτονικούς, χρηστικούς, πρόσβασης, όπως ανοίγματα κυτών, υπερκατασκευές, ανοίγματα θυρών, κ.α.

Οι συγκεντρώσεις των τάσεων δεν μπορούν να αποφευχθούν εντελώς είτε με καλό σχεδιασμό είτε με υψηλές προδιαγραφές ποιότητας εργασίας, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία σημαντική επιρροή στον καθορισμό των αποδεκτών επιπέδων τάσεων. Οι επιδράσεις τους όμως μπορούν να ελαττωθούν δίνοντας προσοχή και στα δύο ανωτέρω, αλλά είναι σημαντικό να εντοπίζονται οι επιδράσεις της συγκέντρωσης τάσεων στο κατασκευαστικό σώμα του πλοίου. Γενικά, οι συγκεντρώσεις των τάσεων μπορεί να προκαλέσουν διαρροή, ψαθυρή θραύση ή λυγισμό.

Υπάρχει σε κάποιο ποσοστό η σχετική θεωρία που μπορεί να καθοδηγήσει το σχεδιαστή, αλλά μία γενική κατανόηση του πώς εμφανίζονται τέτοια φαινόμενα είναι πιο σημαντική για τη διάκριση και την αντιμετώπισή τους, διότι πολλά μπορούν να αποφευχθούν ή να ελαχιστοποιηθούν κατά το στάδιο του λεπτομερούς σχεδιασμού.

3.8 Η Φύση της Αστοχίας των Ναυπηγικών Κατασκευών

Η κατασκευαστική αστοχία των πλοίων μπορεί να επέλθει ως αποτέλεσμα ποικίλων αιτιών και ο βαθμός και η δριμύτητα της αστοχίας μπορεί να ποικίλει, από μια δευτερεύουσα αισθητική υποβάθμιση της κατασκευής έως την καταστροφική αστοχία με συνέπεια τη συνολική απώλεια του πλοίου.

Η αστοχία μίας κατασκευής μπορεί να σημαίνει μόνιμη παραμόρφωση, θραύση, μη αποδεκτές μετατοπίσεις, αστάθεια, σύντομη ζωή ή ακόμα και συντονισμένους κραδασμούς. Μερικά από αυτά τα κριτήρια μετρώνται κατάλληλα σε σχέση με την τάση, η οποία είναι ένα πολύ χρήσιμο μέτρο εκτίμησης της συμπεριφοράς ενός υλικού, το οποίο μπορεί να αστοχήσει με πολλούς διαφορετικούς τρόπους.

Έχοντας αποφασίσει για τη φόρτιση, το επόμενο βήμα είναι να αποφασίσουμε σχετικά με την τελική συμπεριφορά, η οποία καλείται αστοχία. Κατασκευαστική αστοχία του πλοίου θεωρούμενου ως δοκού μπορεί να οφείλεται σε μία από τις παρακάτω αιτίες ή συνδυασμό αυτών :

1. Διαρροή του υλικού λόγω εφελκυστικής τάσης (plasticity).
2. Θλιπτικές φορτίσεις που οδηγούν σε αστάθεια (instability) και λυγισμό (buckling).
3. Άμεση αστοχία λόγω ρωγμάτωσης που περιλαμβάνει την όλκιμη θραύση, την ψαθυρή θραύση και την θραύση λόγω κόπωσης χαμηλής συχνότητας – υψηλής τάσης και υψηλής συχνότητας – χαμηλής τάσης.
4. Μη αποδεκτή παραμόρφωση.

Η διαρροή εμφανίζεται όταν η τάση σε ένα κατασκευαστικό στοιχείο υπερβαίνει μια τιμή που οδηγεί σε μια μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Αυτή η τιμή της τάσης ονομάζεται τάση διαρροής του υλικού. Σε μια κάπως υψηλότερη τιμή της τάσης, που καλείται μέγιστη τάση ή τάση θραύσης, συμβαίνει η θραύση του υλικού. Ενώ πολλά σχεδιαστικά κριτήρια της κατασκευής βασίζονται στην πρόληψη οποιασδήποτε διαρροής του υλικού, πρέπει να παρατηρηθεί ότι η τοπική διαρροή του υλικού σε κάποια τμήματα της κατασκευής είναι αποδεκτή χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία.

Η αστοχία λόγω αστάθειας και λυγισμού ενός κατασκευαστικού στοιχείου υπό θλιπτική φόρτιση μπορεί να εμφανιστεί σε μία τιμή τάσης που είναι ουσιαστικά χαμηλότερη από την τάση διαρροής του υλικού. Το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται η αστάθεια και ο λυγισμός είναι σε συνάρτηση της γεωμετρίας του κατασκευαστικού στοιχείου και του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, δηλαδή εξαρτάται περισσότερο από τη λυγηρότητα (λόγος b/t πλάτους προς πάχος), παρά από την αντοχή του υλικού. Ένα έλασμα υπό θλίψη θα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός κρίσιμου φορτίου λυγισμού του οποίου η τιμή εξαρτάται από το πάχος του ελάσματος, τις διαστάσεις των πλευρών του, τις συνθήκες στήριξης των άκρων του και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Η μικρή υπέρβαση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού δεν θα οδηγήσει απαραίτητα στην πλήρη κατάρρευση ολόκληρου του ελάσματος αλλά μόνο σε μία ελαστική εκτροπή του κεντρικού τμήματος του ελάσματος μακριά από το αρχικό του

επίπεδο, στην ανάπτυξη δηλαδή βέλους κάμψης. Μετά από την αφαίρεση του φορτίου, το έλασμα μπορεί να επιστρέψει στην αρχική μη-παραμορφωμένη μορφή του (για την περίπτωση του ελαστικού λυγισμού).

Η πρόβλεψη του φορτίου ελαστικού λυγισμού συνιστά το πρώτο στάδιο της περιγραφής της συμπεριφοράς των ναυπηγικών ελασμάτων υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίσεων που μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια.

Για τη συνήθη γεωμετρία των ναυπηγικών ελασμάτων (λόγο λυγηρότητας $80 > b/t > 30$), η τάση ελαστικού λυγισμού που προκύπτει υπερβαίνει την τάση διαρροής. Αυτό σημαίνει φυσικά ότι δεν θα προκύψει ελαστικός λυγισμός καθώς θα προηγηθεί πλαστικοποίηση του υλικού, σε ορισμένες τουλάχιστον περιοχές του ελάσματος. Τα ναυπηγικά ελάσματα αστοχούν συνεπώς συνήθως με ανελαστικό λυγισμό. Το γεγονός αυτό προσδίδει ένα πρόσθετο βαθμό δυσκολίας στην λύση του προβλήματος προσδιορισμού της τάσης λυγισμού και της μέγιστης αντοχής των ναυπηγικών ελασμάτων.

Μια περιορισμένη παραμόρφωση μπορεί να προκαλέσει φυσικό πρόβλημα στο μηχανοστάσιο ή μπορεί απλώς να προκαλέσει ανησυχία στους επιβάτες, αν και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει κίνδυνος. Από υπερβολική παραμόρφωση μπορεί να διαταραχθεί η ευθυγράμμιση μηχανημάτων. Τέτοιου είδους παραμόρφωση μπορεί να συμβεί στην ελαστική ή στην ελαστοπλαστική περιοχή. Η αντοχή μιας κατασκευής μπορεί να προκαλέσει αύξηση των κραδασμών και των ταλαντώσεων σε μία συχνά χρησιμοποιούμενη συχνότητα. Οποιοδήποτε από τα παραπάνω μπορεί να προκαλέσει αστοχία.

Η άμεση αστοχία μπορεί να προκληθεί, όταν ένα τμήμα της κατασκευής πλησιάσει τη μέγιστη εφελκυστική, θλιπτική, διατμητική ή θραυστική (crushing) τάση. Εκτός αν μεταλλουργικοί ή γεωμετρικοί παράγοντες αναστέλλουν τη διαδικασία, ένα κατά τα άλλα εύκαμπτο υλικό μπορεί να αστοχήσει με απότομο τρόπο πριν από την φυσιολογικά αναμενόμενη ονομαστική αντοχή.

Η πρόληψη και η αποτροπή της ψαθυρής θραύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του υλικού και από την απαιτούμενη προσοχή στον σχεδιασμό των κατασκευαστικών λεπτομερειών προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκεντρώσεις τάσεων. Ο έλεγχος της ψαθυρής θραύσης επιτυγχάνεται από έναν συνδυασμό σχεδιαστικών κριτηρίων και επιθεώρησης που στοχεύουν στην πρόληψη των συγκεντρώσεων τάσεων και από την επιλογή του κατάλληλου κατασκευαστικού υλικού με υψηλό βαθμό δυσθραυστότητας κατ' εγκοπή, ειδικά στις χαμηλές

θερμοκρασίες. Ο ποιοτικός έλεγχος κατά τη διάρκεια της κατασκευής και η επιθεώρηση κατά την διάρκεια της λειτουργίας οδηγούν στην αποτροπή της αστοχίας μιας κατασκευής λόγω ψαθυρής θραύσης.

Όσο μεγαλύτερες είναι οι ρωγμές που αναπτύσσονται τόσο πιο επικίνδυνες είναι για την κατασκευαστική ακεραιότητα του πλοίου. Η υψηλή δυσθραυστότητα των σύγχρονων χαλύβδινων πλοίων απέτρεψε γενικά την αιφνίδια ψαθυρή θραύση, έτσι οι ρωγμές έπρεπε να αυξηθούν σε ιδιαίτερα μεγάλα μήκη προτού να δημιουργήσουν σοβαρά κατασκευαστικά προβλήματα. Μεγάλος όγκος ερευνών πραγματοποιείται για να προβλέψει την έναρξη και την ανάπτυξη τέτοιων ρωγμών προκειμένου να καθοριστούν οι κανόνες που απαιτούνται για τη σωστή εκτίμηση της αστοχίας από θραύση λόγω ρωγμάτωσης.

3.9 Το Φαινόμενο της Θραύσης στις Ναυπηγικές Κατασκευές

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.

Ένα υλικό αστοχεί όταν παύει να συμπεριφέρεται κατά τον προϋπολογισμένο και επιθυμητό τρόπο, δηλαδή μεταβαίνει σε άλλη ποιότητα. Η συνθήκη που διακρίνει την επιθυμητή από την ανεπιθύμητη κατάσταση (ποιότητα) του υλικού καλείται συνθήκη ή κριτήριο αστοχίας.

Στην απλή περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού, δηλαδή μία τάση και μία παραμόρφωση, η συνθήκη αστοχίας μπορεί να διατυπωθεί με μια ισότητα ανάμεσα στην επιβαλλόμενη τάση ή παραμόρφωση και στην μέγιστη επιτρεπτή τάση ή παραμόρφωση, αντιστοίχως. Όταν η επιβαλλόμενη τάση ή παραμόρφωση γίνει ίση με την μέγιστη επιτρεπτή της τότε το υλικό βρίσκεται στην τομή επιθυμητών και ανεπιθύμητων καταστάσεων.

Η μέγιστη επιτρεπτή τάση μπορεί να είναι το όριο αναλογίας, το όριο διαρροής, το σημείο μέγιστου φορτίου ή η τάση θραύσεως, ενός όλκιμου ή ψαθυρού υλικού.

Η κλασική μηχανική της θραύσης προσφέρει τις μεθόδους για την πρόβλεψη της έναρξης και της διάδοσης των ρωγμών σε ομοιογενή τέλεια ελάσματα. Όμως οι

πραγματικές κατασκευές των πλοίων περιπλέκονται από την παρουσία ρωγμών και άλλων σφαλμάτων, ενισχυτικών και περιοχών συγκέντρωσης παραμενουσών τάσεων από τη διαδικασία συγκόλλησης ή εξέλασης αυτών των ενισχυτικών. Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να μελετηθούν οι τρόποι ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα πλοίων. Αυτή η εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραμάτων κατά τα οποία οι δημιουργούμενες ρωγμές διαδίδοντας σε ελάσματα αλουμινίου με εξελασμένα (extruded) ή συγκολλητά (welded) ενισχυτικά.

Επομένως, για την αξιολόγηση των πλοίων και γενικότερα των ναυπηγικών κατασκευών, ιδιαίτερα με τη παρουσία υπάρχουσών ρωγμών, απαιτείται κάποια μέθοδος για την πρόβλεψη και εκτίμηση της συμπεριφοράς αυτών των ρωγμών. Η έρευνα που περιλαμβάνεται σε αυτήν την εργασία στρέφεται στην ανάπτυξη των προτύπων διάδοσης των ρωγμών για την πρόβλεψη τους στη δυσμενέστερη κατάσταση διάδοσης σε συγκολλητά και εξελασμένα ενισχυμένα ελάσματα αλουμινίου, τα οποία αποτελούν συνήθη κατασκευαστικά στοιχεία στις σύγχρονες ναυπηγικές κατασκευές.

3.10 Οι Βασικές Αρχές της Θραύσης

Η φύση της θραύσης διαφέρει από υλικό σε υλικό, ενώ πολλές φορές επηρεάζεται από το είδος της επιβαλλόμενης τάσης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, τη θερμοκρασία και το ρυθμό μεταβολής της εντατικής κατάστασης. Ακόμα, ο διαφορετικός τύπος θραύσης, ο οποίος παρατηρείται σε όλκιμα (ductile) και ψαθυρά (brittle) υλικά κάτω από την επίδραση εναλλασσόμενων τάσεων ή υψηλών θερμοκρασιών, προέρχεται από διαφορές στους τρόπους έναρξης και διάδοσης της ρωγμής στις δύο αυτές περιπτώσεις.

3.11 Διακρυσταλλικές και Ενδοκρυσταλλικές Θραύσεις

Οι θραύσεις σε πολυκρυσταλλικά υλικά διακρίνονται σε ενδοκρυσταλλικές (transgranular) και διακρυσταλλικές (intergranular). 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 είναι χαρακτηριστική της συμπεριφοράς των υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, οι θραύσεις ερπυσμού (creep fracture), οι οποίες συμβαίνουν υπό την επίδραση παρατεταμένης φόρτισης σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι συνήθως διακρυσταλλικές. Αυτό το είδος θραύσης παρατηρείται ακόμα στο μέταλλο συγκόλλησης κατά τη στερεοποίησή του και στην ισχυρά θερμαινόμενη ζώνη συγκολλήσεων, όπου είναι συνήθης η δημιουργία τηγμένων ζωνών κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Διακρυσταλλικές θραύσεις δημιουργούνται ακόμα σε χάλυβες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος κάτω από τη συνδυασμένη επίδραση τάσεων και συγκεκριμένου περιβάλλοντος. Παράδειγμα της τελευταίας αυτής περίπτωσης είναι η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση (stress corrosion cracking). Στην κατηγορία των ενδοκρυσταλλικών θραύσεων ανήκουν η ψαθυρή και η όλκιμη θραύση, καθώς και η θραύση από κόπωση.

3.11.1 Θραύσεις κατ' αποχωρισμό και κατ' ολίσθηση

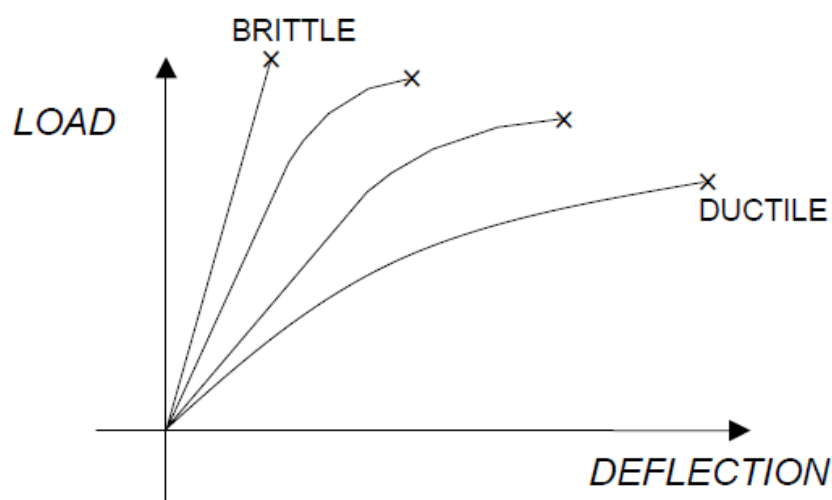
Γενικά ως αστοχία ορίζουμε την οριστική λύση της συνέχειας ενός σώματος και τον σχηματισμό δύο τουλάχιστον νέων σωμάτων. Η λύση της συνέχειας του υλικού σώματος μπορεί να επιτευχθεί με δύο κύριους μηχανισμούς θραύσης:

(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.

3.11.2 Ψαθυρά και όλκιμα υλικά

Όταν το εντατικό πεδίο που δημιουργούν στο υλικό τα εξωτερικά φορτία παραβιάζει τα όρια που θέτουν τα κριτήρια αστοχίας, τότε το υλικό αστοχεί, δηλαδή διαρρέει αν είναι όλκιμο ή θραύεται εάν είναι ψαθυρό. Στα ψαθυρά υλικά η περαιτέρω μελέτη έγκειται στην αναζήτηση των αιτιών που οδήγησαν την κατασκευή σε αστοχία χωρίς άλλη δυνατότητα. Τα όλκιμα υλικά παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα να μπορούν να αναπτύξουν μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις μετά τη διαρροή, πλεονέκτημα που τους επιτρέπει να «χαλαρώσουν» και να προσαρμοστούν στις δύσκολες εξωτερικές συνθήκες.



Εικόνα 3-7: Παρουσίαση της σταδιακής αύξησης της ικανότητας των υλικών να αναπτύσσουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις στις επιβαλλόμενες τάσεις καθώς αυξάνεται η ολκιμότητά τους

Τα υλικά αντιδρούν στα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία αναπτύσσοντας παραμορφώσεις. Αυτή η γενική ποιοτική συμπεριφορά έχει έντονη ποσοτική διακύμανση. Δηλαδή, για τα ίδια εξωτερικά φορτία ένα υλικό μπορεί να αναπτύξει πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις από κάποιο άλλο, Εικόνα 3-7. Υλικά που έχουν την ικανότητα αναπτύξεως μεγάλων παραμορφώσεων στην πλαστική περιοχή καλούνται όλκιμα. Επειδή η εκτίμηση της ικανότητας αυτής δεν είναι πρακτικά εύκολη, υπάρχουν δύο μεγέθη τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό της ολκιμότητας ενός υλικού. Το ένα, και ευκολότερα μετρούμενο, είναι η επιμήκυνση θραύσεως, και ο άλλος είναι ο υπολογισμός της ελαττώσεως του εμβαδού της διατομής (δημιουργία λαιμού) κατά την στιγμή της θραύσεως. Η

ελάττωση της διατομής ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της παρούσης διατομής μετά την θραύση, προς το εμβαδόν της αρχικής διατομής.

Αντιθέτως, υλικά που έχουν ασήμαντη ικανότητα αναπτύξεως παραμορφώσεων στην περιοχή αυτή ονομάζονται ψαθυρά.

Ο ορισμός αυτός, ψαθυρών και όλκιμων υλικών απαιτεί ορισμένες παρατηρήσεις :

- (α) Δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος ορισμού της έννοιας «μεγάλη» ή «μικρή» παραμόρφωση. Μπορεί μόνο να λεχθεί ότι το ένα υλικό είναι ψαθυρότερο ή όχι από το άλλο, μόνο συγκριτικά. Επομένως, οι έννοιες ψαθυρότητα και όλκιμότητα είναι σχετικές.
- (β) Εκείνο που έχει σημασία είναι οι πλαστικές παραμορφώσεις και έτσι γίνεται διάκριση μεταξύ ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων.
- (γ) Δεν υπάρχει τρόπος χαρακτηρισμού ενός υλικού ως ψαθυρού ή όλκιμου με μόνη τη γνώση των βασικών μηχανικών του ιδιοτήτων, δηλαδή (K, G) ή (E, ν). Ο χαρακτηρισμός γίνεται μόνο με πειραματικό τρόπο.

Τρεις είναι οι παράγοντες που επιδρούν στις αναπτυσσόμενες από το υλικό παραμορφώσεις. Αυτοί είναι :

- (α) Το είδος των επιβαλλόμενων εξωτερικών φορτίων που οδηγεί σε διαφορετική κατανομή ορθών και διατμητικών τάσεων.
- (β) Η ταχύτητα επιβολής των εξωτερικών φορτίων, στατική ή δυναμική καταπόνηση.
- (γ) Η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό την στιγμή της φόρτισης.

3.11.3 Ψαθυρή και όλκιμη αστοχία

Τα υλικά επομένως μπορούν να αστοχήσουν είτε με θραύση κατ' αποχωρισμό είτε με θραύση κατ' ολίσθηση είτε πράγμα που είναι και συνηθέστερο, με έναν ενδιάμεσο μικτό τρόπο. Ο τρόπος αστοχίας ενός υλικού εξαρτάται από την όλκιμότητα του υλικού, η οποία με την 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.

Σε συνθήκες μικρής ή αμελητέας ολκιμότητας 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 διαδόσεως του ήχου στο υλικό, κατά ασταθή τρόπο.



α) Αρχικό στάδιο κατάρρευσης



β) Συνέχιση κατάρρευσης



γ) Αποχωρισμός του πλοίου σε δύο τμήματα



δ) Βύθιση του πλοίου

Εικόνα 3-8 : Τελική κατάρρευση, κοπή σε δύο τμήματα και βύθιση του πλοίου

«Ασταθής» στην περίπτωση αυτή σημαίνει ότι άπαξ και ξεκινήσουν, απομακρυνθούν δηλαδή από μια κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας, δεν σταματούν παρά μόνο όταν ολοκληρωθεί η θραύση του υλικού, δηλαδή ενδιάμεσως κατά τη διάρκεια της διαδόσεώς τους δεν υπάρχει άλλη κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας. Αυτό είναι εύλογο και από το κριτήριο του Griffith όπου παρατηρούμε από τη σχέση:

$$[\text{τάση}] = \frac{[\text{συντελεστής έντασης τάσης}]}{[\text{χαρακτηριστικό μήκος}]^{1/2}}$$

όπου με βάση την αρχική θεωρία θραύσης του Griffith, ως χαρακτηριστικό μήκος λαμβάνεται το μήκος της ρωγμής, πως όσο μεγαλώνει το μήκος της ρωγμής τόσο μικραίνει η απαιτούμενη τάση για την περαιτέρω επέκταση της ρωγμής.

Στις περισσότερες σχεδιαστικές εφαρμογές ένα υλικό που επιδεικνύει όλκιμη θραύση συνήθως προτιμάται για πολλούς λόγους. Πρώτα απ' όλα, η ψαθυρή θραύση επέρχεται πολύ γρήγορα και με πολύ καταστροφικές συνέπειες χωρίς οποιαδήποτε προειδοποίηση. 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 την διόρθωση και επίλυση του προβλήματος. Κατά δεύτερον, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, απαιτείται περισσότερη ενέργεια παραμόρφωσης για να επέλθει όλκιμη θραύση. Επομένως, τα όλκιμα υλικά θεωρούνται ως υλικά που «συγχωρούν», επειδή λόγω της υψηλής τους δυσθραυστότητας τυχόν 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.

Η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι οι κύριες ανησυχίες για τη σχεδίαση των υλικών, αλλά προκειμένου να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι πρέπει να υπάρξει μια βαθιά και λεπτομερής κατανόηση του φαινομένου της θραύσης, τόσο της όλκιμης όσο και της ψαθυρής. Η κατανόηση της θραύσης και της αστοχίας των υλικών θα συμβάλει στην εξέλιξη και την ανάπτυξη ασφαλέστερων και πιο αξιόπιστων κατασκευαστικών υλικών.

3.11.4 Ιστορικό της ψαθυρής θραύσης των συγκολλητών κατασκευών

Είναι ιστορικά γνωστό ότι ψαθυρές θραύσεις μεταλλικών κατασκευών παρουσιάζονται από τα μέσα του 19ου αιώνα, όταν άρχισε η ευρεία χρήση μετάλλων και κυρίως του χάλυβα. Ο αριθμός των ατυχημάτων που συνέβαιναν την εποχή εκείνη από το αίτιο αυτό ήταν υπερβολικά υψηλός. Με την ανάπτυξη και εφαρμογή όμως βελτιωμένων μεθόδων παραγωγής και με καλύτερη γνώση των ιδιοτήτων των κατασκευαστικών υλικών παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των θραύσεων.

Το πρόβλημα παρουσιάστηκε πάλι κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου με την εισαγωγή της συγκόλλησης στη μαζική ανέγερση μεταλλικών κατασκευών. Από τα 5.000 περίπου εμπορικά πλοία, που κατασκευάστηκαν στις

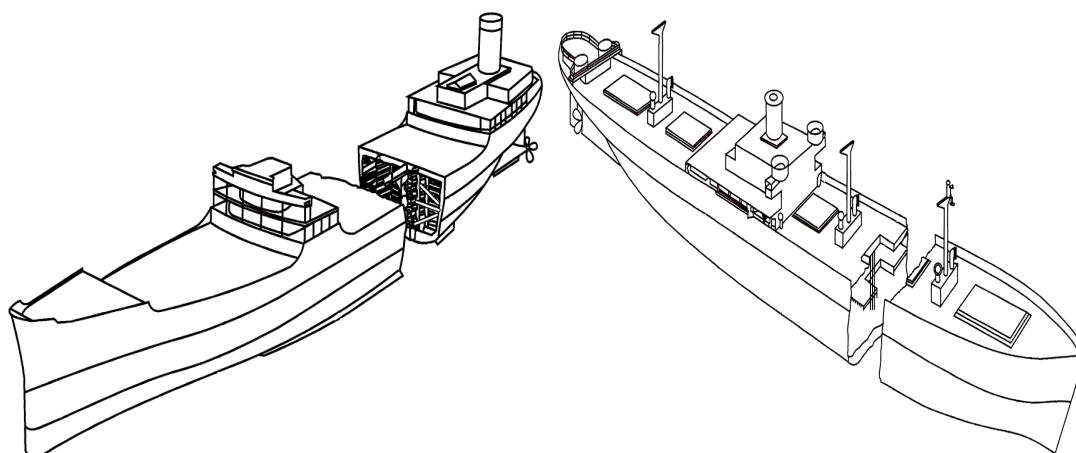
Η.Π.Α. την εποχή εκείνη, περί τα 1.000 πλοία παρουσίασαν 1.300 αστοχίες στην κατασκευή τους. Σοβαρές αστοχίες, όπως πλήρης θραύση των ελασμάτων καταστρώματος και πυθμένα, παρουσιάστηκαν σε 250 περίπου πλοία, ενώ 20 πλοία έσπασαν στα δύο ή εγκαταλείφθηκαν από το πλήρωμά τους.

Από συστηματικές έρευνες που έγιναν για την ανακάλυψη των αιτίων των αστοχιών αυτών, βρέθηκε ότι οι θραύσεις οι οποίες σημειωτέων ήταν ψαθυρές, παρουσίαζαν τα ακόλουθα κοινά χαρακτηριστικά :

- (α) Οι περισσότερες θραύσεις έγιναν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.
- (β) Η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση κατά τη θραύση είχε μέση τιμή σημαντικά μικρότερη του ορίου διαρροής του υλικού.
- (γ) Η έναρξη των θραύσεων οφείλετο κατά 50 % σε ασυνέχειες της κατασκευής, κατά 40 % σε διάφορα ελαττώματα της συγκόλλησης και κατά 10 % σε μεταλλουργικές ανωμαλίες.
- (δ) Στις περισσότερες περιπτώσεις η διάδοση της ρωγμής έγινε στο βασικό μέταλλο και όχι στο μέταλλο της συγκόλλησης, σε κατεύθυνση κάθετη ως προς τις εφελκυστικές κύριες τάσεις.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή σύγχρονων εννοιών σχετικά με την ανάπτυξη και διάδοση των ρωγμών, θεωρείται σκόπιμο να τονίσουμε τη σημασία ενός σημαντικού αριθμού ψαθυρών θραύσεων που συνέβησαν σε πλοία εδώ και αρκετά χρόνια. Οι ζημιές αυτές αποτέλεσαν το κίνητρο για περαιτέρω έρευνα στην επιστήμη και τεχνολογία των υλικών (περιοχή της θραυστομηχανικής ή μηχανικής των θραύσεων) που συνεχίζεται από τα μέσα του περασμένου αιώνα μέχρι τις μέρες μας.

Προς το τέλος του 1942 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 στα δύο, σε μία πρυμναία τομή της κεντρικής υπερκατασκευής της γέφυρας. 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 3-9: Ψαθυρές θραύσεις σε δεξαμενόπλοια τύπου T2 (αριστερά) και φορηγά πλοία τύπου Liberty (δεξιά)

Όλες αυτές οι ψαθυρές ρωγμές μεταδόθηκαν ραγδαία και ανεξέλεγκτα, χωρίς αισθητές παραμορφώσεις της κατασκευής. Προέκυψαν δε παρουσία εφελκυστικών εντατικών πεδίων.

Οι απώλειες αυτές ανησύχησαν τη ναυτιλιακή και τη ναυπηγική κοινότητα διεθνώς και γι' αυτό ακολούθησαν εκτενείς έρευνες που αποκάλυψαν τουλάχιστον 12 σοβαρές περιπτώσεις ρωγμών πριν συμβεί η απώλεια του Schenectady. Το Μάρτιο του 1946 είχαν καταγραφεί συνολικά 132 τέτοια συμβάντα, συμπεριλαμβανομένων 99 σε πλοία τύπου Liberty και 16 σε δεξαμενόπλοια τύπου T2. Ακολούθησαν συνολικά 319 απώλειες μέχρι τα τέλη του 1958.

Η έρευνα που ακολούθησε οδήγησε στη λήψη μέτρων για την αποφυγή τέτοιων συμβάντων στις σημερινές κατασκευές. Οι ρωγμές που συναντώνται σήμερα στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου είναι κατά κανόνα όλκιμες και οφείλονται στην κόπωση της κατασκευής. Παρόλα αυτά, είναι ανάγκη να κατανοήσουμε τον τρόπο που προέκυψαν οι βαριές αυτές ζημιές, για να αποφευχθούν στο μέλλον.

3.11.5 Το φαινόμενο της κόπωσης στις ναυπηγικές κατασκευές

Μια πολύ σημαντική κατηγορία ζημιών που παρατηρείται στα πλοία και σε ναυπηγικές κατασκευές γενικότερα οφείλεται στην συνεχή επιβολή φορτίσεων, οι οποίες δεν πλησιάζουν κατ' ανάγκη τα κρίσιμα φορτία άμεσης αστοχίας της κατασκευής (λυγισμού, διαρροής), η συνεχής όμως και επαναληπτική επιβολή τους

στην κατασκευή επιφέρει απώλειες αντοχής οι οποίες υπό ορισμένες προϋποθέσεις μπορούν να έχουν και καταστροφικές συνέπειες.

Για να αποδειχθούν τα πλοία και γενικά οι θαλάσσιες κατασκευές οικονομικά συμφέρουσες, η διάρκεια ζωής τους στο στάδιο του σχεδιασμού εκτιμάται στα 25-30 χρόνια. Σε αυτή την περίοδο υπολογίζεται ότι θα υποστούν περισσότερες από 10^8 ποικιλότητες και συχνά επαναλαμβανόμενες φορτίσεις. Οι συνεχείς φορτοεκφορτώσεις, η δράση των κυμάτων και η εκτενής διάρκεια ζωής των πλοίων συντελούν στο να προκύψουν ζημιές της κατασκευής λόγω κόπωσης.

«Κόπωση καλείται το φαινόμενο της αστοχίας ενός υλικού που προκαλείται από επαναλαμβανόμενη επιβολή εξωτερικών φορτίσεων για σχετικά μακρό χρονικό διάστημα».

Παραδοσιακά, οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν μεγάλους συντελεστές ασφαλείας στο σχεδιασμό των στοιχείων της κατασκευής, ως αποτέλεσμα συντηρητικού σχεδιασμού. Η ανάγκη αυτή πηγάζει από την αβεβαιότητα αλλά και την άγνοια για την ανταπόκριση της κατασκευής σε φορτία και περιβάλλοντα πέρα από το πειραματικό. Η αποκτηθείσα εμπειρία της συμπεριφοράς των ναυπηγικών κατασκευών στο χρόνο συντέλεσε στη βελτίωση των σχεδιαστικών εφαρμογών με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των ζημιών και τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Είναι αναγκαίο αρχικά να τονισθεί πως οι μηχανισμοί της κόπωσης και οι επιδράσεις τους στη χρονική διάρκεια ζωής μιας κατασκευής δεν είναι απόλυτα γνωστοί. Το γεγονός αυτό καθιστά την κόπωση ως το πιο «ύπουλο» είδος μηχανισμού βλάβης στο πλοίο. Ταυτόχρονα, η κόπωση σχεδόν ποτέ δεν εμφανίζεται ανεξάρτητη ως φαινόμενο αλλά σε συνδυασμό με άλλους μηχανισμούς φόρτισης όπως οι κραδασμοί, οι συγκεντρώσεις τάσεων και κυρίως η διάβρωση. Συνεπώς, η εμφάνιση σημείων κόπωσης σε μια κατασκευή δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη μορφή άμεσα αναγνωρίσιμη αλλά έναν συνδυασμό διαφόρων επιδράσεων από φορτίσεις και διάβρωση. Η εμπειρία και αρκετά πειράματα δείχνουν ότι το σύνθετο αποτέλεσμα της κόπωσης σε μια κατασκευή είναι η εμφάνιση κάποιας ρωγμής.

3.11.6 Χαρακτηριστικά της θραύσης από κόπωση

Στη διαδικασία της θραύσης που οφείλεται σε κόπωση διακρίνονται τρία στάδια :

➤ **Η έναρξη της ρωγμής :** Συμβαίνει συνήθως στην επιφάνεια της κατασκευής.

➤ **Η διάδοση της ρωγμής :** Η αρχικά μικρή ρωγμή μεγαλώνει σταδιακά με κάθε εναλλαγή του φορτίου. Διαδίδεται σε κατεύθυνση κάθετη προς τη μέγιστη ελκυστική τάση.

➤ **Η ασταθής θραύση :** Καθώς η ρωγμή μεταδίδεται, οι τάσεις στην εναπομένουσα εγκάρσια τομή αυξάνουν, οπότε επέρχεται ταυτόχρονη αύξηση του ρυθμού διάδοσης. Τελικά προκύπτει θραύση είτε με ψαθυρό τρόπο, όταν το μέγεθος της ρωγμής φτάσει στην κρίσιμη τιμή του για τις επικρατούσες συνθήκες και γεωμετρία, είτε με όλκιμο τρόπο, όταν η τοπική τάση γίνει ίση με την κρίσιμη τάση.

Στη ναυπηγική ενδιαφέρουν δύο κυρίως τύποι θραύσης. Αυτοί οφείλονται σε :

- α) Κόπωση υψηλής συχνότητας – χαμηλών τάσεων (high-cycle, low-stress fatigue).
- β) Κόπωση χαμηλής συχνότητας – υψηλών τάσεων ή ολιγοκυκλική (low-cycle, high-stress fatigue).

Ο πρώτος τύπος κόπωσης προκύπτει κυρίως σε στοιχεία της κατασκευής που υπόκεινται σε ραγδαίες εναλλαγές φορτίσεων, όπως σε περιοχές κοντά στην έλικα και σε μηχανήματα που προκαλούν ταλαντώσεις και κραδασμούς, ενώ ο δεύτερος χαρακτηρίζει κυρίως περιοχές που βρίσκονται κοντά σε ασυνέχειες της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

Η θραύση των ναυπηγικών κατασκευών λόγω κόπωσης έχει εξεταστεί λεπτομερώς και διάφοροι κανόνες από την «International Association of Classification Societies» (IACS) [23] έχουν εφαρμοστεί, ενώ οι περιοχές που αντιμετωπίζουν συχνότερα τον κίνδυνο της καταστροφής λόγω κόπωσης είναι στατιστικά αναγνωρισμένες.

3.12 Παράγοντες που Συντελούν στην Κόπωση

3.12.1 Οι κοπωτικές φορτίσεις της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου

Κατά τον καθορισμό των φορτίσεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον λειτουργίας καθώς και οι συνθήκες επιβολής των δυναμικών φορτίσεων.

Θα πρέπει αρχικά να καθορίζονται όλες οι πηγές προέλευσης των εναλλασσόμενων φορτίσεων που δρουν στην κατασκευή. Αυτές κατά κανόνα οφείλονται σε :

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

Οι εναλλασσόμενες περιβαλλοντικές φορτίσεις που οφείλονται στα κύματα καθώς το πλοίο ακολουθεί την πορεία του αποτελούν την σοβαρότερη πηγή κοπωτικών ζημιών και ρωγμών. Η επίδραση ενός κύματος είναι είτε άμεση, μεταβάλλοντας την κατανομή της άντωσης του πλοίου, είτε έμμεση, προκαλώντας την ίδια τη μεταβαλλόμενη φόρτιση. Τα κύματα είναι μια μορφή ενέργειας που επιδρά στο πλοίο ως μια διατμητική ή κρουστική δύναμη στα πλευρικά τοιχώματα και στον πυθμένα της γάστρας.

Το μέγεθος και η κατανομή της φόρτισης του πυθμένα εξαρτώνται από τα μήκη των κυμάτων και την κατεύθυνση τους, σε σχέση προς το μήκος και το βύθισμα του πλοίου. Το κύριο κατάστρωμα υποβάλλεται σε φορτίσεις λόγω των κυμάτων χαμηλότερων συχνοτήτων και σε φορτίσεις που οφείλονται στα μεταφερόμενα φορτία.

Κατά τον σχεδιασμό του πυθμένα και των καταστρωμάτων πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε τοπικό επίπεδο και στην εξασφάλιση συνέχειας της κατασκευής, για να περιορίζεται η ανάπτυξη συγκεντρώσεων τάσεων. Τα πλευρικά ελάσματα υποβάλλονται σε έντονες δυναμικές φορτίσεις (κρούση κυμάτων) και σε υδροστατικές φορτίσεις λόγω των μεταφερόμενων φορτιών στο εσωτερικό των δεξαμενών. Ως αποτέλεσμα, αναπτύσσονται εντατικά πεδία χαμηλών τάσεων – υψηλών συχνοτήτων στα διαμήκη πλευρικά ενισχυτικά και στις συνδέσεις τους με τη δευτερεύουσα κατασκευή (νομείς, φρακτές).

3.12.2 Υλικά και κατασκευαστικοί παράγοντες

Οι παράμετροι που επιδρούν στην παρουσία κόπωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες, με κριτήριο το λειτουργικό πλαίσιο και τη χρονική σειρά ταυτόχρονα. Αυτές είναι :

- Παράμετροι σχεδιασμού.
- Κατασκευαστικοί και προ-κατασκευαστικοί παράγοντες.
- Παράγοντες που αφορούν στην διάρκεια της λειτουργικής ζωής της κατασκευής.

Οι παράμετροι των τριών αυτών κατηγοριών ουσιαστικά υπαγορεύουν την έναρξη της ρωγμής, τη διάδοσή της σε ένα οριακό μέγεθος και, τέλος, την υπέρβαση της παραμένουσας τάσης σε συγκολλητές κατασκευές που φέρουν ρωγμές.

3.12.3 Σχεδιαστικοί παράγοντες και κόπωση

Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για τη βελτίωση της κοπωτικής αντοχής μίας συγκολλητής κατασκευής είναι :

- α) ο περιορισμός των ασυνεχειών της γεωμετρίας της κατασκευής, και
- β) η δημιουργία πιο ομαλών κατανομών επιφανειακών τάσεων.

Ο σχεδιασμός μιας μεταλλικής κατασκευής με τη σειρά του μπορεί να ταξινομηθεί στις εξής διαδικασίες, σύμφωνα με τη χρονική σειρά εκπόνησής του :

1. Η συνολική διαμόρφωση της κατασκευής.
2. Χαρακτηριστικά στοιχείων και λεπτομέρειες διατάξεων.
3. Επιλογή υλικού.
4. Διαδικασίες και προδιαγραφές ανέγερσης.

1. Η συνολική διαμόρφωση της κατασκευής

Η συνολική διαμόρφωση κάθε ναυπηγικής κατασκευής θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι ελαχιστοποιούνται οι φορτίσεις που οφείλονται στο περιβάλλον λειτουργίας. 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. Κατά το σχεδιασμό της κατασκευής στο σύνολό της πρέπει να αποφεύγεται η διάχυση φορτίων σε ανεξέλεγκτες περιοχές της. Θα πρέπει ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται και επαρκής χρόνος για την επισκευή τυχόν τοπικών αστοχιών χωρίς να υπερφορτίζεται η υπόλοιπη κατασκευή.

2. Χαρακτηριστικά στοιχείων και λεπτομέρειες διατάξεων

Όπου είναι εφικτό, η διάταξη των ενισχύσεων της κατασκευής θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη παραλαβή της εξωτερικής φόρτισης. Η ονομαστική τάση σε ένα δεδομένο στοιχείο της κατασκευής πρέπει να ενισχύεται εξαιτίας της γεωμετρίας της λεπτομέρειας. Ο λόγος της μέγιστης προς την ονομαστική τάση, ο καλούμενος συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τρόπος διάχυσης των φορτίων, τα πάχη των ελασμάτων, το μέγεθος γωνίας συγκόλλησης, το εμβαδόν της επιφάνειας συγκόλλησης, κ.α.

Η διάταξη των κατασκευαστικών στοιχείων σε τοπικό επίπεδο είναι μία σημαντική παράμετρος, τόσο από πλευράς διαμόρφωσης, επιδρώντας στο συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, όσο και από πλευράς προσπέλασης, επιδρώντας και στην ποιότητα της εργασίας. Τα ενισχυτικά της γάστρας πρέπει να επιλέγονται και να συγκολλούνται λαμβάνοντας υπόψη και την προσπέλαση στους διάφορους χώρους.

3. Επιλογή υλικού

Ως υλικό κατασκευής ο χάλυβας επιλέγεται για την αντοχή του, τη συγκολλητότητά του και τη διάρκεια της εκμεταλλεύσιμης ζωής του. Το υλικό που επιλέγεται οφείλει γενικά να διαθέτει αφ' ενός μεν κατάλληλη χημική σύσταση αφ' ετέρου δε και μηχανικές ιδιότητες που να βελτιστοποιούν τη χρήση του. Η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής απαιτεί προδιαγραφές υψηλής σκληρότητας και ταυτόχρονα αντοχή σε κατασκευαστικές ατέλειες. Εάν ένα υλικό με υψηλή σκληρότητα δύναται να παραλάβει υψηλά φορτία για δεδομένες κατασκευαστικές ατέλειες χωρίς την εμφάνιση ψαθυρής θραύσης κατά τη διάρκεια της ζωής της κατασκευής, τότε το υλικό αυτό κρίνεται ως κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται και από τη μορφολογία της κατασκευής, ενώ στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να προκύψει και αυξημένη επίδρασή της. Η επίδραση εξαρτάται όμως κυρίως από άλλες παραμέτρους, όπως η χημική σύσταση του υλικού και η μετάδοση ή μη πρόσθεση θερμότητας κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης.

4. Διαδικασίες και προδιαγραφές ανέγερσης

Η διαδικασία της ανέγερσης (συγκολλήσεις) της κατασκευής επιφέρει μία υποβάθμιση της σκληρότητας του υλικού συγκόλλησης, η οποία μπορεί να επεκταθεί και στο βασικό μέταλλο, πέρα από τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Εάν οι κατασκευαστικές ανοχές που χρησιμοποιούνται είναι εκτός προδιαγραφών, αυτό μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα κατασκευαστικών παραμορφώσεων ή κακοτεχνιών, είναι δυνατό να ελαττωθεί η δυσθραυστότητα του υλικού όταν δρουν εφελκυστικές τάσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η διάρκεια ζωής μιας συγκολλητής κατασκευής σε σχέση με την κόπωση επηρεάζεται άμεσα από τη γεωμετρία της. Αυτό συμβαίνει επειδή τα τοπικά εντατικά πεδία εξαρτώνται από τη γεωμετρία, ενώ οι υψηλές τάσεις επιδρούν με τη σειρά τους στην έναρξη και τη διάδοση των κοπωτικών ρωγμών. Η καταστροφική επίδραση υψηλών συντελεστών συγκέντρωσης τάσης στην αντοχή σε κόπωση είναι ευρέως γνωστή από πειραματικά αποτελέσματα. Έχει παρατηρηθεί ότι οι ξαφνικές αλλαγές στις διαστάσεις των ενισχύσεων επιφέρουν μείωση της αντοχής σε κόπωση. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης που απαιτείται για να επέλθει αστοχία εξαρτάται και από την κατάσταση της επιφάνειας. Έτσι, μια λεία επιφάνεια επιβιώνει πολύ περισσότερο από κάποια επισκευασμένη ή ανώμαλη επιφάνεια.

Στις συγκολλητές κατασκευές η μέγιστη τάση συνήθως εμφανίζεται είτε στο άκρο είτε στη ραφή και άρα είναι θεμιτό να χρησιμοποιούνται δυο συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων στις περιοχές αυτές. Στις αυχενικές συγκολλήσεις των ναυπηγικών κατασκευών η έναρξη της ρωγμής από κόπωση εξαρτάται και από το είδος του φορτίου. Κατά κανόνα, η έναρξη παρατηρείται στο άκρο της συγκόλλησης. Σε μερικές περιπτώσεις όμως ξεκινά και από τη ραφή, ανάλογα με τα πάχη των κατασκευαστικών στοιχείων.

Οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων στις ναυπηγικές κατασκευές είναι πολύ δύσκολο να καθορισθούν με συστηματικό τρόπο διότι η μορφολογία είναι συνθέτη, η φόρτιση πολυαξονική και η γεωμετρία των συγκολλήσεων ποικιλόμορφη. Για τον λόγο αυτό έχουν εφαρμοσθεί ειδικές μέθοδοι ώστε να αποκτηθεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο απεικόνισης του κάθε συνδέσμου, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

3.12.4 Μηχανισμοί κόπωσης τη μεταλλικής κατασκευής του πλοίου

Οι ρωγμές που προκύπτουν σε μεταλλικά υλικά και που οφείλονται σε κοπωτικές φορτίσεις εμφανίζουν μία συγκεκριμένη και χαρακτηριστική συμπεριφορά. Κατά κανόνα μπορούν να παρατηρηθούν :

- Το σημείο έναρξης της ρωγμής.
- Η επιφάνεια των θραυσμένων επιφανειών.
- Η τελική ρωγμή που οφείλεται σε υπερφόρτωση.

Τα παραπάνω μπορούν όμως να δώσουν και πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία της κόπωσης του υλικού. Η κόπωση ξεκινά σχεδόν πάντοτε σε κάποια εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Μία λεπτομερής εξέταση της θραυσμένης επιφάνειας μπορεί να αποκαλύψει το λόγο για τον οποίο επήλθε, όπως για παράδειγμα οι συγκεντρώσεις τάσεων σε εγχοπές, οι γραμμώσεις που οφείλονται σε μηχανική κατεργασία ή σε διάβρωση με βελονισμό. Οι πληροφορίες αυτές είναι πολύ χρήσιμες για την ανάλυση των αστοχιών υπό τις υφιστάμενες συνθήκες λειτουργίας.

Οι βλάβες λόγω κόπωσης προκύπτουν σε στάδια που προηγούνται της εμφάνισης της κάθε ρωγμής ενώ ο αριθμός των εναλλαγών φόρτισης που απαιτούνται για να προκύψει αστοχία εξαρτάται από το μέγεθος της επιβαλλόμενης τάσης. Εάν αυξηθεί η τάση, το αρχικό στάδιο διάνοιξης της ρωγμής περιορίζεται. Για πολύ χαμηλές τάσεις λοιπόν (high-cycle, low stress fatigue) η ωφέλιμη κοπωτική ζωή αναλύεται στο στάδιο διάνοιξης της ρωγμής. Αντιθέτως, όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι υψηλή, ρωγμές εμφανίζονται μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων. Ο διαχωρισμός των δυο αυτών περιπτώσεων δεν είναι σαφής, αλλά γενικά το πεδίο των χαμηλών συχνοτήτων χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη αξιοσημείωτων πλαστικών παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι, όσον αφορά την συμπεριφορά του υλικού, υπάρχουν ορατές διαφορές μεταξύ των δυο.

3.12.5 Μορφές αστοχίας των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής λόγω κόπωσης

Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας λόγω κόπωσης εξαρτώνται από την κατεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης σε σχέση με την εξεταζόμενη συγκόλληση και τη διάταξη των συγκεντρώσεων τάσεων.

Για συγκολλήσεις κατά συμβολή σε ελάσματα που είναι διατεταγμένα παράλληλα με τη φορά της φόρτισης, η αστοχία αναμένεται να προκύψει στις ατέλειες των συγκολλήσεων.

Όταν η συγκόλληση είναι κάθετη προς τη φορά της φόρτισης η κοπωτική αντοχή εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της διατομής της συγκόλλησης και η έναρξη της ρωγμής συνήθως παρατηρείται στο άκρο της συγκόλλησης.

Οι συγκολλητές σταυρωτές διατομές υποδιαιρούνται σε δύο είδη, ανάλογα με το αν η συγκόλληση παραλαμβάνει φορτίσεις ή όχι. Στη δεύτερη περίπτωση η κοπωτική ρωγμή προκύπτει στο άκρο της συγκόλλησης και μεταδίδεται κατά το πάχος του ελάσματος σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο φόρτισης. Στην πρώτη περίπτωση, εκτός της περιοχής του άκρου συγκόλλησης αναπτύσσεται πεδίο συγκέντρωσης τάσεων και στη ρίζα της αυχενικής συγκόλλησης και οι ρωγμές μεταδίδονται μέσω του λαιμού συγκόλλησης. Η κοπωτική ζωή συνδέσεων αυτού του τύπου μπορεί να αυξηθεί, είτε αυξάνοντας το πάχος της συγκόλλησης, είτε αυξάνοντας τη διείδυση της. Σε περιοχές που παραλαμβάνουν υψηλές φορτίσεις πιθανόν να χρειασθεί συγκόλληση πλήρους διείδυσης.

Στις διατομές T που είναι κατ' ουσία σταυρωτές διατομές κατά το ήμισυ, οι μορφές αστοχίας θα αναμενόταν να είναι αντίστοιχες με τις παραπάνω. Εάν όμως οι καμπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στο έλασμα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές που προκύπτουν στο ενισχυτικό τότε κοπωτικές ρωγμές μπορεί να προκύψουν στο έλασμα στη βάση της αυχενικής συγκόλλησης και να μεταδοθούν μετά και στο έλασμα. Όταν χρησιμοποιούνται συγκολλήσεις πλήρους διείδυσης σε σταυρωτές διατομές ή διατομές T και οι παραμορφώσεις κάθετα στη διεύθυνση εξέλασης είναι υψηλές, προτείνεται να χρησιμοποιούνται υλικά ειδικών προδιαγραφών.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι οι πιθανότερες πηγές κοπωτικών ρωγμών είναι :

- Τα άκρα των συγκολλήσεων.
- Οι γωνίες (μηχανική κατεργασία).
- Οι οπές, οι εγκοπές και άλλα ανοίγματα.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επιδρούν στην κοπωτική ζωή είναι :

- Ο λόγος της δυναμικής προς την στατική φόρτιση.
- Η συχνότητα φόρτισης.

- Οι συγκολλήσεις.
- Η πολυπλοκότητα των συνδέσεων.
- Το περιβάλλον.

Τέλος, για πλοία που λειτουργούν σε περιβάλλοντα με χαμηλή θερμοκρασία, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του υλικού των εξωτερικών επιφανειών.

3.13 Ο Κοπωτικός Σχεδιασμός της Κατασκευής του Πλοίου

Κατά την αξιολόγηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου από πλευράς κοπωτικής αντοχής θα πρέπει να :

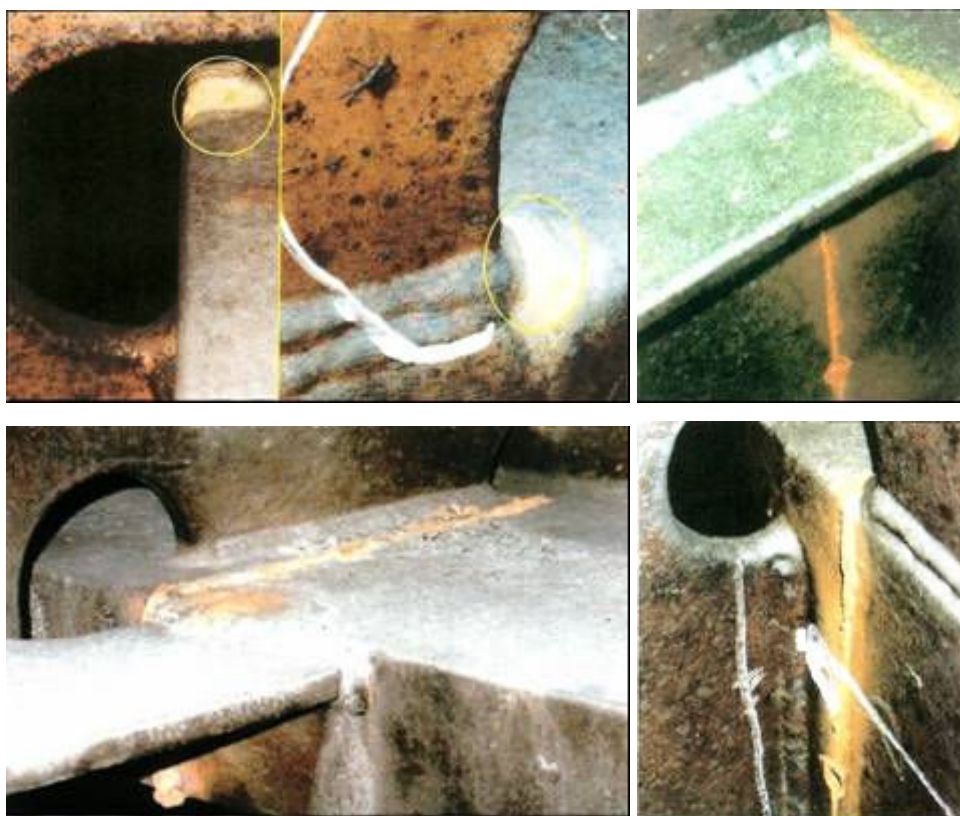
- Γίνει μία ακριβής προσέγγιση των φορτίσεων οι οποίες ασκούνται στην κατασκευή.
- Ληφθεί υπόψη η ελαστική απόκριση της κατασκευής υπό αυτές τις φορτίσεις.
- Εξετασθούν οι διατάξεις της κατασκευής σε τοπικό επίπεδο, οι διαδικασίες παραγωγής και ο ποιοτικός έλεγχος.

Είναι σημαντικό να θυμάται κανείς ότι η συμπεριφορά σε κόπωση επηρεάζεται σημαντικά από την αντοχή διαρροής του χάλυβα. Η χρήση χάλυβα υψηλότερης αντοχής και η αποδοχή υψηλότερων επιπέδων ονομαστικής τάσης (εκτός από το γεγονός ότι είναι πιο δύσκολη η συγκόλληση αυτού του χάλυβα) σημαίνει ότι η κόπωση μπορεί να γίνει πιο διαδεδομένη. Γι' αυτό είναι σημαντικό η κόπωση να συμπεριλαμβάνεται στο σχεδιασμό στο μέτρο του δυνατού.

Ο σχεδιασμός για κόπωση δεν είναι εύκολος. Μερικοί θα έλεγαν ότι είναι αδύνατος. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποια βήματα, τα οποία ο σχεδιαστής μπορεί, και πρέπει, να ακολουθήσει. Ο σχεδιασμός για κόπωση είναι θέμα σχεδιασμού των λεπτομερειών και κυρίως θέμα σχεδιασμού των συγκολλήσεων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται βασίζονται πάρα πολύ σε πειραματικά στοιχεία.

3.14 Οι Ρωγμές στη Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου

Οι ρωγμές (cracks) που συναντώνται στην μεταλλική κατασκευή του πλοίου αποτελούν ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα. Εκτενείς στατιστικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι η παρουσία ρωγμών αποτελεί σοβαρή πηγή αστοχιών της κατασκευής. Σε πολλές περιπτώσεις οι ρωγμές δεν αποτελούν κίνδυνο για την επάρκειά της, υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου συνιστούν σοβαρό κίνδυνο.



Εικόνα 3-10: Ρωγμές σε νομέα σε συνδέσεις με διαμήκη ενισχυτικά

Ρωγμές εμφανίζονται σε πάρα πολλά σημεία της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων. Σε ορισμένες όμως περιοχές και για συγκεκριμένες κατηγορίες πλοίων συναντώνται συχνότερα, Εικόνα 3-10. Οι λόγοι για τους οποίους προκύπτουν ρωγμές είναι πολλοί και σύνθετοι. Κατά την τελευταία πενηκονταετία έχουν σημειωθεί σημαντικές πρόοδοι στην κατανόηση του φαινομένου των ρωγμών, το οποίο παρουσιάζει πολλές δυσκολίες ως επιστημονικό πρόβλημα, και έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πολλά μοντέλα γένεσής τους (initiation) και διάδοσής τους (propagation), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψή τους. Ακόμη, όμως, δεν είναι δυνατόν να υπάρξει απόλυτη βεβαιότητα ως προς τον τρόπο

που συμπεριφέρονται τα υλικά, η απόκριση των οποίων είναι περίπλοκη, καθότι εξαρτάται από παράγοντες που επιδρούν στο φαινομενολογικό επίπεδο αλλά και στο επίπεδο μικροδομής (microstructure) του υλικού. Πρέπει επίσης να επισημάνουμε ότι οι ρωγμές προκύπτουν ταυτόχρονα με άλλες αστοχίες και σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλονται και σε αυτές. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι δεν αποτελούν μεμονωμένο φαινόμενο και κατά συνέπεια πρέπει να εξετάζονται σε συνάρτηση με άλλα συναφή προβλήματα.

Οι ρωγμές αποτελούν την πρώτη και βασική κατηγορία σφαλμάτων στις ναυπηγικές κατασκευές και ιδιαίτερα σε εκείνα τα τμήματα των κατασκευών αυτών τα οποία είναι συγκολλητά. Από τη φύση της, η ρωγμή έχει πολύ οξεία άκρα που δρουν σαν σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Η ρωγμή ορίζεται «σαν μία ασυνέχεια υλικού οφειλόμενη σε θραύση και χαρακτηριζόμενη από οξύ άκρο και μεγάλους λόγους μήκους και πλάτους προς το άνοιγμά της». Οι ρωγμές αποτελούν την πιο επικίνδυνη μορφή σφάλματος σε συγκολλητές κατασκευές, γιατί κάτω από κατάλληλες συνθήκες μπορούν να επεκταθούν με μεγάλη ταχύτητα και να προκαλέσουν κατάρρευση ολόκληρης της κατασκευής.

Για τον λόγο αυτό, όλοι οι διεθνείς και εθνικοί κανονισμοί που διέπουν συγκολλητές κατασκευές δεν επιτρέπουν την ύπαρξη ρωγμών, ανεξαρτήτως μεγέθους, σε συγκολλήσεις. Όλες οι ρωγμές που εντοπίζονται με οποιαδήποτε μέθοδο μη καταστρεπτικού ελέγχου πρέπει να επιδιορθώνονται. Με τη σημερινή εξέλιξη της θεωρίας της θραύσης (fracture mechanics), όμως, είναι δυνατή η αξιολόγηση της σημασίας των ρωγμών. Έτσι, όταν ακολουθείται η φιλοσοφία της καταλληλότητας για την επιδιωκόμενη χρήση (fitness-for-purpose), είναι δυνατό να επιτρέπεται η ύπαρξη ορισμένων ρωγμών δεδομένου μεγέθους, κατεύθυνσης και θέσης. Μία κατασκευή λέμε ότι είναι κατάλληλη για την επιδιωκόμενη χρήση της, εάν λειτουργεί ικανοποιητικά στη χρήση της σε όλη τη διάρκεια της υπολογισμένης ζωής της. Η κατασκευή μπορεί να χειροτερέψει στη διάρκεια λειτουργίας της, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό που να υποστεί θραύση και κατόπιν πλήρη κατάρρευση.

3.14.1 Παράγοντες που επιδρούν στην αστοχία των μεταλλικών κατασκευών

Οι ρωγμές των μεταλλικών κατασκευών κατατάσσονται σε όλκιμες και σε ψαθυρές. Και στις δύο περιπτώσεις οι ατέλειες της κατασκευής έχουν μεγάλη

επίδραση, αλλά διαφέρουν. Οι διαφορές αυτές αναφέρονται συνοπτικά στους παρακάτω Πίνακες.

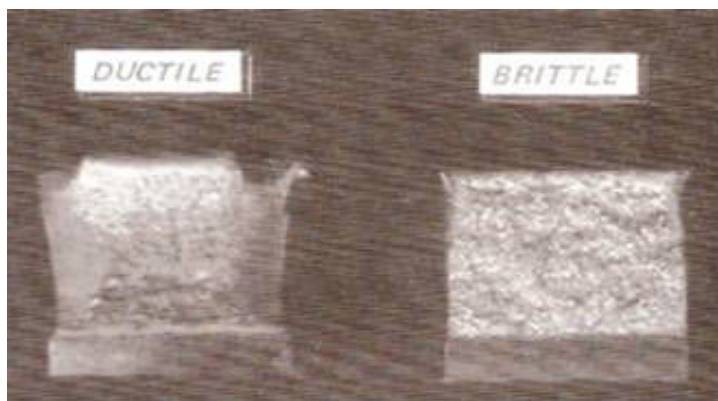
Όλκιμη Αστοχία (ductile failure)	Ψαθυρή Αστοχία (brittle failure)
Γενικευμένη πλαστικοποίηση της κατασκευής.	Τοπική πλαστικοποίηση της κατασκευής.
Οι σημαντικές ατέλειες είναι αυτές που επηρεάζουν την αντίσταση στην πλαστική ροή, δηλαδή :	Οι σημαντικές ατέλειες είναι μακροσκοπικής φύσεως, δηλαδή :
❖ Πρόσθετες ξένες ουσίες	❖ Ατέλειες συγκολλήσεων
❖ Σύνορα κόκκων	❖ Πορώδη υλικά
❖ Ιζήματα	❖ Κόπωση και ρωγμές λόγω τάσεων διάβρωσης
❖ Δίκτυα διαταραχών	

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.

3.14.2 Ολκιμες ρωγμές

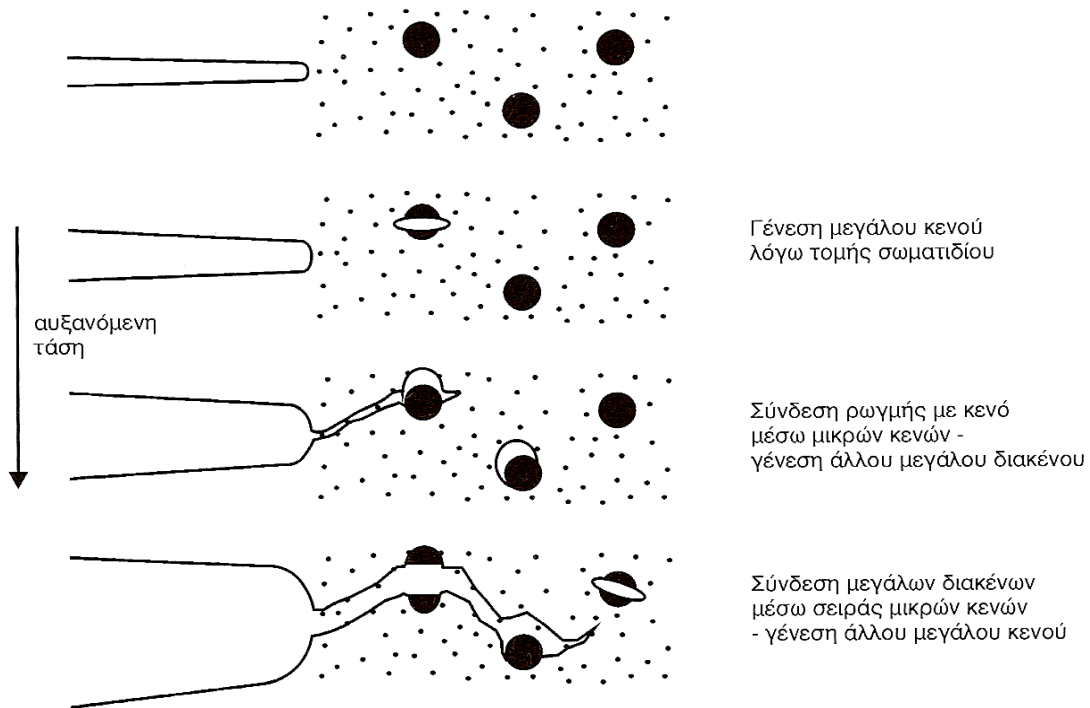
Οι ρωγμές που συναντώνται περισσότερο σήμερα στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου είναι κατά κανόνα όλκιμες και οφείλονται στην κόπωση της κατασκευής. Όλκιμες ρωγμές (ductile cracks) προκύπτουν ως αποτέλεσμα υπερβολικής φόρτισης (overload). Η έκταση της μετατόπισης του υλικού εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο στήριξης της κατασκευής.



Εικόνα 3-11: Όλκιμη (ductile) και ψαθυρή (brittle) θραύση σε δοκίμια

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, Εικόνα 3-11.

Στο επίπεδο της μικροδομής τα περισσότερα κατασκευαστικά υλικά αστοχούν με μία διαδικασία που καλείται συνένωση ή συμφυΐα μικροκενών (microvoid coalescence). Μετά τη συνένωση η μορφή της επιφάνειας θραύσης εξαρτάται από το είδος της εξωτερικής φόρτισης. Η μονοαξονική φόρτιση προκαλεί συμμετρική διάταξη των μικροκενών. Όταν η ρωγμή είναι εφελκυστική, τα μικροκενά επιμηκύνονται και έχουν την ίδια κατεύθυνση στις δύο θραυσμένες επιφάνειες. Τα μικροκενά που αποκτούν αυτή τη μορφή συγκεντρώνονται γύρω από διαφόρων ειδών εσωτερικές ασυνέχειες και καθώς αυξάνεται η εξωτερική φόρτιση, μεγεθύνονται, στη συνέχεια συμπύκνωσης και τελικά δημιουργείται μία συνεχής θραυσμένη επιφάνεια. Η διαδικασία αυτή αναπαρίσταται από την επόμενη Εικόνα 3-12.



Εικόνα 3-12: Η διαδικασία επέκτασης των ρωγμών με τη συνένωση μικροκενών

3.14.3 Ψαθυρές ρωγμές

Το φαινόμενο της ψαθυρής ρωγμής οφείλεται σε ρωγμή με τομή (cleavage crack) του υλικού. Η τομή (διαχωρισμός) προκύπτει σε επίπεδο ατομικών δεσμών σε σαφώς καθορισμένα κρυσταλλικά επίπεδα. Ένα υλικό που έχει υποστεί τέλεια ρωγμή με τομή δεν παρουσιάζει κανένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό και οι δύο επιφάνειες ταιριάζουν απόλυτα. Επειδή όμως τα κατασκευαστικά υλικά είναι πολυκρυσταλλικά με τυχαίο προσανατολισμό των κόκκων, μία τομή που επεκτείνεται από έναν κόκκο σε ένα γειτονικό θα πρέπει να αλλάξει κατεύθυνση καθώς διαπερνά το σύνορο. Η παρουσία ξένων σωμάτων περιπλέκει ακόμα περισσότερο την πορεία της ρωγμής και έτσι καθαρές τομές σπάνια συναντώνται. Οι αλλαγές προσανατολισμού μεταξύ κόκκων και οι διάφορες ατέλειες προκαλούν την ύπαρξη σημαδιών στην επιφάνεια θραύσης που χαρακτηρίζουν την ψαθυρή ρωγμή.

3.14.4 Διάδοση ρωγμών και ψαθυρή θραύση

Οι ρωγμές γενικά δεν μπορούν να αποφευχθούν, αλλά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν. Είναι σημαντικό να παρατηρούνται και να διορθώνονται πριν

προκαλέσουν καταστροφική αστοχία. Μπορεί να εξαπλωθούν υπό την επίδραση κόπωσης ή εξαιτίας ψαθυρής θραύσης.

Ακόμη και σε ισχυρές καταιγίδες οι ρωγμές από κόπωση μπορεί να μεγαλώνουν σε μήκος με μια ταχύτητα της τάξης των mm/s. Από την άλλη, στην περίπτωση της ψαθυρής θραύσης οι ρωγμές μπορεί να εξαπλωθούν με ταχύτητα περίπου 500 m/s. Οπότε η ψαθυρή θραύση είναι πολύ περισσότερο ανησυχητική. Η απώλεια των πλοίων Liberty έχει ήδη αναφερθεί. Πιο πρόσφατα παραδείγματα είναι το MV Kurdistan (Εικόνα 3-13), που κόπηκε στα δύο το 1979 και το MV Tyne Bridge, το οποίο υπέστη μια ρωγμή μήκους 4 m το 1982.



Εικόνα 3-13: Το ατύχημα του πλοίου MV Kurdistan που υπέστη ψαθυρή θραύση το 1979

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

Στις χαμηλές θερμοκρασίες η θραύση του χάλυβα της κατασκευής και των συγκολλήσεων γίνεται με σκίσιμο. Όταν ξεπεραστεί η οριακή σκληρότητα 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. Σε υψηλότερες

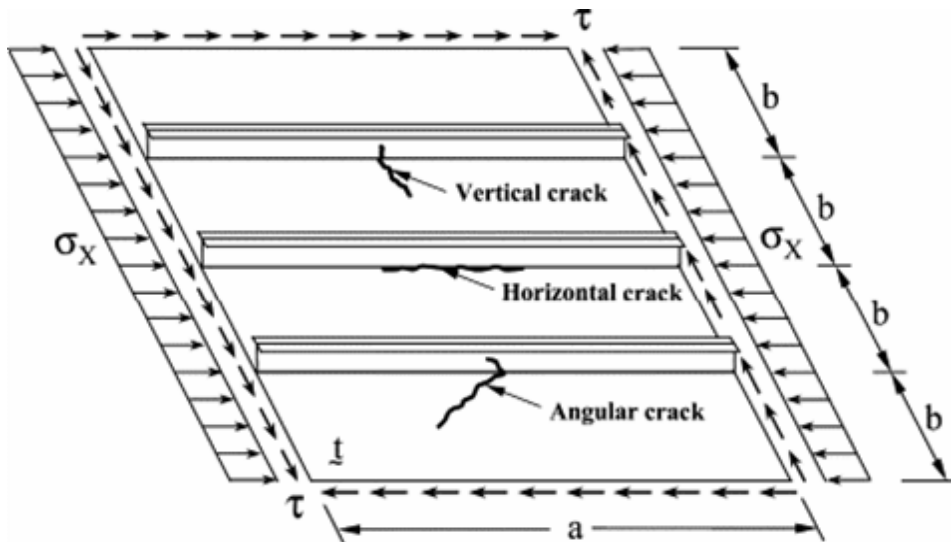
θερμοκρασίες, η εκκίνηση της ρωγμής πραγματοποιείται με την ανάπτυξη και τη συνένωση των μικροκενών. Επακόλουθη εξάπλωση των ρωγμών προκαλείται μόνο από την αύξηση του φορτίου ή της μετατόπισης. Η θερμοκρασία κατά την οποία αρχίζει η μετάβαση στο στάδιο της θραύσης ονομάζεται θερμοκρασία μετάβασης (transition temperature). Αυτή η θερμοκρασία είναι συνάρτηση του ρυθμού φόρτισης, του πάχους της κατασκευής, της οξύτητας της εγκοπής και της μικροσκοπικής συμπεριφοράς του υλικού.

Πιο πρόσφατα η ανάπτυξη της γραμμικής ελαστικής μηχανικής θραύσης (linear elastic fracture mechanics), που βασίζεται στο συντελεστή έντασης τάσης, K (stress intensity factor), έχει ακολουθηθεί από χρήσιμες ελαστοπλαστικές μεθοδολογίες, που βασίζονται στη μετατόπιση της άκρης της ρωγμής (crack tip opening displacement, CTOD).

3.14.5 Ο προσανατολισμός, ο τρόπος διάδοσης και η κατεύθυνση της πορείας των ρωγμών σε ενισχυμένα ελάσματα

Η αστοχία των υλικών οφείλεται στην ύπαρξη γεωμετρικών ανωμαλιών (δομής ή σχήματος) οι οποίες οδηγούν σε μη ομογενή εντατικά πεδία ή τουλάχιστον ξεκινά από τέτοιες ανωμαλίες. Είναι λοιπόν ενδιαφέρον να συγκεντρώσει κανείς την προσοχή του στη συμπεριφορά διαφόρων τύπων «συγκεντρωτών» ή «τοπικών ενισχυτών» του τασικού πεδίου, ο κυριότερος εκπρόσωπος των οποίων είναι οι ρωγμές. Πράγματι, η αστοχία των ψαθυρών υλικών και η τελική φάση αστοχίας των όλκιμων συνδέονται στενά με τη διάδοση ρωγμών σε αυτά. Επομένως, ως τοπικά κριτήρια αστοχίας θεωρούμε κυρίως εκείνα που παρέχουν συνθήκες εκκινήσεως ρωγμών.

Ο Paik et al. [30] ταξινομεί τις ρωγμές στα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων σε τρεις γενικές κατηγορίες, ανάλογα με τον προσανατολισμό της κάθε ρωγμής ως προς τα ενισχυτικά. Έτσι, έχουμε ρωγμές προσανατολισμένες κάθετα, οριζόντια και υπό γωνία, Εικόνα 3-14.



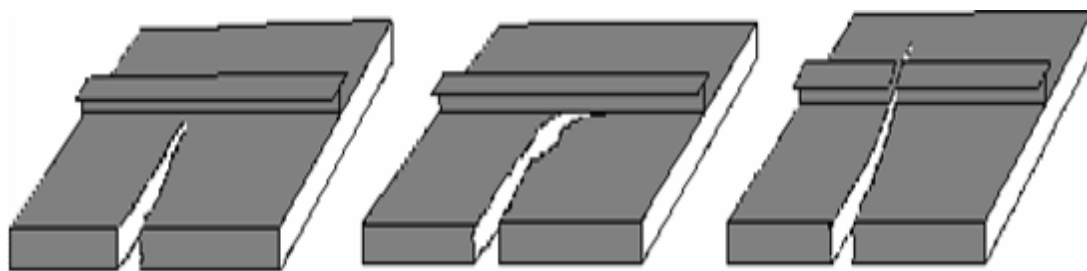
Εικόνα 3-14: Τρία είδη προσανατολισμού των ρωγμών ως προς τα ενισχυτικά.
Ρωγμές κάθετες, οριζόντιες και υπό γωνία

Η παρουσία ενισχυτικών στην πορεία διάδοσης των ρωγμών αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τη διάδοση και σύλληψη των ρωγμών συνεισφέροντας στην αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η αριθμητική και πειραματική μελέτη για την εξέταση και την αξιολόγηση της επίδρασης των ενισχυτικών στην συμπεριφορά των ρωγμών. 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 την συμπεριφορά των ρωγμών. Η σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων θα οδηγήσει στη σχεδίαση μιας εναλλακτικής και αποδοτικότερης κατασκευής από την άποψη της σύλληψης των ρωγμών.

Η πλήρης λύση στο πρόβλημα της ανάπτυξης των ρωγμών περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης της πορείας των ρωγμών. Η πρόβλεψη της πορείας των ρωγμών σε ένα κρίσιμο στοιχείο ή τμήμα μιας κατασκευής μπορεί να καθορίσει εάν επίκειται ή όχι καταστροφική αστοχία. Η γνώση της πιθανής πορείας των ρωγμών απαιτείται επίσης για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης ενίσχυσης.

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 την συμπεριφορά της ρωγμής.



Εικόνα 3-15: 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)

Παρατηρούνται τρία διαφορετικά μοντέλα συμπεριφοράς των ρωγμών οι οποίες είναι προσανατολισμένες κάθετα σε σχέση με τα ενισχυτικά, Εικόνα 3-15. Η πρώτη περίπτωση είναι το ενισχυτικό να σταματήσει τη διάδοση της ρωγμής και να οδηγήσει στη 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.

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. Η συμφωνία μεταξύ των θεωρητικά προβλεπόμενων και πειραματικά καθορισμένων κατευθύνσεων της πορείας των ρωγμών είναι μερικές φορές περιορισμένη.

3.14.6 Οι μέθοδοι επισκευής των ρωγμών

Η επισκευή των ρωγμών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Οι επισκευές κυμαίνονται από την τοποθέτηση απλών επιθεμάτων έως τον πλήρη τοπικό επανασχεδιασμό της κατασκευής στην περιοχή της ζημιάς. Πολλές φορές οι ρωγμές

συγκολλούνται, συχνά όμως επαναλαμβάνεται η ίδια μορφή ζημιάς. Το άνοιγμα οπών στα άκρα ρωγμών είναι μία άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος προσωρινής επισκευής, μέχρις ότου δεξαμενιστεί και επισκευαστεί το πλοίο. Η επισκευή των ρωγμών αυτών μπορεί να κυμανθεί από την απλή συγκόλληση έως την πρόσθεση ενισχύσεων. Η πείρα δείχνει ότι πολλές από αυτές τις επισκευές θα πρέπει να επαναληφθούν.

Οι κοπωτικές ρωγμές επισκευάζονται με διάφορες μεθόδους, των οποίων η αναμενόμενη διάρκεια ζωής και το κόστος ποικίλλουν. Κατά κανόνα, οι πλοιοκτήτες επιδιώκουν το βέλτιστο τρόπο επισκευής από πλευράς κόστους και χρονικής διάρκειας. Μία ριζική και ακριβή μέθοδος μπορεί να μην αποτελεί την καλύτερη λύση. Από την άλλη πλευρά, μία πιο απλή μέθοδος δεν προτιμάται πάντα, λόγω της πιθανής επανάληψης της ζημιάς στο μέλλον. Το κόστος θα είναι δε μεγαλύτερο, εάν απαιτηθεί να επαναληφθεί πολλές φορές η επισκευή. Συνεπώς η επιλογή της σωστής μεθόδου επισκευής είναι αποτέλεσμα πείρας και κατανόησης της προέλευσης της ζημιάς καθώς και της συμπεριφοράς της κατασκευής σε τοπικό επίπεδο.

Οι ρωγμές στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου μπορούν να επισκευασθούν με τους εξής παρακάτω τρόπους:

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 μπρακέτου, 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 μπρακέτων, 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 αυτήν την περίπτωση, η ασυνέχεια θα πρέπει να προκύψει σε περιοχή μακριά της συγκέντρωσης τάσεων.

Δεν είναι εύκολο να προσδιορισθεί η πιο αποδοτική και οικονομική μέθοδος επισκευής των ρωγμών. Η επιλογή της μεθόδου θα εξαρτηθεί από τη θέση της ρωγμής και την αναμενόμενη υπόλοιπη διάρκεια ζωής του πλοίου.

Οι ρωγμές στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου επιφέρουν αύξηση της φόρτισης της κατασκευής στην περιοχή όπου προκύπτουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αστοχία που μπορεί να επεκταθεί σταδιακά, έτσι ώστε να καταρρεύσει τμήμα της κατασκευής. Οι ρωγμές σε στοιχεία της πρωτεύουσας κατασκευής (primary structure), η οποία συμβάλλει στην διαμήκη αντοχή του πλοίου, όπως για παράδειγμα τα ελάσματα και τα ενισχυτικά των κύριων καταστρωμάτων, μπορούν να επισκευασθούν προσωρινά με τοποθέτηση επιθεμάτων ή με εξόρυξη του υλικού και συγκόλληση στην περιοχή της ρωγμής. Το υλικό που φέρει ρωγμή μπορεί να αντικατασταθεί με υλικό συγκόλλησης. Συνήθως όμως η αντοχή της κατασκευής μετά από μία τέτοια επισκευή είναι μειωμένη σε σχέση με την αρχική της κατάσταση. Η επισκευασμένη συγκόλληση δημιουργεί νέες πηγές ρωγμών, που θα οδηγήσουν σε αστοχία γρηγορότερα απ' ό,τι στην αρχική κατασκευή. Καλύτερος τρόπος επισκευής είναι η διαμόρφωση της κατασκευής έτσι, ώστε να αποφευχθούν ή τουλάχιστον να περιορισθούν οι συγκεντρώσεις τάσεων.

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.

3.15 Η Μηχανική της Θραύσης

Η μηχανική της θραύσης έχει εφαρμοστεί διεθνώς για τον σχεδιασμό οποιασδήποτε κατασκευής η ξαφνική, καταστροφική αστοχία θα προκαλούσε την απώλεια ζωής ή άλλων σοβαρών συνεπειών.

Η ανάλυση του πεδίου των τάσεων στη διαδικασία του σύγχρονου σχεδιασμού εξασφαλίζει ότι σε φυσιολογικές υπηρεσιακές συνθήκες λειτουργίας η κατασκευή δεν θα αστοχήσει λόγω υπερφόρτισης. Εντούτοις, η αποδυνάμωση και η

φθορά των στοιχείων της κατασκευής από μηχανισμούς όπως η διάβρωση και η κόπωση μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφική θραύση. Η μελέτη της θραύσης των υλικών είναι γνωστή ως μηχανική της θραύσης (fracture mechanics) και η αντίσταση των υλικών στη θραύση καλείται δυσθραυστότητα (toughness).

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. Δεδομένου ότι οι ρωγμές μπορούν να αυξηθούν σε μέγεθος κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας, η αξιολόγηση του μηχανισμού θραύσης απαιτείται καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής μιας κατασκευής. Η μηχανική της θραύσης απαντά σε πολλά σημαντικά ερωτήματα όπως: Ποιο είναι το μεγαλύτερο μέγεθος μιας ρωγμής την οποία μια κατασκευή μπορεί να περιέχει ή ποιο είναι το μεγαλύτερο φορτίο που μια κατασκευή μπορεί να αντέξει αποφεύγοντας την αστοχία; Πώς μία ρωγμή που αρχικά ήταν ακίνδυνη μετά από κάποιο διάστημα καθίσταται επικίνδυνη; Ποιο υλικό θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί σε μια καθορισμένη εφαρμογή για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια της κατασκευής έναντι αστοχίας;

3.16 Μακροσκοπικές Ατέλειες των Υλικών

Το σχήμα και το μέγεθος των ρωγμών στη γενική περίπτωση είναι τυχαία και επομένως δεν επιτρέπουν γενική αντιμετώπιση. Όμως, η επίδραση τους στην συμπεριφορά (κυρίως την αστοχία) των υλικών μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια του μαθηματικού προτύπου μιας επίπεδης ελλειπτικής ρωγμής που διακόπτει την συνέχεια του υλικού. Εάν το υλικό καταπονείται σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στη γενική περίπτωση, το επίπεδο της ρωγμής και ο άξονας φορτίσεως μπορούν να σχηματίζουν οποιαδήποτε γωνία. Το πρόβλημα της τρισδιάστατης ελαστικότητας που προκύπτει ξεφεύγει από τα πλαίσια του παρόντος γι' αυτό περιοριζόμαστε στην σχετικώς απλή περίπτωση όπου το φορτίο ασκείται στο επίπεδο της ρωγμής και κάθετα προς τον μεγάλο ημιάξονα. Το πρόβλημα συνίσταται στον προσδιορισμό των τάσεων που αναπτύσσονται στην περιοχή της ρωγμής σε μία άπειρη πλάκα που καταπονείται εφελκυστικά.

Η λύση δόθηκε από τον Inglis το 1913, ο οποίος απέδειξε ότι η μέγιστη εφελκυστική τάση σ_{\max} , αναπτύσσεται στα άκρα του μεγάλου ημιάξονα και δίνεται από την σχέση :

$$\sigma_{\max} = \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \cdot \sigma_{\infty} = K \cdot \sigma_{\infty}$$

όπου σ_{∞} η εφελκυστική τάση στο άπειρο και a, b ο μεγάλος και ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης, αντίστοιχα. Η σταθερά K , που εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία της ελλείψεως, λέγεται συντελεστής συγκεντρώσεως των τάσεων (stress concentration factor) και δείχνει πόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη τάση από τη μέση τάση. Στην περίπτωση μας, η ελάχιστη τιμή είναι $K = 1$ όταν $a = 0$ (οπότε δεν υπάρχει ρωγμή και άρα ούτε συγκεντρωση τάσεων) και η μέγιστη $K = \infty$ όταν $a \neq 0$ και $b = 0$, όταν δηλαδή η ελλειπτική ρωγμή γίνει ένα ευθύγραμμο τμήμα μήκους $2a$.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση πλάκας απείρων διαστάσεων με ελλειπτική ρωγμή η συγκεντρωση των τάσεων δεν εξαρτάται από το μέγεθος της ρωγμής, αλλά μόνο από το σχήμα της, δηλαδή το λόγο a/b . Αυτό σημαίνει ότι δεν ενδιαφέρουν οι πραγματικές διαστάσεις της ρωγμής, αλλά μόνο η οξύτητά της, δηλαδή το πόσο μικρότερος είναι ο μικρός της ημιάξονας ως προς τον μεγάλο. Επίσης, στην περίπτωση της «τέλειας οξύτητας», όταν $a/b = \infty$, οπότε η έλλειψη γίνεται ευθύγραμμη (μονοδιάστατη) ρωγμή, η συγκεντρωση των τάσεων γίνεται άπειρη κατά τη θεωρία της ελαστικότητας, που στην πράξη σημαίνει πολύ μεγάλες τάσεις γύρω από τις δύο αιχμές της ρωγμής.

3.17 Η Θεωρία της Θραύσης

Η πρώτη σχετική θεωρία οφείλεται στον Griffith (1921) 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 $a \ll b$. Η πλάκα αυτή φορτίζεται εφελκυστικά με τάση, σ_{∞} , στο άπειρο, κάθετη προς τον μεγάλο ημιάξονα της ρωγμής. Ο Griffith απέδειξε ότι η ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται στη ρηγματωμένη πλάκα, είναι μικρότερη κατά W_e από την ελαστική ενέργεια που θα αποθηκευόταν στην ίδια πλάκα με τις ίδιες συνθήκες φόρτισης, εάν δεν υπήρχε η ρωγμή. Υπολόγισε ότι το μέγεθος W_e είναι :

$$W_e = \frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma_\infty^2}{E}$$

Απέδωσε τη μείωση της ελαστικής ενέργειας στη ρηγματωμένη πλάκα στο γεγονός ότι η πλάκα αυτή έχει μεγαλύτερη ελεύθερη επιφάνεια από την όμοιά της χωρίς ρωγμή. Πράγματι, η ρωγμή έχει επιφάνεια S , ανά μονάδα πάχους της πλάκας ίση με :

$$S = 4 \cdot a$$

Εάν η επιφανειακή τάση του υλικού της πλάκας είναι γ , τότε για τη δημιουργία της ρωγμής, δηλαδή των νέων επιφανειών, δαπανάται έργο ανά μονάδα πάχους της πλάκας ίσο με :

$$W_s = S \cdot \gamma = 4 \cdot a \cdot \gamma$$

Αύξηση του μήκους της ρωγμής κατά da οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της ελαστικής ενέργειας, W_e κατά :

$$\frac{\partial W_e}{\partial a} = \frac{2\pi \cdot a \cdot \sigma_\infty^2}{E}$$

και σε αντίστοιχη αύξηση της επιφανειακής ενέργειας, W_s κατά :

$$\frac{\partial W_s}{\partial a} = 4 \cdot \gamma$$

Επομένως, η ρωγμή θα μεγαλώσει κατά μήκος da , δηλαδή θα αρχίσει να διαδίδεται, όταν η ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία νέων επιφανειών είναι ίση με την αντίστοιχη ελάττωση της ελαστικής ενέργειας, δηλαδή όταν :

$$\frac{\partial W_e}{\partial a} = \frac{\partial W_s}{\partial a} \quad \text{ή} \quad \frac{2\pi \cdot a \cdot \sigma_\infty^2}{E} = 4 \cdot \gamma \quad \text{ή} \quad \sigma_\infty = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot a}}$$

Παρατηρούμε ότι η τελευταία σχέση μπορεί να οδηγήσει στις εξής εναλλακτικές διατυπώσεις του κριτηρίου Griffith :

1) «Η ρωγμή θα διαδοθεί όταν η τάση σ_∞ στο άπειρο, γίνει ίση με μία κρίσιμη τιμή που εξαρτάται από το υλικό (E , γ) και το μήκος της $2a$ ». Από την ίδια σχέση επίσης προκύπτει ότι η κρίσιμη τάση στο άπειρο μικραίνει καθώς το αρχικό μήκος $2a$ της ρωγμής μεγαλώνει. Η διατύπωση όμως αυτή δεν είναι πρακτική διότι η κρίσιμη τιμή της τάσης δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του υλικού και επομένως ούτε η ίδια είναι ιδιότητα του υλικού.

Εάν η τελευταία σχέση γραφεί ως :

$$\sigma_{\infty} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = \sqrt{2 \cdot E \cdot \gamma}$$

ή λόγω της εξίσωσης :

$$K_I = \sqrt{2 \cdot E \cdot \gamma} = K_{IC}$$

το κριτήριο διατυπώνεται ως εξής :

2) «Η ρωγμή θα διαδοθεί όταν ο συντελεστής έντασης τάσης πρώτου τύπου K_I , γίνει ίσος με μια κρίσιμη τιμή K_{IC} που είναι σταθερά του υλικού». Η διατύπωση αυτή έχει σημαντική εφαρμογή στη μηχανική των θραύσεων, όπου επιδιώκεται ο πειραματικός προσδιορισμός του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσης K_{IC} , για τον καθορισμό της αντοχής (toughness) των υλικών.

Η διατύπωση του κριτηρίου του Griffith μπορεί να γίνει με γενικότερο τρόπο μέσω της εξίσωσης $\frac{\partial W_e}{\partial a} = \frac{2\pi \cdot a \cdot \sigma_{\infty}^2}{E}$. Πράγματι, η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφεί ως :

$$\frac{\partial W_e}{\partial a} = \text{σταθερά} \quad \text{ή} \quad \frac{\pi \cdot a \cdot \sigma_{\infty}^2}{E} = G_{IC}$$

δηλαδή: «Η ρωγμή θα διαδοθεί όταν ο ρυθμός εκροής (μειώσεως) της ελαστικής ενέργειας γίνει ίσος με μία κρίσιμη τιμή G_{IC} , που είναι σταθερά του υλικού». Το μέγεθος G_{IC} , ονομάζεται κρίσιμος ρυθμός εκροής ελαστικής ενέργειας ή δύναμη διάδοσης της ρωγμής (critical energy release rate ή crack driving force).

Μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, ο George Irwin [25], χρησιμοποίησε την θεωρία του Griffith, και έθεσε έτσι τα θεμέλια για την ανάπτυξη της μηχανικής των θραύσεων. Η συμβολή του Irwin είναι ότι έδωσε τη δυνατότητα, να υπολογιστεί η αντοχή των κατασκευών που περιέχουν ατέλειες, όπως ρωγμές. Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των νέων σχεδιαστικών αρχών ήταν ότι αυξήθηκε η αξιοπιστία των κατασκευών λόγω της βελτιωμένης σχεδιαστικής ικανότητας και της αποτελεσματικότερης ικανότητας πρόβλεψης της καταστροφικής αστοχίας των κατασκευών κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής.

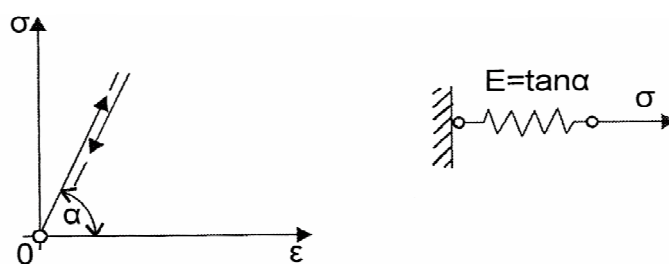
Επιπλέον, ο Irwin ανέπτυξε τις επιστημονικές αρχές για την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των επιβαλλόμενων τάσεων και των αναπτυσσόμενων ρωγμών στα

μεταλλικά υλικά. Διατύπωσε τη σκέψη ότι η δυσθραυστότητα ενός υλικού θα πρέπει να υπολογίζεται σε σχέση με την αντίσταση του υλικού στη διάδοση των ρωγμών. Η συνεισφορά του Irwin ήταν πολύ σημαντική ως προς τρεις τομείς :

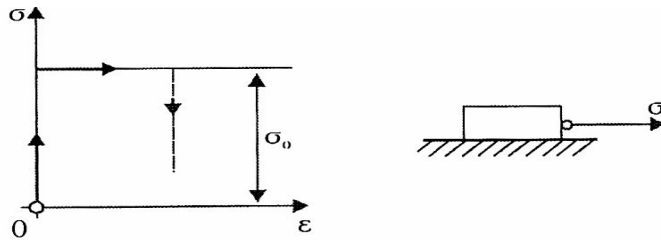
- (α) Ο Irwin επέκτεινε την αρχική θεωρία του Griffith για τα μεταλλικά υλικά συμπεριλαμβάνοντας την ανάπτυξη διαρροής του υλικού στην άκρη των ρωγμών. Αυτό οδήγησε στην αποκαλούμενη συχνά τροποποιημένη θεωρία του Griffith.
- (β) Τροποποίησε τη γενική λύση του Westergaard με την εισαγωγή της έννοιας του συντελεστή έντασης τάσης (Stress Intensity Factor – SIF).
- (γ) Εισήγαγε την έννοια του ρυθμού εκροής (απελευθέρωσης) της ενέργειας G .

3.17.1 Μοντέλα συμπεριφοράς των ναυπηγικών υλικών

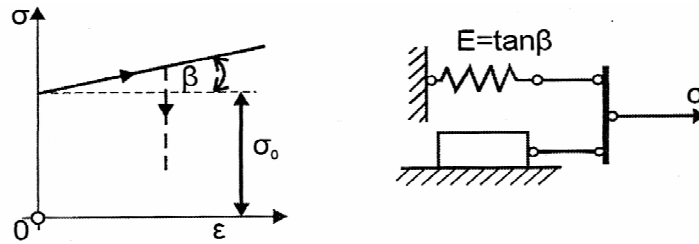
Κατά την μελέτη των ναυπηγικών αλλά και γενικά όλων των κατασκευών γίνονται ορισμένες παραδοχές για τη συμπεριφορά των υλικών. Οι παραδοχές αυτές έχουν απλουστευτικά χαρακτηριστικά για λόγους εύκολης χρήσης των μεθόδων της στατικής των κατασκευών, πρέπει όμως να διατηρούνται τα βασικά χαρακτηριστικά των θεωρούμενων υλικών. Τα μοντέλα που έχουν προταθεί για τη συμπεριφορά των υλικών γενικά είναι πολλά, στην περίπτωση όμως των μετάλλων τα παρακάτω είναι τα πλέον διαδεδομένα. Όλα βασίζονται σε γραμμικοποίηση της συμπεριφοράς προ και μετά την αρχική διαρροή. Τα διάφορα μοντέλα συμπεριφοράς των υλικών περιγράφονται στην Εικόνα 3-16. Εκτός της παραδοχής της γραμμικότητας στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή αγνοούνται επίσης οι επιδράσεις του ρυθμού παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας.



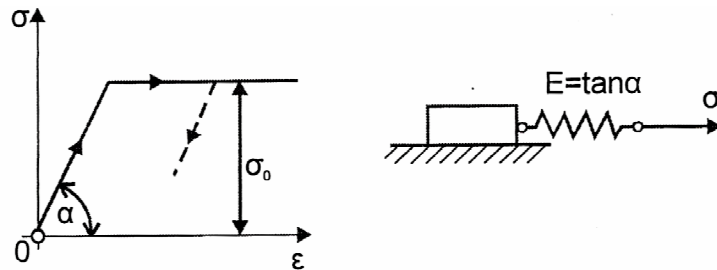
(α) Γραμμικό ελαστικό υλικό



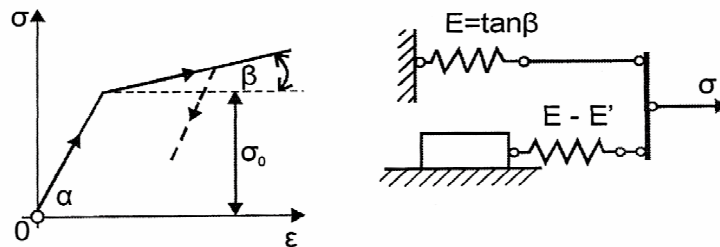
(β) Άκαμπτο – πλαστικό υλικό



(γ) Άκαμπτο – πλαστικό υλικό με σκλήρυνση



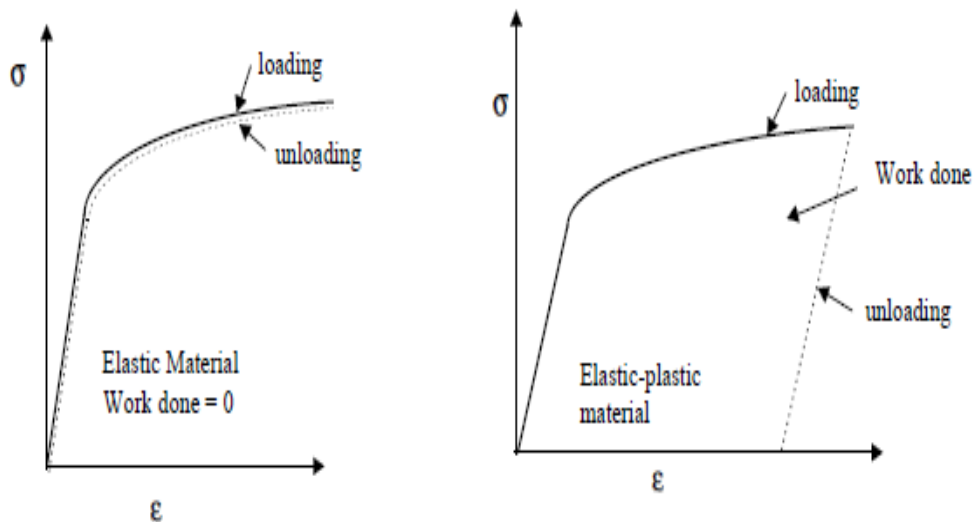
(δ) Γραμμικό ελαστικό – πλαστικό υλικό



(ε) Γραμμικό ελαστικό – πλαστικό υλικό με σκλήρυνση

Εικόνα 3-16: Τα μοντέλα συμπεριφοράς των μεταλλικών υλικών

Τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι του γραμμικού ελαστικού υλικού (α) καθώς και του γραμμικού ελαστικού-πλαστικού υλικού (δ). Σημειώνεται ότι το μοντέλο (δ) είναι αυτό που αντιστοιχεί στην κλασική θεωρία της πλαστικότητας.



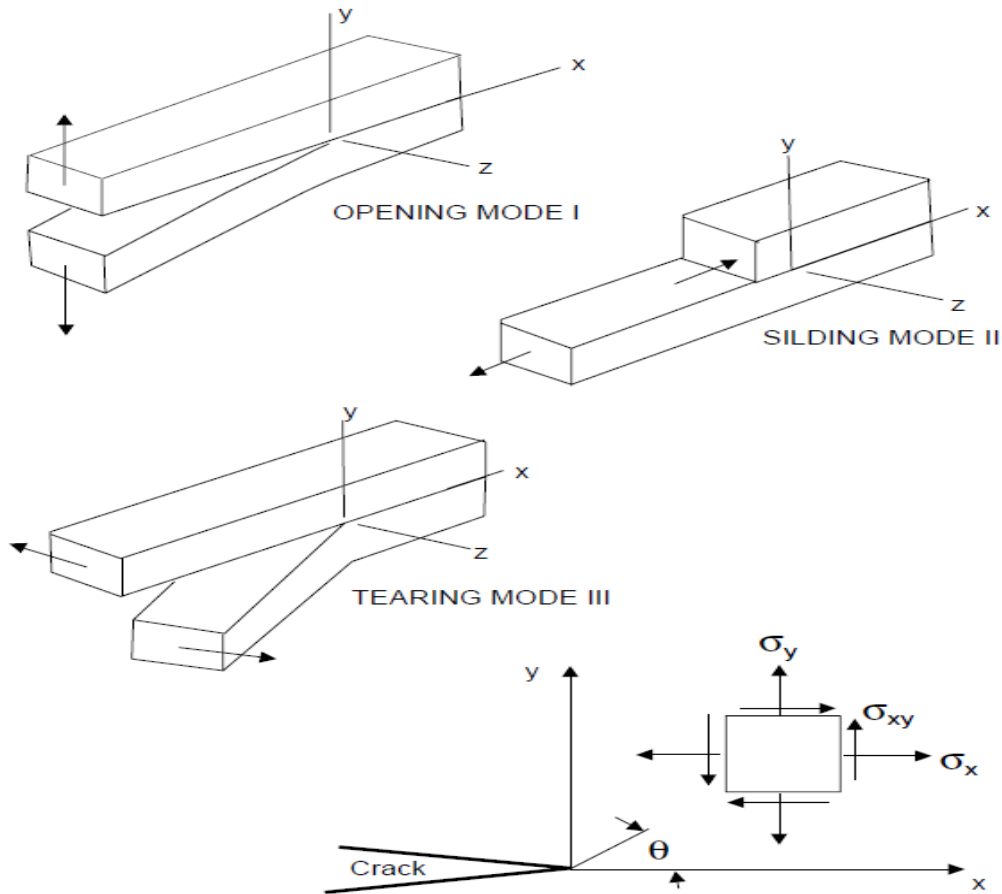
Εικόνα 3-17: Τυπικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης γραμμικού ελαστικού υλικού (αριστερά) και γραμμικού ελαστικού-πλαστικού υλικού (δεξιά)

3.18 Η Γραμμική Ελαστική Θεωρία της Θραύσης

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

Για την μαθηματική αντιμετώπιση του προβλήματος της ανάλυσης τάσεων στο άκρο μιας ρωγμής σε ελαστικό σώμα, ορίζονται τρεις τύποι σχετικής μετατόπισης των δύο επιφανειών (παρειών) της ρωγμής. Οι τρεις αυτοί τύποι παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 3-18 και αντιπροσωπεύουν τοπικές μετατοπίσεις σε στοιχειώδες στοιχείο, το οποίο περιλαμβάνει το άκρο μιας ρωγμής.

- ✚ **ΤΥΠΟΣ I :** Άνοιγμα ρωγμής (opening mode)
- ✚ **ΤΥΠΟΣ II :** Διάτμηση ή ολίσθηση ρωγμής (sliding or shear mode)
- ✚ **ΤΥΠΟΣ III :** Σχάση ρωγμής (tearing mode)



Εικόνα 3-18: 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.

Ακολουθώντας τη μέθοδο του Wastergaard είναι δυνατός ο μαθηματικός υπολογισμός του πεδίου τάσεων και μετατοπίσεων στην περιοχή μιας ρωγμής οποιουδήποτε τύπου. Τα πεδία αυτά δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις για τον κάθε τύπο ρωγμής ξεχωριστά :

🚩 ΤΥΠΟΣ Ι :

$$\sigma_x = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad \sigma_y = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \quad \sigma_z = \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.1)$$

$$u = \frac{K_I}{G} \cdot \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad v = \frac{K_I}{G} \cdot \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$w = 0$$

🚩 ΤΥΠΟΣ ΙΙ :

$$\sigma_x = - \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad \sigma_y = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad \sigma_z = \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.2)$$

$$u = \frac{K_{II}}{G} \cdot \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad v = \frac{K_{II}}{G} \cdot \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

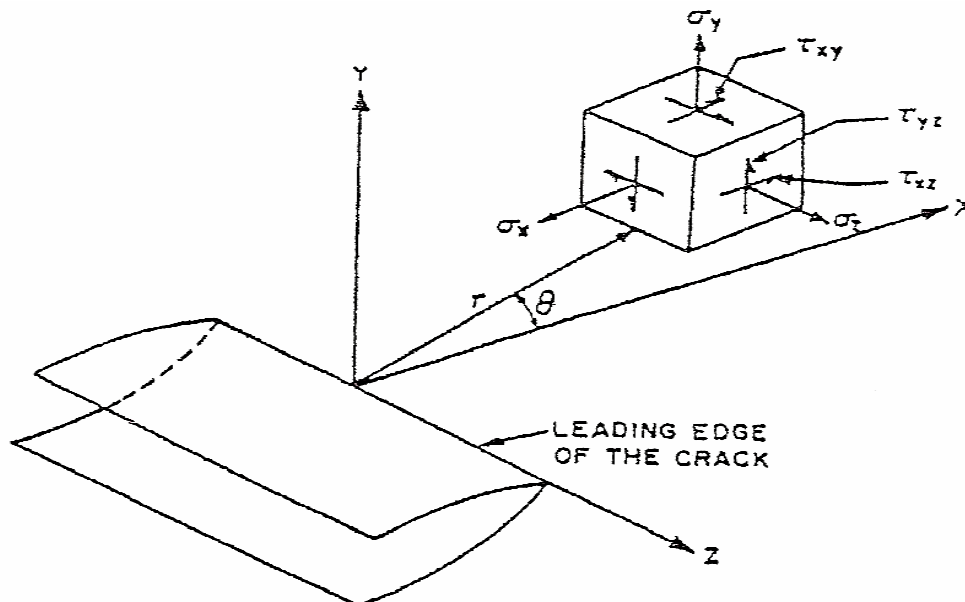
$$w = 0$$

🚩 ΤΥΠΟΣ ΙΙΙ :

$$\tau_{xz} = - \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \quad \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \quad (2.3)$$

$$u = v = 0 \quad w = \frac{K_{III}}{G} \cdot \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cdot \sin \frac{\theta}{2}$$

όπου οι συνιστώσες των τάσεων και οι πολικές συντεταγμένες φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 3-19, u , v και w είναι οι μετατοπίσεις στις διευθύνσεις x , y και z αντίστοιχα, ν ο λόγος του Poisson και G το ελαστικό μέτρο διάτμησης.



Εικόνα 3-19: Σύστημα συντεταγμένων και συνιστώσες των τάσεων στην περιοχή του άκρου της ρωγμής

Οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) αντιπροσωπεύουν την κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) και αγνοούν όρους υψηλότερης τάξης ως προς r , άρα έχουμε ακρίβεια ασυμπτωτικά όταν $r \rightarrow 0$, δηλαδή κοντά στο άκρο της ρωγμής. Η ακρίβεια είναι ικανοποιητική όταν η τιμή του r είναι μικρή σε σχέση με άλλες διαστάσεις στο επίπεδο $x-y$.

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν ότι, υπό την επίδραση μιας δεδομένης μορφής παραμόρφωσης, η κατανομή των ελαστικών τάσεων και των μετατοπίσεων στην περιοχή του άκρου μιας ρωγμής είναι αναλλοίωτες ως προς όλες τις συνιστώσες τους. Επιπλέον, η κατανομή αυτή μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια των παραμέτρων K_I , K_{II} και K_{III} για τύπους ρωγμής I, II και III αντίστοιχα. Οι παράμετροι αυτοί καλούνται συντελεστές έντασης τάσης (stress intensity factors). Επομένως, η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση, η μορφή και το μέγεθος της ρωγμής, και η γεωμετρία που αντιστοιχούν σε κάποιο κατασκευαστικό στοιχείο, το οποίο υπόκειται σε μία δεδομένη μορφή παραμόρφωσης, επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή έντασης τάσης, δεν επιδρούν όμως στη μορφή της κατανομής των τάσεων. Σύμφωνα με τη μηχανική θεωρία της θραύσης, η κατανομή των ελαστικών τάσεων και των

μετατοπίσεων στην περιοχή του άκρου μιας ρωγμής υπό την επίδραση μιας δεδομένης μορφής παραμόρφωσης είναι αμετάβλητες ως προς όλες τις συνιστώσες τους.

Η γενική μορφή των εξισώσεων, βάσει των οποίων υπολογίζεται ο συντελεστής έντασης τάσης είναι :

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

όπου, με βάση την αρχική θεωρία θραύσης του Griffith, ως a , λαμβάνεται το μήκος της ρωγμής και $f(g)$ είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου και της ρωγμής.

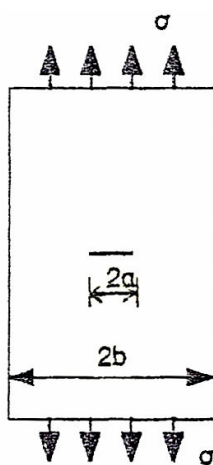
Στη διεθνή βιβλιογραφία, δίνεται πληθώρα σχέσεων για τον συντελεστή έντασης τάσης για διάφορες γεωμετρίες δοκιμίων, σχημάτων, μεγεθών και προσανατολισμού ρωγμών, και συνθηκών εξωτερικής φόρτισης. Οι βασικότερες από αυτές τις σχέσεις αναφέρονται παρακάτω.

3.18.1 Εξισώσεις για τον συντελεστή έντασης τάσης

Διαμετρής Ρωγμή:

Ο συντελεστής έντασης τάσης σε μία πλάκα άπειρων διαστάσεων, η οποία υπόκειται σε ομοιόμορφη εφελκυστική τάση, σ , και η οποία περιέχει μία διαμετρή ρωγμή μήκους $2a$ δίνεται από τη σχέση :

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$



Εικόνα 3-20: Πλάκα πεπερασμένου πλάτους με κεντρική διαμετρή ρωγμή

Για πλάκες πεπερασμένου πλάτους $2b$ χρησιμοποιείται ο συντελεστής διόρθωσης :

$$\left(\frac{2b}{\pi a} \cdot \tan \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2}$$

Επομένως, ο συντελεστής έντασης τάσης για πλάκα πεπερασμένου πλάτους $2b$, η οποία υπόκειται σε ομοιόμορφη εφελκυστική τάση, σ , και η οποία περιέχει κεντρική διαμερή ρωγή μήκους $2a$ δίνεται από τη σχέση :

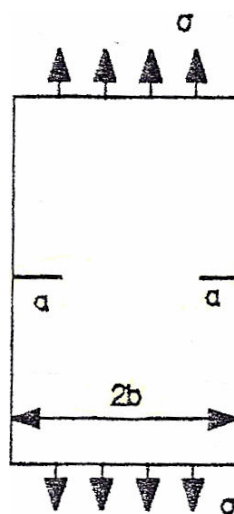
$$K_I = \sigma \cdot \left[\pi a \cdot \left(\frac{2b}{\pi a} \cdot \tan \frac{\pi a}{2b} \right) \right]^{1/2}$$

Διπλή Ακραία Διαμερή Ρωγή:

Ο συντελεστής έντασης τάσης για πλάκα η οποία περιέχει δύο ακραίες διαμερείς ρωγμές (εγκοπές) και η οποία υπόκειται σε ομοιόμορφη εφελκυστική τάση, σ , δίνεται από τη σχέση :

$$K_I = 1.12 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

όπου η σταθερά 1.12 αντιπροσωπεύει συντελεστή διόρθωσης λόγω του ότι οι ρωγμές βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια της πλάκας. Η παραπάνω σχέση ισχύει για μικρές τιμές του λόγου $a/2b$, δηλαδή για πρακτικά άπειρη πλάκα.



Εικόνα 3-21: Πλάκα πεπερασμένου πλάτους με διπλή ακραία διαμερή ρωγή

Όταν η πλάκα είναι πεπερασμένων διαστάσεων, τότε ο συντελεστής έντασης τάσης δίνεται ακριβέστερα από τη σχέση :

$$K_I = C \cdot \sigma \cdot \sqrt{a}$$

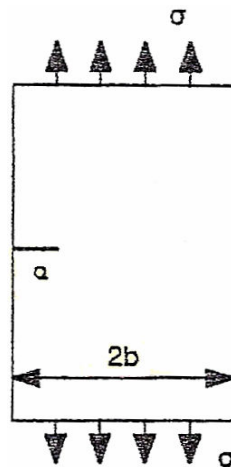
όπου :

$$C = 1.99 + 0.76 \cdot \frac{a}{2b} - 8.48 \cdot \left(\frac{a}{2b}\right)^2 + 27.36 \cdot \left(\frac{a}{2b}\right)^3$$

Απλή Ακραία Διαμετρής Ρωγμή:

Ο συντελεστής έντασης τάσης για δοκίμιο με απλή ακραία διαμετρής ρωγμή (εγκοπή) δίνεται στην περίπτωση μεγάλου λόγου $a/2b$ από τη σχέση :

$$K_I = 1.12 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$



Εικόνα 3-22: Πλάκα πεπερασμένου πλάτους με απλή ακραία διαμετρής ρωγμή

Όταν η πλάκα έχει πεπερασμένο πλάτος $2b$, τότε χρησιμοποιείται η σχέση :

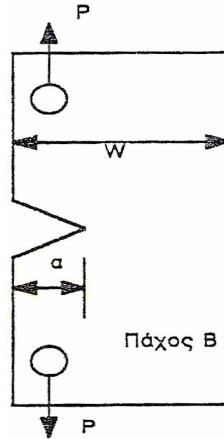
$$K_I = C \cdot \sigma \cdot \sqrt{a}$$

όπου στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής Y είναι ίσος με :

$$C = 1.99 - 0.41 \cdot \frac{a}{2b} + 18.7 \cdot \left(\frac{a}{2b}\right)^2 - 38.48 \cdot \left(\frac{a}{2b}\right)^3 + 53.85 \cdot \left(\frac{a}{2b}\right)^4$$

Συμπαγές Δοκίμιο Εφελκυσμού:

Για το συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού (Compact Tension Specimen, CTS), το οποίο παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα, ο συντελεστής έντασης τάσης δίνεται από τη σχέση :



Εικόνα 3-23: Συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού (CTS)

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

3.18.2 Ρυθμός μεταβολής της ελαστικής ενέργειας

Μετά τον προσδιορισμό του συντελεστή έντασης τάσης, K , είναι δυνατός ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της ελαστικής ενέργειας (strain energy release rate) λόγω διάδοσης της ρωγμής, $G = dU/da$.

Για την περίπτωση κατάστασης επίπεδης τάσης (plane stress) αποδεικνύεται ότι :

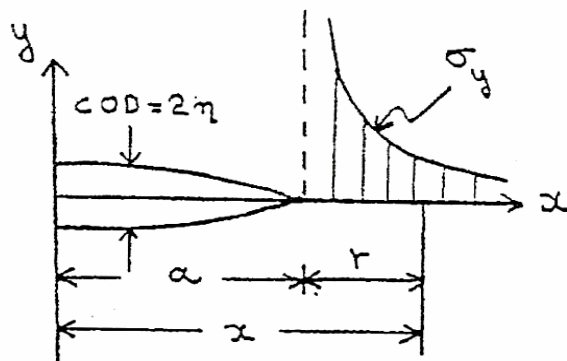
$$G = \frac{K^2}{E}$$

ενώ, αντίστοιχα, για την περίπτωση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain) :

$$G = \frac{K^2}{E} \cdot (1 - \nu^2)$$

3.18.3 Ανάλυση του ανοίγματος της ρωγμής

Έστω διαμπερής ρωγμή σε άπειρη πλάκα υπό την επίδραση ομοιόμορφης εφελκυστικής τάσης σ .



Εικόνα 3-24: Ανάλυση του ανοίγματος ρωγμής

Τότε, η τάση σ_y κατά μήκος του άξονα των x αποδεικνύεται ότι είναι :

$$\sigma_y = \sigma \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 - a^2}}, \quad x > a$$

Αν r η απόσταση από το άκρο της ρωγμής, τότε :

$$x = a + r = a \cdot (1 + p) \quad \text{όπου} \quad p = \frac{r}{a}$$

Για $p \ll 1$ (δηλαδή για $r \ll a$) :

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 - a^2}} = \frac{a \cdot (1 + p)}{a \cdot \sqrt{1 + 2p + p^2 - 1}} = \frac{1 + p}{\sqrt{2p + p^2}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2p}}$$

οπότε :

$$\sigma_y = \sigma \cdot \frac{1}{\sqrt{2p}} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} = \sqrt{\frac{EG}{2\pi r}}$$

Κατά τον ίδιο τρόπο, η ακριβής έκφραση της μετατόπισης, η , η οποία είναι :

$$\eta = \frac{2\sigma}{E} \cdot \sqrt{a^2 - x^2}, \quad x < a$$

μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\eta = \frac{2\sigma}{E} \cdot \sqrt{2ar} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2Gr}{\pi E}}$$

όπου το r μετράται τώρα στην αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή $x = a - r$.

Το άνοιγμα της ρωγμής (crack opening displacement, COD) ορίζεται από τη σχέση :

$$COD = 2\eta = 4 \cdot \sqrt{\frac{2Gr}{\pi E}} = 4 \cdot \frac{K_I}{E} \cdot \sqrt{\frac{2r}{\pi}}$$

3.18.4 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 εάν :

$$K_I \geq K_{IC}$$

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 $MN/m^{3/2}$ (ή $kg/mm^{3/2}$ $ksi (in)^{1/2}$).

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.

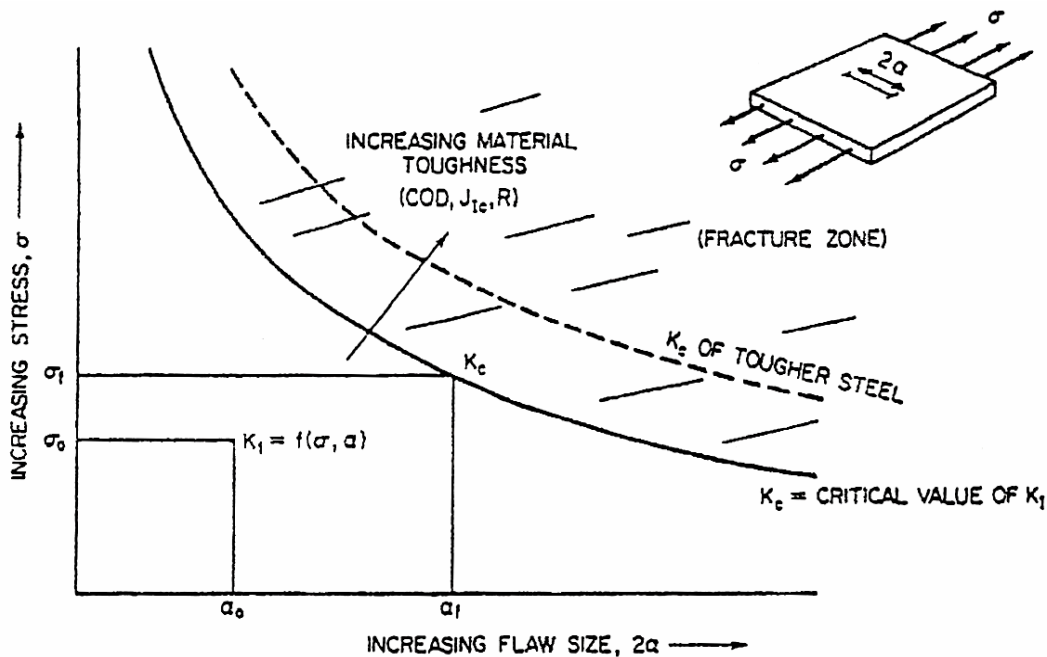
- K_{Ia} : Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσης για δυναμική (κρουστική) φόρτιση και συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης μέγιστου περιορισμού.

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 μία κατασκευή για δεδομένα σφάλματα.

Η σχέση ανάμεσα στη δυσθραυστότητα (K_C), την ονομαστική τάση (σ) και το μέγεθος της ρωγμής (a) φαίνονται σχηματικά στην ακόλουθη Εικόνα 3-25.

Εάν ένας συγκεκριμένος συνδυασμός σ και a σε μία κατασκευή (συγκεκριμένος K_I) φτάσει το K_{IC} , θα επέλθει θραύση. Τέτοιοι συνδυασμοί υπάρχουν βέβαια πολλοί για ένα συγκεκριμένο K_{IC} σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, ρυθμό φόρτισης και πάχος δοκιμίου.



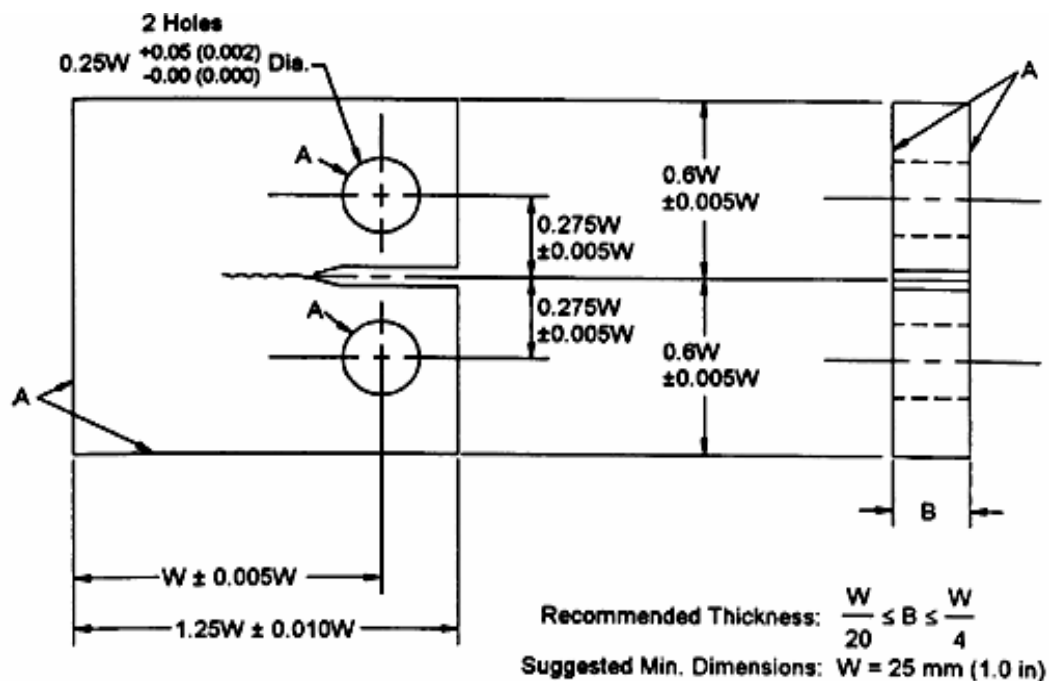
Εικόνα 3-25: Σχηματική παράσταση της σχέσης μεταξύ τάσης, μεγέθους σφάλματος και δυσθραυστότητας του υλικού

Αν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις λόγω συγκόλλησης, οπότε η μέγιστη τάση στην περιοχή της ραφής συγκόλλησης, όπου και η ρωγμή, είναι ίση προς την τάση διαρροής του υλικού, τότε το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος σφάλματος μειώνεται ακόμα περισσότερο. Ασφαλώς, αν αυξηθεί η δυσθραυστότητα του υλικού, τότε και τα αποδεκτά μήκη σφαλμάτων αυξάνονται. Η απαιτούμενη τάση για επίτευξη ψαθυρής αστάθειας σε κάποια εφελκόμενη κατασκευή μειώνεται με αύξηση του μεγέθους του σφάλματος, α, το οποίο αυτή περιέχει.

3.18.5 Πειραματικός προσδιορισμός του K_{IC}

Για τον προσδιορισμό της τιμής του K_{IC} έχουν καθιερωθεί διάφορες τυποποιημένες μέθοδοι δοκιμών. Ο πειραματικός προσδιορισμός του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσης K_{IC} γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ASTM Designation E 399-74, Part 10, «Standard Method of Test for Plane - Strain Fracture Toughness of Metallic Materials».

Η πειραματική μέτρηση γίνεται κυρίως με τη χρήση ενός συμπαγούς δοκιμίου εφελκυσμού (Compact – Tension Specimen, CTS), όπως φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 3-26.



Εικόνα 3-26: Συμπαγές δοκίμιο εφελκυσμού για τον πειραματικό προσδιορισμό του

K_{IC}

Για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων διαστάσεων των δοκιμίων προσδιορισμού του K_{IC} ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το μέγεθος της δημιουργούμενης πλαστικής ζώνης στο άκρο της ρωγμής, πρέπει να είναι μικρό σχετικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις, έτσι ώστε η επίδραση της πλαστικής ζώνης να μπορεί να αμελείται. Μετά από σημαντική πειραματική εργασία, οι ερευνητές κατέληξαν στην διατύπωση των ακόλουθων περιορισμών στις διαστάσεις των δοκιμίων για την επίτευξη συνθηκών ελαστικής συμπεριφοράς επίπεδης παραμόρφωσης, κάτι που επίσης υιοθέτησε η ASTM στους κανονισμούς της :

$$\alpha_0 \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^2, \quad B \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^2, \quad W \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_0} \right)^2$$

όπου, σ_0 είναι η τάση διαρροής, α_0 είναι το μήκος της αρχικής ρωγμής του δοκιμίου, B το πάχος του και W το συνολικό πλάτος του.

3.18.6 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 σφάλματος (ρωγμής).

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. 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 το 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.

3.19 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

τιμήματα 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, κλπ.) 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.

Αξίζει να τονιστεί ότι 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 στον υπηρεσιακό ρυθμό φόρτισης. Το βασικό ερώτημα όμως είναι πώς μπορεί ο μελετητής να βεβαιωθεί ότι αυτό θα συμβεί στην πράξη.

3.19.1 Ορισμός γενικών επιπέδων συμπεριφοράς των υλικών

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του μηχανικού είναι η θεμελίωση συγκεκριμένων απαιτήσεων δυσθραυστότητας. 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), 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_0 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, η χρήση υλικών με υψηλούς λόγους K_{IC} / σ_0 ή K_{Id} / σ_{od} δηλαδή ελαστοπλαστική συμπεριφορά, είναι επιθυμητή.

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 το 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 :

A. Ελαστική Συμπεριφορά σε Επίπεδη Παραμόρφωση :

$$(K_{IC} / \sigma_0 \text{ ή } K_{Id} / \sigma_{od} < (t/2.5)^{1/2})$$

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 δυσθραυστότητας τους, όπως μετριέται με τα μικρά εργαστηριακά δοκίμια, φαίνεται ότι είναι επαρκής.

B. Συμπεριφορά σε Επίπεδη Εντατική Κατάσταση (ελαστοπλαστική) :

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

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 την άκρη της ρωγμής. Οι περισσότερες κατασκευές είναι φτιαγμένες από τέτοια υλικά. Επομένως, είναι δύσκολη η μέτρηση των τιμών K_{IC} ή K_{Id} κατευθείαν, παρά μόνο αν χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγάλα δοκίμια.

Γ. Γενική Διαρροή (πλαστική κατάσταση) :

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

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_{Id} δεν μπορούν να μετρηθούν κατευθείαν.

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.

3.20 Αποτελέσματα Αστοχίας

Τα αποτελέσματα (οικονομικά, απώλεια ανθρώπινων ζωών, κοινωνικά) μιας αστοχίας πρέπει να αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες όταν αποφασίζεται :

- (α) η ανάγκη για κάποιο τύπο κριτηρίου αποφυγής θραύσης, και
- (β) το γενικό επίπεδο συμπεριφοράς (επίπεδη παραμόρφωση, ελαστοπλαστική ή πλαστική) που πρέπει να απαιτηθεί από τα κριτήρια δυσθραυστότητας.

3.20.1 Μέθοδοι ασφαλούς αστοχίας

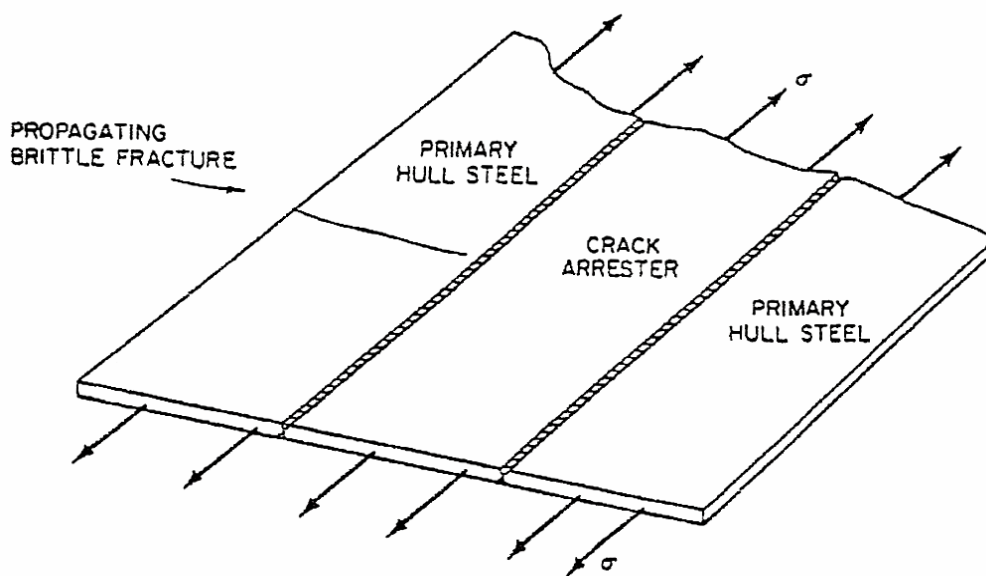
Η φιλοσοφία της μεθόδου ασφαλούς αστοχίας (fail – safe approach) βασίζεται στην ιδέα της ύπαρξης αρκετών ασφαλιστικών δικλείδων στην κατασκευή έτσι ώστε, ακόμα και αν σημειωθεί τοπική αστοχία, η κατασκευή ως σύνολο να παραμείνει ασφαλής. Με άλλα λόγια δεν συμβαίνει καταστροφική αστοχία όλης της κατασκευής, ακόμη και αν κάποιο από τα μέρη της αστοχήσει. Έτσι είναι δυνατή η επισκευή της όλης κατασκευής. Μερικά παραδείγματα εφαρμογής της φιλοσοφίας αυτής είναι τα παρακάτω :

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.



Εικόνα 3-27: 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 3-27.

3.21 Η Μελέτη της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου

3.21.1 Ολική και τοπική αντοχή της μεταλλικής κατασκευής

Για να εξασφαλισθεί επαρκής αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, τουλάχιστον για τα σημερινά μεγάλα εμπορικά πλοία το μήκος των οποίων υπερβαίνει κατά κανόνα τα 100 m και σε ορισμένες περιπτώσεις και τα 350 m, 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. 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, φρακτές).

Η ροπή αντίστασης της διατομής αποτελεί το κύριο μέτρο της διαμήκους αντοχής των πλοίων σε ελαστικές φορτίσεις. Δύο πλοία όμως με την ίδια ροπή αντίστασης και κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό δεν έχουν την ίδια μέγιστη αντοχή, δηλαδή οι μέγιστες καμπτικές ροπές στις οποίες μπορούν να υποβληθούν είναι δυνατόν να διαφέρουν.

Οι διαφορές αυτές προκύπτουν διότι ενώ μεν οι διατομές έχουν την ίδια ροπή αντίστασης είναι δυνατόν τα ελάσματα και τα ενισχυτικά τους να έχουν διαφορετική διάταξη και συνεπώς τα αντίστοιχα φορτία τοπικού λυγισμού να διαφέρουν. Για το λόγο αυτό 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.

Η εξέταση της τοπικής αντοχής είναι απαραίτητη σε κάθε περίπτωση, καθώς κατά την επιλογή των διαστάσεων των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής με βάση τους κανονισμούς των Νηογνομόνων, εξετάζονται οι διάφορες απαιτήσεις ολικής και τοπικής αντοχής και επιλέγεται η μέγιστη απαιτούμενη τιμή.

Σε ορισμένα πλοία λοιπόν οι απαιτήσεις ολικής αντοχής είναι οι κρίσιμες ενώ σε άλλα η τοπική αντοχή θα αποβεί κρίσιμη. Το θέμα μπορεί να αξιολογηθεί με

αναφορά σε κανονισμούς των Νηογνωμόνων, οι οποίοι περιλαμβάνουν κεφάλαια που αφορούν την ολική αντοχή, για την εξασφάλιση της οποίας προσδιορίζεται μία ελάχιστη ροπή αντίστασης, καθώς επίσης και κεφάλαια που πραγματεύονται την τοπική αντοχή. Η ικανοποίηση των απαιτήσεων της τοπικής αντοχής δεν υποδηλώνει λοιπόν αυτομάτως και την ικανοποίηση των απαιτήσεων της ολικής αντοχής.

3.21.2 Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου

Για κάθε κατασκευαστική μονάδα σε ένα πλοίο, πρώτα πρέπει να αποφασίσουμε τη φόρτιση και ύστερα να καταγράψουμε και να εξετάσουμε τους ποικίλους τρόπους με τους οποίους κρίνεται ότι η κατασκευαστική μονάδα θα αστοχήσει. Ποιες είναι όμως αυτές οι κατασκευαστικές μονάδες που πρέπει να εξεταστούν;

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι κατασκευής με τους οποίους πρέπει να ασχοληθεί ο σχεδιαστής ναυπηγός :

- (α) Συνδυασμοί ελάσματος – ενισχυτικού.
- (β) Ελάσματα από πλάκες (panels of plating).
- (γ) Πλαίσια – Δικτυώματα.
- (δ) Εξαρτήματα.

(α) **Συνδυασμοί ελάσματος ενισχυτικού:** Η απλούστερη μορφή αυτού του τύπου είναι μία απλή δοκός προσαρμοσμένη σε μία πλάκα. Πολλοί παράλληλοι δοκοί που στηρίζουν μία 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.

(β) **Ελάσματα από πλάκες:** Είναι συνήθως ορθογωνικά, στηρίζονται σε τέσσερις άκρες και υποβάλλονται σε κάθετα ή σε ομοεπίπεδα φορτία. Αρχικά, μπορεί να είναι επίπεδα ή καμπύλα.

(γ) **Πλαίσια – δικτυώματα:** Μπορεί να είναι αψιδοειδείς πλαισιακές κατασκευές με ένα ή περισσότερα επίπεδα. Τα ενισχυτικά πλαίσια μπορεί να

αποτελούνται από τους εγκάρσιους δακτυλίους των πλευρικών ενισχυτικών και από τις δοκούς του καταστρώματος ή από το διαμήκη δακτύλιο της δοκού του καταστρώματος, από ενισχυτικά φρακτών και από διαμήκη ενισχυτικά. Μπορεί να είναι κυκλικά όπως σε ένα υποβρύχιο. Τα φορτία μπορεί να είναι κατανεμημένα ή συγκεντρωμένα στις κατευθύνσεις του επιπέδου του πλαισίου ή κάθετα προς το επίπεδο αυτό.

(δ) Εξαρτήματα: Υπάρχει μεγάλη ποικιλία εξαρτημάτων στα πλοία, τα οποία πρέπει να ελεγχθούν όσον αφορά την επάρκεια της αντοχής τους. Τέτοιοι έλεγχοι μπορούν να περιλαμβάνουν τα μέσα πηδαλιουχίας ή ελέγχου της κίνησης του πλοίου, όπως το πηδάλιο, τα σταθεροποιητικά πτερύγια, οι διάφορες στηρίξεις του άξονα, οι ιστοί, οι γερανοί και οι εδράσεις των μηχανών.

3.21.3 Οριακές καταστάσεις ναυπηγικών κατασκευών

Οι οριακές καταστάσεις των ναυπηγικών κατασκευών περιλαμβάνουν τις καταστάσεις :

- Της μέγιστης αντοχής (κατάρρευσης).
- Της κόπωσης.
- Της λειτουργικότητας.

Η οριακή κατάσταση μέγιστης αντοχής (κατάρρευσης) θεωρείται ότι μπορεί να ανακύψει ως αποτέλεσμα δύο διαφορετικών κατηγοριών αστοχίας :

- Κατάρρευση ως αποτέλεσμα πλαστικοποίησης, και ανάπτυξη πλήρους πλαστικής ροπής κάμψης.
- Κατάρρευση λόγω αστάθειας (λυγισμού), για παράδειγμα σε διαμήκως ενισχυμένο έλασμα με τοπική αστοχία ή με ολικό λυγισμό.

Η οριακή κατάσταση κόπωσης αφορά την ελάττωση των κρίσιμων τάσεων λόγω επαναληπτικής φόρτισης, κάτι που μπορεί να προκαλέσει την απώλεια χρήσης τμημάτων της κατασκευής ή και τελική κατάρρευση.

Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας αναφέρεται στους περιορισμούς, γεωμετρικούς και άλλους που επιβάλλονται στην κατασκευή. Παραδείγματα

αποτελούν η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση κάποιου τμήματος της κατασκευής καθώς και τα κρίσιμα φορτία ελαστικού λυγισμού.

3.21.4 Οι εντατικές καταστάσεις σε ναυπηγικές κατασκευές

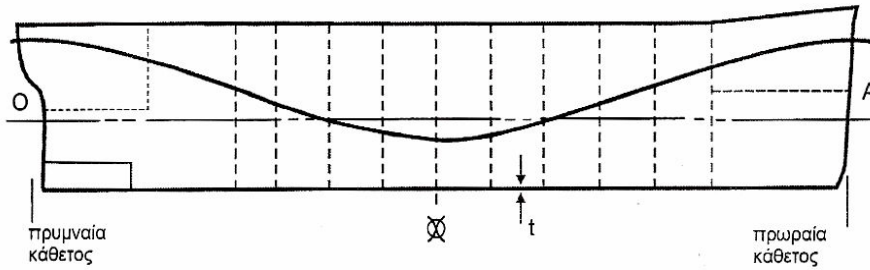
Είναι γνωστό ότι για την προσέγγιση της πραγματικής εντατικής κατάστασης σε πλοία χρησιμοποιούνται διάφορα απλουστευτικά μοντέλα. Το πρώτο από αυτά είναι η θεώρηση του πλοίου ως κοίλη δοκός.

Το δεύτερο μοντέλο που είναι διαδεδομένο είναι η ιεράρχηση των τάσεων ως **πρωτεύουσες (σ_1)**, **δευτερεύουσες (σ_2)** και **τριτεύουσες (σ_3)**, η οποία και ακολουθεί αντίστοιχη ιεράρχηση των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής.

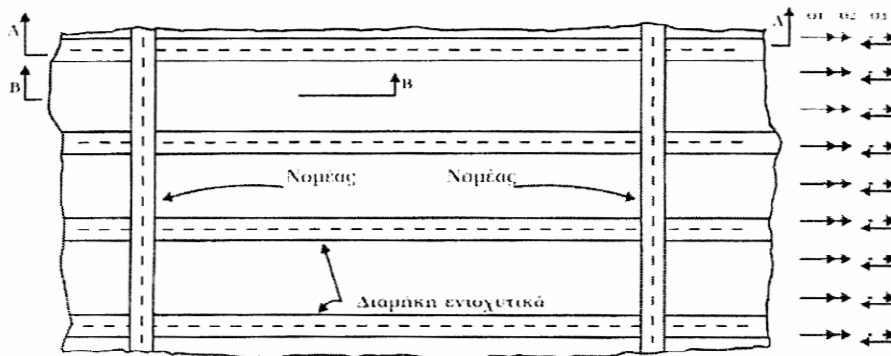
➤ **Πρωτεύουσες τάσεις – (σ_1)**. Οι πρωτεύουσες τάσεις οφείλονται στην διαμήκη κάμψη του πλοίου, και συνεπώς παραμένουν σταθερές σε διατομές παράλληλες με τον ουδέτερο άξονα της διατομής (πυθμένας, καταστρώματα). Οι πρωτεύουσες τάσεις είναι συνεπώς ομοιόμορφες για κάθε διατομή που δρουν και γι' αυτό καλούνται και επιφανειακές τάσεις.

➤ **Δευτερεύουσες τάσεις – (σ_2)**. Οι δευτερεύουσες τάσεις προκύπτουν από την φόρτιση συστήματος δοκού – κολόνας (έλασμα – ενισχυτικό) με κάθετη φόρτιση (υπενθυμίζεται ότι η διαφορά δοκού και δοκού – κολόνας έγκειται στο ότι η δοκός δεν φέρει αξονικές φορτίσεις). Εάν όμως θεωρήσουμε τη διατομή που αποτελείται από το έλασμα και το τοπικό ενισχυτικό και την κατανομή των τάσεων παρατηρούμε ότι η τάση σ_2 , σε αντίθεση με την σ_1 , μεταβάλλεται κατά το πάχος του ελάσματος. Για το λόγο αυτό οι δευτερεύουσες τάσεις καλούνται και γραμμικές τάσεις. Σημειώνεται ότι, η κατανομή των δευτερευουσών τάσεων στο έλασμα δεν είναι γραμμική, λόγω του φαινομένου της υστέρησης διάτμησης.

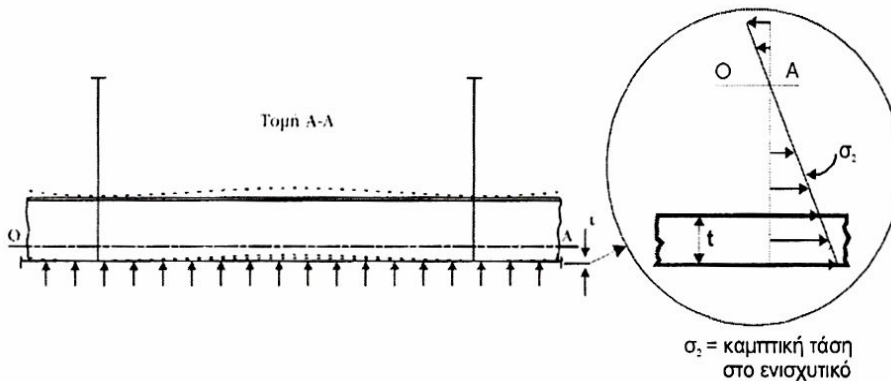
➤ **Τριτεύουσες τάσεις – (σ_3)**. Σε απλά ελάσματα που στηρίζονται σε δοκούς κατά μήκος των πλευρών τους οι τάσεις μεταβάλλονται παντού. Η κατανομή των τάσεων σ_3 εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες και μεγιστοποιείται σε ένα σημείο ή σε ένα περιορισμένο αριθμό σημείων. Για τον λόγο αυτό οι τριτεύουσες τάσεις καλούνται και σημειακές.



(α) Τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης της γάστρας (σ_1)



(β) Πυθμένας με ορθογώνια ενίσχυση



(γ) Τάσεις σε ενισχυτικό και συνεργαζόμενο πλάτος ελάσματος (σ_2)

Εικόνα 3-28: Ιεράρχηση των τάσεων σε ναυπηγικές κατασκευές

Σημειώνεται ότι για να είναι εφικτή η μετάβαση από ένα επίπεδο ιεράρχησης σε ένα δεύτερο, η ακαμψία στα σύνορα των στοιχείων της κατασκευής δεν είναι απόλυτη αλλά σχετική και εξαρτάται από το επίπεδο ιεράρχησης. Για παράδειγμα, μία δοκός που έχει πεπερασμένη ακαμψία σε ένα επίπεδο (δευτερεύον) μπορεί να θεωρηθεί απόλυτα άκαμπτη σε άλλο επίπεδο (τριτεύον) όταν δηλαδή εξετάζεται η συμπεριφορά του ελάσματος. Για κάθε ένα στοιχείο της κατασκευής η τελική εντατική κατάσταση είναι το άθροισμα των τάσεων σε κάθε επίπεδο. Το φυσικό

νόημα αυτού είναι ότι το κάθε στοιχείο συμβάλλει στην αντοχή της κατασκευής σε διάφορα επίπεδα.

Η μέθοδος ιεράρχησης των τάσεων εξυπηρετεί και όταν εξετάζεται ο τρόπος μεταφοράς των φορτίων σε κάθε στοιχείο της κατασκευής. Θεωρείται ότι οι κάθετες φορτίσεις που ασκούνται σε επίπεδα ελάσματα μεταβιβάζονται στις δοκούς και στη συνέχεια στις εδράσεις των δοκών. Σε τελική ανάλυση η διαδικασία αυτή περιγράφει τη συμπεριφορά μεγάλου ενισχυμένου ελάσματος ή δικτύωματος που στηρίζεται σε άλλα δικτύωματα, έτσι ώστε η κατασκευή να ισορροπεί στο σύνολό της.

Το αν μία δοκός μπορεί να θεωρηθεί ως σειρά απλών, μεμονωμένων δοκών ή ως μια συνεχής δοκός με πολλαπλά σημεία στήριξης εξαρτάται από το κατά πόσο είναι γνωστές οι οριακές συνθήκες στα άκρα της.

Το βασικό πρόβλημα είναι ο προσδιορισμός των πλησιέστερων κατά το δυνατόν οριακών συνθηκών για να περιορισθεί η έκταση του προβλήματος. Η χρήση υπολογιστικών μεθόδων εξυπηρετεί στο σημείο αυτό διότι μία γενική τρισδιάστατη προσομοίωση της κατασκευής (σε πρώτη προσέγγιση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορισθεί η ακαμψία των συνόρων, παρόλο που οι κατανομές των τάσεων και των μετατοπίσεων δεν υπολογίζονται κατ' ανάγκη με τον ίδιο βαθμό ακριβείας.

3.21.5 Οριακές συνθήκες ελασμάτων ναυπηγικών κατασκευών

Η απόκριση μίας κατασκευής στο σύνολο των φορτίων που ασκούνται προσδιορίζεται συγκρίνοντας την ικανότητα παραλαβής των φορτίων, που αποτελεί το μέτρο αντοχής της, σε σχέση με το μέγεθος των επιβαλλόμενων φορτίων. Η σύγκριση αυτή μπορεί να γίνει με μεθόδους οι οποίες αποδίδουν συντελεστές ασφάλειας ή πιθανότητες αστοχίας που συγκρίνονται με προκαθορισμένες αποδεκτές τιμές. Στην περίπτωση σύνθετων κατασκευών είναι δυνατόν ένα στοιχείο της κατασκευής, για παράδειγμα ένα ενισχυμένο έλασμα, να οδηγήσει σε κατάρρευση άλλου τμήματος της κατασκευής, για παράδειγμα ένα νομέα, εξαιτίας του τρόπου αλληλεπίδρασης των διαφόρων στοιχείων μίας κατασκευής.

Κύριος σκοπός του σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής είναι η επιλογή μιας όσο το δυνατόν βέλτιστης διάταξης έτσι ώστε η κατασκευή να είναι σε θέση να παραλάβει επιτυχώς τις προβλεπόμενες φορτίσεις κατά τη διάρκεια χρήσης της. Στις πιο προχωρημένες μεθοδολογίες σχεδιασμού λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες πιθανές μορφές αστοχίας, όπως λυγισμός, κατάρρευση, κόπωση, διαρροή, ανάπτυξη ρωγμών,

καθώς επίσης και οι πιθανότητες να προκύψει κάθε μια από αυτές. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να ακολουθηθεί μια ορθολογικά διατυπωμένη μεθοδολογία.

Η πιθανότητα να προκύψει κάποια συγκεκριμένη αστοχία λαμβάνεται υπόψη κάνοντας χρήση των συντελεστών ασφαλείας, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από τα αποδεκτά επίπεδα λειτουργικότητας της κάθε κατασκευής. Για παράδειγμα, εάν οι συνέπειες κάποιας αστοχίας είναι καταστροφικές, η αποδεκτή πιθανότητα θα είναι χαμηλότερη άλλης αστοχίας οι συνέπειες της οποίας έχουν μικρότερη σημασία. Έτσι λοιπόν, κατά το σχεδιασμό υπεισέρχεται ο παράγοντας ασφαλείας ο οποίος οδηγεί σε κάποια αυξημένη τιμή της κρίσιμης ποσότητας (τάση, βέλος κάμψης) για να ληφθούν υπόψη η αβεβαιότητα προσδιορισμού της και οι επακόλουθες συνέπειές της.

Η θεωρία αξιοπιστίας αποβλέπει στην ορθολογική διαπραγμάτευση των αβεβαιοτήτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό των μεταλλικών κατασκευών, και ιδιαίτερα στην περίπτωση της χρήσης νέων κατασκευαστικών υλικών όπως το αλουμίνιο, επίσης δε και κατά τον υπολογισμό της ασφάλειας τους. Το γνωστικό αντικείμενο της περιοχής αυτής έχει εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, οι δε πρακτικές εφαρμογές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων και τη σύνταξη κανονισμών σχεδιασμού και ανέγερσης κατασκευών.

Η εφαρμογή της θεωρίας της αξιοπιστίας κατασκευών στο πεδίο της ναυπηγικής στόχο έχει :

- Την επίτευξη οικονομίας κόστους – βάρους για κάποιο προκαθορισμένο αποδεκτό βαθμό ασφαλείας της κατασκευής.
- Την εξασφάλιση ενιαίου επιπέδου αξιοπιστίας.

Η σωστή χρήση της προϋποθέτει την σε βάθος κατανόηση των διαφορών φυσικών προβλημάτων και δε μπορεί να γίνει κατά μηχανιστικό τρόπο. Η αβεβαιότητα αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα πολλών φυσικών και μη διεργασιών και ως έννοια βρίσκεται πολύ κοντά σε θεμελιώδεις αρχές της επιστημονικής σκέψης και διαδικασίας.

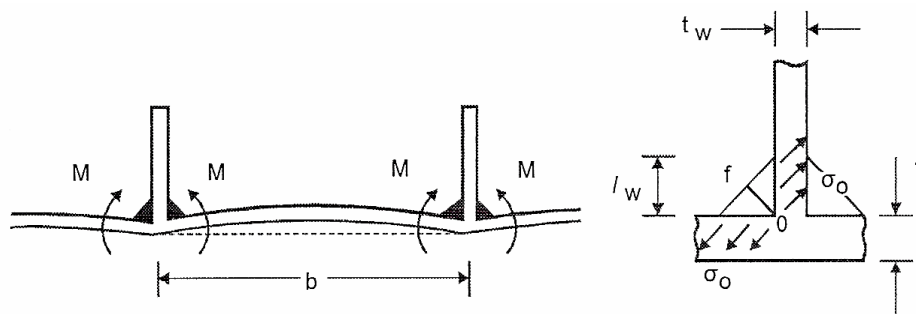
3.21.6 Η μεταβλητότητα των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής

Από πλευράς αντοχής της κατασκευής η μεταβλητότητα οφείλεται σε αντικειμενικές αβεβαιότητες που προκύπτουν κατά :

- Την παραγωγή του υλικού, που επηρεάζει τις τιμές της τάσης διαρροής, του μέτρου ελαστικότητας και την ισοτροπικότητα του υλικού (παρουσία ελαττωμάτων, εγκοπών).
- Τη διαμόρφωση του υλικού σε φύλλα και διατομές (διαδικασίες εξέλασης και κοπής), που επιφέρουν μεταβολές στις εξωτερικές διαστάσεις και τη μορφή (μήκος, πλάτος, πάχος, καμπυλότητα).
- Την ανέγερση, που οδηγούν στην ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων και αντίστοιχων μετατοπίσεων λόγω συγκολλήσεων.

3.21.7 Η επίδραση των αρχικών ατελειών στην αντοχή

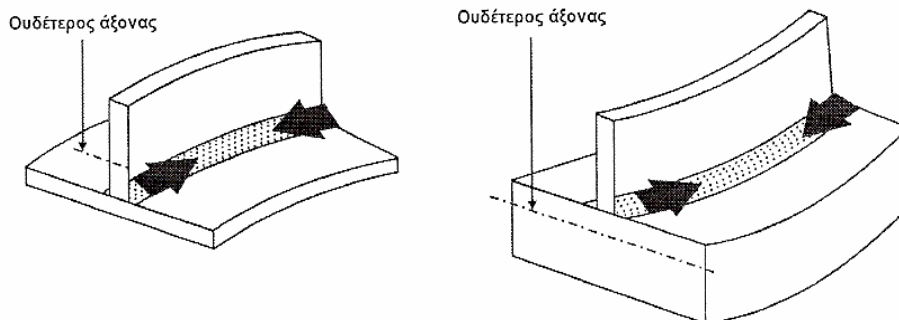
Οι ατέλειες που επηρεάζουν την αντοχή των λεπτών ελασμάτων υπό ομοεπίπεδη φόρτιση είναι το αρχικό βέλος κάμψης και οι παραμένουσες τάσεις. Οι δυο αυτές ατέλειες είναι στενά συνυφασμένες καθώς το αρχικό βέλος κάμψης σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στην διαδικασία ανέγερσης (εξέλαση του ελάσματος) και στις συγκολλήσεις με τα ενισχυτικά.



Εικόνα 3-29: Αρχικό βέλος κάμψης ελάσματος οφειλόμενο στη συγκόλληση με το ενισχυτικό

Όπως δείχνει και η Εικόνα 3-29, μετά τη συγκόλληση η ψύξη του τηγμένου υλικού οδηγεί στην ανάπτυξη ενός εφελκυστικού εντατικού πεδίου το οποίο, λόγω της ασυμμετρίας της διατομής περί τον οριζόντιο άξονα, τείνει να περιστρέψει το έλασμα περί τον άξονα σύνδεσης με το ενισχυτικό. Η εγκάρσια αυτή παραμόρφωση οφείλεται στην εγκάρσια συστολή του υλικού συγκόλλησης.

Επειδή όμως το υλικό συγκόλλησης συστέλλεται και στη διαμήκη κατεύθυνση, προκύπτει και κάμψη ολόκληρης της διατομής ελάσματος-ενισχυτικού στη διαμήκη κατεύθυνση.



Εικόνα 3-30: Μορφές διαμήκους κάμψης ενισχυμένου ελάσματος λόγω διαμήκους συστολής του υλικού συγκόλλησης

Σε αυτή την περίπτωση η κατεύθυνση κάμψης θα εξαρτηθεί από την καθ' ύψος θέση του ουδέτερου άξονα της διατομής του υλικού συγκόλλησης σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα της διατομής του ενισχυμένου ελάσματος, Εικόνα 3-30.

204. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Η βίαιη διεργασία στην οποία υπόκειται ένα έλασμα κατά την κατασκευή του δεν επιτρέπει τη δημιουργία ενός ελάσματος χωρίς καταπονήσεις. Ανομοιόμορφη εξέλαση και συστολή, ειδικά αν η ψύξη είναι ταχεία, μπορεί να προκαλέσει περιοχές παραμόρφωσης, ακόμη και πριν το έλασμα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πλοίου. Αυτές λέγονται παραμένουσες ή εγκλωβισμένες τάσεις (ή ακριβέστερα παραμορφώσεις) (built in ή locked up stresses).

Μας έχει ήδη απασχολήσει η επίδραση των αρχικών μετατοπίσεων σε απλά ελάσματα και έχουμε δει ότι όταν αυξάνονται οι μετατοπίσεις το φορτίο λυγισμού μειώνεται. Οι αρχικές μετατοπίσεις οφείλονται :

- (α) στις διάφορες διαδικασίες βιομηχανικής κατεργασίας, και
- (β) στις συγκολλήσεις.

Κατά τις διαδικασίες διαμόρφωσης και συγκόλλησης, ενσωματώνονται περισσότερες παραμορφώσεις εξαιτίας της ανομοιογενούς ψύξης. Όσο προσεκτικοί και να είναι οι συγκολλητές, πάντα θα υπάρχουν κάποιες, μπορεί και ασήμαντες ατέλειες, τρύπες, ρωγμές, μειωμένη διείσδυση ηλεκτροδίων και ατέλειες σε

συγκολλήσεις. Μια εξέταση των πιο σημαντικών στοιχείων της κατασκευής θα ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των εμφανών ατελειών που παρουσιάζονται. Όμως, η έλλειψη ομοιογένειας δεν μπορεί να διαπιστωθεί με τυπικές διαδικασίες ελέγχου, ακόμη και αν οι παραμένουσες τάσεις ξεπεράσουν το σημείο διαρροής. Τι συμβαίνει με αυτές τις τάσεις, όταν το πλοίο υπόκειται σε παραμορφώσεις;

Οι τάσεις λόγω διαμόρφωσης και κατεργασίας δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά των ναυπηγικών (λεπτότοιχων) ελασμάτων. Στην περίπτωση όμως των τάσεων που προκύπτουν λόγω συγκολλήσεων πρέπει να δώσουμε μεγαλύτερη προσοχή. Οι τάσεις αυτές προκύπτουν :

- (α) λόγω της ανομοιογενούς θέρμανσης (τήξης) του υλικού και της επακόλουθης ψύξης του στην περιοχή της συγκόλλησης, και
- (β) λόγω των περιορισμών που παρέχει η γειτονική κατασκευή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Έχουν γίνει εκτενείς μετρήσεις των παραμενουσών αυτών τάσεων σε όλες τις κατηγορίες των συγκολλητών μεταλλικών κατασκευών και έχει βρεθεί ότι σε λεπτότοιχα ελάσματα υπό θλίψη γενικά ελαττώνεται το φορτίο λυγισμού και αντίστοιχα η μέγιστη αντοχή, δηλαδή το φορτίο τελικής κατάρρευσης. Η ακριβής επίδραση των παραμενουσών τάσεων εξαρτάται από την κατανομή τους και από την κατανομή των επιβαλλόμενων φορτίσεων. Κατά κανόνα προκύπτει ελάττωση της αντοχής.

Οι θερμοκρασίες συγκόλλησης είναι περίπου δώδεκα φορές υψηλότερες εκείνων που απαιτούνται για να διαρρεύσει το υλικό υπό περιορισμένη θερμική διαστολή. Για το λόγο αυτό μετά την ψύξη αναπτύσσεται ένα σημαντικό τοπικό εφελκυστικό πεδίο που επεκτείνεται στο έλασμα και στα ενισχυτικά σε ενισχυμένα ελάσματα. Το πεδίο αυτό εκτείνεται εκατέρωθεν του σημείου συγκόλλησης και εξαρτάται από το εμβαδόν της διατομής του προστιθέμενου υλικού και τις γενικότερες συνθήκες συγκόλλησης όπως τη διαδικασία συγκόλλησης, τους περιορισμούς, κ.ά. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης το υλικό βρίσκεται σε απόλυτα πλαστική κατάσταση και ενώ ορισμένες πλαστικές ίνες ψύχονται, άλλες ελαστικές θερμαίνονται. Τα φορτία που ασκούνται στις ελαστικές ίνες λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών δεν αντισταθμίζονται από τις πλαστικές ίνες μέχρι να ελαττωθεί η θερμοκρασία σε αυτές και γίνουν ελαστικές. Η αλληλεπίδραση των

διαφόρων ινών της διατομής έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη του εφελκυστικού εντατικού πεδίου στην περιοχή συγκόλλησης.

Μετά τη συγκόλληση, λόγω της διαρροής του υλικού στην περιοχή του ενισχυτικού θα αναπτυχθούν εκεί διαμήκειες εφελκυστικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές εξισορροπούνται από αντίστοιχες θλιπτικές οι οποίες κατανέμονται στο υπόλοιπο τμήμα του ελάσματος. Στην περίπτωση δε ενισχυμένου ελάσματος, η ψύξη του υλικού συγκόλλησης προκαλεί πρόσθετες εγκάρσιες παραμορφώσεις καθώς αναπτύσσονται σημαντικές εφελκυστικές τάσεις.

3.21.8 Ο σχεδιασμός των ναυπηγικών κατασκευών με βάση τις αρχές της Μηχανικής

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων κάνοντας χρήση των αρχών της μηχανικής (άμεσοι υπολογισμοί) είναι :

- Η μέθοδος των τομών (section method).
- Η μέθοδος των υποκατασκευών (gross panel method).

Οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο θεώρησης της κατασκευής. Η εξέχουσα σημασία της διαμήκουσ αντοχής για σχετικά μεγάλα πλοία (με μήκος μεγαλύτερο των 80 – 100 m) οδηγεί τον μελετητή να επικεντρώσει την προσοχή του σε κάποια εγκάρσια τομή κοντά στο μέσο του πλοίου. Στο πρώτο στάδιο της μελέτης ορίζονται τα χαρακτηριστικά της τομής αυτής και στη συνέχεια μπορούν να εξετασθούν και τομές διαδοχικά πλησιέστερες στα άκρα του πλοίου. Η εντατική κατάσταση μεταβάλλεται όμως όσο πλησιάζουμε προς τα άκρα του πλοίου, διότι :

- Οι ορθές τάσεις λόγω διαμήκουσ κάμψης και οι διατμητικές τάσεις λόγω στρέψης μειώνονται.
- Οι διατμητικές τάσεις λόγω των τεμνουσών δυνάμεων καθώς και οι δυναμικές φορτίσεις μεταβάλλονται σε όλο το μήκος του πλοίου.
- Οι τοπικές φορτίσεις, σφυρόκρουση στο προραίο τμήμα της κατασκευής και η περιστροφική κίνηση της έλικας, προκαλούν τοπικές καταπονήσεις και ταλαντώσεις.

Παρ' όλες όμως τις παραπάνω αποκλίσεις από τη φόρτιση της μέσης τομής η μέθοδος των τομών έχει αποδειχθεί επιτυχής στο σχεδιασμό πολεμικών πλοίων. Στα συμβατικά εμπορικά πλοία εξετάζεται μόνο μία τομή κοντά στο μέσο του πλοίου, η διάταξη της οποίας εκτείνεται σε μία συγκεκριμένη απόσταση από τη μέση τομή, ενώ μετά θεωρούνται τα άκρα ακολουθώντας διαφορετικές μεθοδολογίες.

Κατά τη μέθοδο των υποκατασκευών, το πλοίο θεωρείται ως ένα άθροισμα επίπεδων ενισχυμένων ελασμάτων τα οποία στηρίζονται σε παρόμοιες υποκατασκευές. Για παράδειγμα, μία εγκάρσια φρακτή στηρίζεται σε ένα κατάστρωμα, τον εσωτερικό και τον εξωτερικό πυθμένα και τα πλευρικά ελάσματα. Άλλο παράδειγμα υποκατασκευής είναι ένα τμήμα της πλευράς του πλοίου που στηρίζεται στον εσωτερικό πυθμένα, πιθανόν σε κάποιο κατάστρωμα, στις εγκάρσιες φρακτές και στους νομείς. Οι διαστάσεις και οι θέσεις των παραπάνω στοιχείων είναι ήδη γνωστές από την προμελέτη του πλοίου.

Στην περίπτωση που θεωρούμε κάποιο φορέα ο οποίος θα πρέπει να παραλάβει φορτίο ομοεπίπεδο ή κάθετο στην επιφάνειά του, θα πρέπει να επιλεγεί κάποιο σύστημα ενίσχυσης. Θεωρητικά υπάρχει άπειρος αριθμός δυνατοτήτων, με μεταβλητές τον αριθμό, τις κατευθύνσεις, τις αποστάσεις και τις διαστάσεις των ενισχυτικών, όπως επίσης και το πάχος του ελάσματος.

Η διαδικασία της επιλογής μίας διάταξης διευκολύνεται με τη χρήση υπολογιστή καθόσον δεν υπάρχουν γενικές μαθηματικές λύσεις στο πρόβλημα του σχεδιασμού του τυπικού ενισχυμένου ναυπηγικού ελάσματος. Ένα τέτοιο έλασμα φέρει ορθές και διατμητικές τάσεις κατά μήκος των πλευρών του και φορτίσεις (συγκεντρωμένες και κατανεμημένες) κάθετα στην επιφάνειά του. Υπόκειται επίσης σε δυναμικές φορτίσεις που μπορεί να είναι σποραδικές ή και περιοδικές. Η απόκτηση μίας βέλτιστης διατομής γίνεται πιο περίπλοκη αν ληφθούν υπόψη και οι κατασκευαστικές (πραγματικές) ατέλειες. Κάτω από εξιδανικευμένες συνθήκες, η διαδικασία θα μπορούσε να συμπεριλάβει τα παρακάτω στάδια :

- Προσδιορισμός της κατεύθυνσης και ισαπόστασης των ενισχυτικών για δεδομένη φόρτιση.
- Βέλτιστη κατανομή του υλικού μεταξύ ενισχυμένου ελάσματος και νομέων.

Τα παραπάνω στάδια βασίζονται σε μία συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση και στην πράξη το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση μεθόδων

μαθηματικής βελτιστοποίησης. Η συστηματική εφαρμογή μιας τέτοιας μεθοδολογίας επιτρέπει την απόκτηση δεδομένων για ολόκληρη την κατασκευή.

3.21.9 Τα ελάσματα του εξωτερικού περιβλήματος

Η γάστρα του πλοίου είναι μία μεγάλη επιφάνεια που έχει σχετικά απλή μορφή στην περιοχή της μέσης τομής του πλοίου και γενικότερα στο παράλληλο τμήμα. Στο πωραίο και στο πρυμναίο άκρο όμως η επιφάνεια έχει διπλή καμπυλότητα και έτσι η διάταξη των ελασμάτων γίνεται πιο περίπλοκη. Από κατασκευαστικής πλευράς το πρόβλημα που τίθεται είναι η βέλτιστη διάταξη των ελασμάτων έτσι ώστε να περιορισθεί η χρήση υλικού και να διατηρηθεί η αντοχή της κατασκευής με την ελάχιστη δυνατή μείωσή της λόγω συγκολλήσεων, ενώ καταβάλλεται προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν ελάσματα με το μέγιστο δυνατό πλάτος και μήκος για να περιορισθεί ο αριθμός των εστιών συγκεντρώσεων τάσεων.

Στα άκρα του πλοίου, όπου ελαττώνεται το πλάτος και το κοίλο, μειώνεται αντίστοιχα και το πλάτος και ο αριθμός των ελασμάτων. Η ελάττωση του αριθμού των ελασμάτων επιτυγχάνεται με τη σταδιακή αντικατάσταση δυο παραλλήλων ελασμάτων με ένα έλασμα.

Τα ελάσματα είναι διατεταγμένα έτσι ώστε το μήκος τους να είναι παράλληλο με το μήκος του πλοίου σε στρώσεις, ενώ συνδέονται μεταξύ τους με διαμήκεις και εγκάρσιες συγκολλήσεις. Γενικά, η αρχική παραμόρφωση λόγω συγκολλήσεων ελαττώνεται όταν επιλέγονται μεγάλα ελάσματα και έτσι αυτά προτιμώνται. Οι μέγιστες διαστάσεις των ελασμάτων με τη σειρά τους εξαρτώνται από τα μηχανήματα εξέλασης και κοπής που χρησιμοποιούνται στο στάδιο παραγωγής. Η επιλογή των παχών των ελασμάτων της γάστρας βασίζεται σε υπολογισμούς της απαιτούμενης αντοχής και λειτουργικότητας, που αφορούν τα εξής :

- 1) Διαμήκης αντοχή.
- 2) Εγκάρσια αντοχή (υδροστατική και υδροδυναμική πίεση λόγω κρούσης κυμάτων).
- 3) Τοπικές φορτίσεις, ιδιαίτερα στα άκρα του πλοίου από σφυρόκρουση και ταλαντώσεις.
- 4) Μειώσεις πάχους λόγω διάβρωσης και φθορών γενικά, σε διάφορα σημεία της γάστρας.

5) Μείωση της αντοχής τοπικά λόγω κόπωσης, ιδιαίτερα σε συγκολλήσεις.

Οι παραπάνω παράγοντες λαμβάνονται υπόψη στους κανονισμούς των Νηογνομόνων. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις διαμήκους αντοχής, το μέγιστο πάχος απαιτείται στην περιοχή της μέσης τομής, με σταδιακή μείωση προς τα άκρα. Σε κάθε εγκάρσια τομή, το πάχος αυξάνεται από τον ουδέτερο άξονα προς τα άκρα που βρίσκονται στη μέγιστη απόσταση από αυτόν. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις εγκάρσιας αντοχής, η θεωρούμενη φόρτιση αυξάνεται γραμμικά από την ίσαλο γραμμή με το βάθος. Σε περιοχές της κατασκευής άνωθεν της ισάλου γραμμής οι θεωρούμενες φορτίσεις είναι μικρότερες. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της τοπικής φόρτισης στα άκρα της κατασκευής επιλέγεται μικρότερη ισαπόσταση νομέων. Έτσι, αυξάνεται η ακαμψία και γενικά η στιβαρότητα της κατασκευής.

Η επίδραση της διάβρωσης αντιμετωπίζεται με αύξηση του πάχους γενικά, ανάλογα με την περιοχή της κατασκευής. Η κόπωση επιφέρει μείωση της ικανότητας παραλαβής φορτίων μετά από ένα αριθμό επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Γενικά τα αποτελέσματα της κόπωσης εμφανίζονται σε συνδυασμό με την διάβρωση και μπορούν να παρουσιαστούν ρωγμές, κυρίως στην περιοχή της μέσης τομής. Η εμφάνιση των ρωγμών αυτών είναι συχνότερη σε πλοία που δεν συντηρούνται επαρκώς.

3.21.10 Η ενίσχυση του εξωτερικού περιβλήματος

Κατά την επιλογή του κατάλληλου συστήματος ενίσχυσης της πλευρικής κατασκευής, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι λειτουργικές ανάγκες του πλοίου, το μέγεθος του, το είδος του φορτιού και οι συνθήκες μεταφοράς (τρόπος στοιβασίας, απαιτούμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος). Όπως οι υπόλοιπες περιοχές της κατασκευής, έτσι και το πλευρικό περίβλημα ενισχύεται με διάμηκες ή εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης. Σε φορτηγά πλοία που έχουν εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης, τοποθετούνται νομείς με κατάλληλα διαμορφωμένα άκρα, είτε κάνοντας χρήση αγκώνων, είτε με αύξηση του πλάτους του κορμού. Εκτός των απλών νομέων, χρησιμοποιούνται και ενισχυμένοι νομείς. Οι ενισχυμένοι νομείς είναι συναρμοσμένοι, αποτελούνται δηλαδή από συγκολλημένα στοιχεία, κορμό και πέλμα, και έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις από τους απλούς νομείς.

Οι κανονισμοί ορίζουν ότι η αντοχή των νομέων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορούν να παραλάβουν υδροστατικό φορτίο στο ύψος του καταστρώματος υποδιαίρεσης (bulkhead deck), δηλαδή στο κατάστρωμα μέχρι το οποίο εκτείνονται καθ' ύψος οι εγκάρσιες φρακτές. Εκτός αυτού, συμβάλλουν στη στήριξη των εγκαρσίων ζυγών των καταστρωμάτων. Τέλος, συμβάλλουν στην αντοχή του εξωτερικού περιβλήματος όταν αυτό έρχεται σε ανεπιθύμητη επαφή με εξωτερικά στοιχεία (όπως προβλήτες, άλλα πλοία). Απαιτείται προσοχή κατά το σχεδιασμό των άκρων των νομέων, ώστε να διασφαλίζεται η μεταφορά και διάχυση φορτίων από τα οριζόντια στα κατακόρυφα στοιχεία της κατασκευής. Μία άλλη κατηγορία φορτίων που καλούνται να παραλάβουν οι ενισχύσεις της πλευρικής κατασκευής είναι οι ομοεπίπεδες στρεπτικές τάσεις (racking stresses) που αναπτύσσονται κατά τον διατοιχισμό και κατά την κρούση κυμάτων στα έξαλα. Τις φορτίσεις αυτές τις παραλαμβάνουν σε σημαντικό βαθμό οι εγκάρσιες φρακτές.

Εάν επιλεγεί διάμηκες σύστημα ενίσχυσης της πλευρικής κατασκευής συχνά χρησιμοποιούνται βολβολάμες, οι διαστάσεις των οποίων αυξάνονται προς την κατεύθυνση του πυθμένα. Το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης υπερτερεί έναντι του εγκάρσιου διότι οι πρωτεύουσες ενισχύσεις συμβάλλουν σε σημαντικό ποσοστό στη διαμήκη αντοχή και έτσι ελαττώνεται το απαιτούμενο πάχος του ελάσματος. Η σημαντική μείωση της ισαπόστασης των ενισχυτικών αυξάνει σημαντικά την αντοχή του ελάσματος σε λυγισμό και έτσι επέρχεται η αντίστοιχη μείωση του πάχους. Σε πλοία λοιπόν που η κρίσιμη φόρτιση είναι η διαμήκης, προτείνεται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης. Σε μικρότερα πλοία, για τα οποία η κρίσιμη φόρτιση είναι η εγκάρσια (υδροστατική και υδροδυναμική) το εγκάρσιο σύστημα είναι αποδοτικότερο.

3.21.11 Ενισχυμένα ελάσματα υπό καμπτικές φορτίσεις

Η απλούστερη διατύπωση του προβλήματος σχεδιασμού ενός ελάσματος υπό καμπτική φόρτιση αφορά στην επιλογή του πάχους του ελάσματος έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας. Η μεν αντοχή εξασφαλίζεται μέσω μίας μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης ενώ η λειτουργικότητα εξασφαλίζεται με τον περιορισμό του βέλους κάμψης επιλέγοντας μία μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.

Για ένα έλασμα υπό κάμψη, καθώς αυξάνεται η εξωτερική φόρτιση αυξάνονται το βέλος κάμψης και οι τάσεις. Ως μη αποδεκτές καταστάσεις μπορούμε τότε να ορίσουμε :

- (α) την υπέρβαση κάποιου προκαθορισμένου ορίου στην τιμή του βέλους κάμψης, και
- (β) την υπέρβαση κάποιας τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (ένα ποσοστό της τάσης διαρροής, εφόσον πρόκειται για ελαστικό σχεδιασμό).

Η ανάλυση της συμπεριφοράς ορθογώνιων ελασμάτων που φέρουν στατικές, καμπτικές φορτίσεις γίνεται με χρήση της ελαστικής, ελαστο-πλαστικής καθώς και πλαστικής θεωρίας. Εκτός της ανάλυσης της συμπεριφοράς των ελασμάτων είναι απαραίτητο να γίνεται και μελέτη για τον κατάλληλο σχεδιασμό τους.

Η επιλογή κατάλληλης μεθόδου σχεδιασμού ελασμάτων εξαρτάται από τη γεωμετρία (λόγο πλευρών, λυγηρότητα), τον τρόπο στήριξης και το είδος του φορτίου που φέρει το κάθε έλασμα. Πρέπει να σημειωθεί, ότι τα ελάσματα έχουν σημαντικό απόθεμα αντοχής και μετά την πρώτη διαρροή, η δε τελική αστοχία προκύπτει με τοπική υπέρβαση της κρίσιμης παραμόρφωσης θραύσης. Στην πράξη όμως αυτό δεν συμβαίνει ποτέ διότι τα ενισχυτικά στα οποία στηρίζεται το έλασμα καταρρέουν σε μικρότερα φορτία (λόγω στρεπτο-καμπτικού λυγισμού ή εγκάρσιου λυγισμού τους περί τον άξονα στήριξης). Έτσι, το έλασμα ποτέ δεν παραλαμβάνει φορτία που να πλησιάζουν το φορτίο θραύσης του.

Οι καμπτικές φορτίσεις ασκούνται κάθετα (πλάγια) στην επιφάνεια των ελασμάτων και προκύπτουν κατά κανόνα λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος καθώς και των μεταφερόμενων εμπορευμάτων στα αμπάρια του πλοίου. Εκτός βέβαια των κάθετων ασκούνται και ομοεπίπεδες φορτίσεις, θλιπτικές και εφελκυστικές, καθώς επίσης και διατμητικές. Οι τελευταίες εξισορροπούν κατά κανόνα τις τέμνουσες δυνάμεις, οι οποίες μεταβάλλονται στην διαμήκη κατεύθυνση σε όλο το μήκος του πλοίου.

Όταν εξετάζουμε την αντοχή ενός απλού μεμονωμένου ελάσματος θεωρούμε ότι αυτό είναι ενιαίο μεταξύ των σημείων στήριξης, δηλαδή τις διαμήκεις και εγκάρσιες ενισχύσεις, και αγνοούμε αρχικά (στην ελαστική περιοχή) την παρουσία των συγκολλήσεων.

Γενικά στις πραγματικές κατασκευές κατά κανόνα ασκούνται όλα τα είδη φορτίσεων σε κάποιο βαθμό και για αυτό το λόγο θα πρέπει να εξετάζεται η συμπεριφορά των ελασμάτων υπό πιο σύνθετες συνθήκες από αυτές της ομοεπίπεδης φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εξισώσεων αλληλεπίδρασης, οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε για να σχεδιαστεί ένα έλασμα που θα λάβει ένα συγκεκριμένο συνδυασμό φορτίσεων είτε για να εξετασθεί η ακεραιότητα του υπό κάποιες φορτίσεις. Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε την απόκριση των ελασμάτων θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και την επίδραση της στήριξης σε κάθε περίπτωση.

Τα απλά ελάσματα έχουν τη δυνατότητα να παραλαμβάνουν φορτία αρκετά υψηλότερα από το φορτίο που προκαλεί πρώτη διαρροή και γι' αυτό θα πρέπει να εξετάζουμε τη συμπεριφορά τους και στην ελαστο-πλαστική περιοχή. Σε ορισμένες δε περιπτώσεις εξυπηρετεί ο ελαστο-πλαστικός σχεδιασμός της κατασκευής. Τελική κατάρρευση προκύπτει όταν δημιουργηθεί ρήγμα σε κάποιο σημείο του ελάσματος. Συνήθως όμως, επειδή οι αντίστοιχες μετατοπίσεις κάθετα στην αρχική επιφάνεια είναι πολύ μεγάλες και προκύπτουν προβλήματα λειτουργικότητας του πλοίου, δεν επιτρέπονται ποτέ τόσο υψηλές φορτίσεις.

Όταν οι φορτίσεις είναι χαμηλές, τότε οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι αποκλειστικά καμπτικές και υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της πίεσης και του επαγόμενου βέλους κάμψης. Η απόκριση είναι λοιπόν γραμμική ελαστική, και μετά την αφαίρεση του φορτίου το έλασμα επανέρχεται στην αρχική του μορφή.

Όταν αυξηθεί σημαντικά το φορτίο, τότε αρχίζει και παραμορφώνεται το ουδέτερο επίπεδο του ελάσματος. Η παραμόρφωση αυτή συνοδεύεται από την παρουσία ομοεπίπεδων τάσεων και κατά συνέπεια η απόκριση ενώ συνεχίζει να είναι ελαστική παύει να είναι γραμμική. Έτσι, δεν ισχύει πλέον η γραμμικότητα στη σχέση πίεσης – βέλους κάμψης του ελάσματος και λέμε ότι έχουμε ελαστική, μη-γραμμική απόκριση. Τα παραπάνω ισχύουν για τη συνήθη γεωμετρία των ναυπηγικών ελασμάτων.

3.21.12Η μελέτη των ενισχυμένων ελασμάτων σε λεπτότοιχες μεταλλικές κατασκευές

Για τη μελέτη των ενισχυμένων ελασμάτων σε λεπτότοιχες μεταλλικές κατασκευές έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι οι οποίες βασίζονται σε αντίστοιχες απλουστευτικές παραδοχές. Οι κυριότερες είναι οι παρακάτω :

(α) Μεμονωμένο Ισοτροπικό Έλασμα : Εξετάζεται το κάθε στοιχείο του ελάσματος μεταξύ των διαδοχικών ενισχύσεων που αποτελούν τα όριά του και κατά μήκος των οποίων εφαρμόζονται διάφορες οριακές συνθήκες. Η λύση δεν αφορά την συμπεριφορά του ενισχυτικού και έτσι στην περίπτωση της κάμψης το εντατικό πεδίο αφορά μόνο στις τριτεύουσες τάσεις. Το έλασμα καλείται ισοτροπικό διότι οι ιδιότητες του υλικού θεωρούνται σταθερές σε όλες τις κατευθύνσεις.

(β) Επίπεδος Πλαισιωτός Φορέας : Το έλασμα θεωρείται ότι δρα ως πέλμα δοκού με πλάτος ίσο με την ισαπόσταση των διαδοχικών ενισχύσεων. Χρησιμοποιείται όταν ο αριθμός των ενισχύσεων είναι αρκετά μεγάλος και οι δε ενισχύσεις έχουν σταθερή διατομή.

(γ) Ορθοτροπικό Έλασμα : Το ενισχυμένο έλασμα εξετάζεται σαν έλασμα με διαφορετικούς συντελεστές ακαμψίας σε δύο κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Η μέθοδος είναι κατάλληλη όταν ο αριθμός των ενισχύσεων είναι σχετικά μεγάλος.

(δ) Σύστημα Ελάσματος – Δοκού : Εξετάζεται ένα ενισχυμένο έλασμα στο οποίο το ενισχυτικό το οποίο έχει ιδιότητες δοκού – κολόνας, δεν λαμβάνονται δηλαδή υπόψη ορισμένοι τύποι παραμόρφωσης της διατομής.

(ε) Έλασμα – Ενισχυτικό : Εξετάζεται ένα μεμονωμένο σύστημα ελάσματος – ενισχυτικού στο οποίο και τα δύο κατασκευαστικά στοιχεία συμπεριφέρονται σύμφωνα με τη θεωρία λεπτότοιχων κατασκευών (θεωρία ελασμάτων). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να είναι προσεγγιστικές ή ακριβείς, να λαμβάνεται δηλαδή υπόψη η περιβάλλουσα κατασκευή.

3.21.13 Οι φορτίσεις σε ενισχυμένα ελάσματα πλοίων

Τα ελάσματα του πλοίου είναι συνήθως ενισχυμένα με δοκούς που δίνουν στο έλασμα μεγαλύτερη ακαμψία ώστε :

- 1) Να αυξηθεί η αντοχή στις κάθετα προς το επίπεδο του ελάσματος φορτίσεις.
- 2) Να αποφευχθεί ο λυγισμός του ελάσματος.

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. Στην πράξη, η φόρτιση αντιστοιχεί σε κάποιο συνδυασμό των παραπάνω και μεταβάλλεται και στον χρόνο.

Κατά τη μελέτη 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).

Οι πλέον ακριβείς μέθοδοι βιομηχανικής παραγωγής δεν είναι σε θέση να εξουδετερώσουν την παρουσία των αρχικών ατελειών στα ελάσματα και τα ενισχυτικά τους. Η ύπαρξη τους μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά διαφορετική συμπεριφορά ενισχυμένων ελασμάτων που κατά τα άλλα είναι πανομοιότυπα. Για παράδειγμα, εάν ένα πλατύ έλασμα που φέρει διαμήκη ενισχυτικά έχει αρχικές μετατοπίσεις σε αντίθετη κατεύθυνση από το ενισχυτικό, το φορτίο που θα φέρουν τότε τα ενισχυτικά σε μονοαξονική φόρτιση θα είναι αναλόγως μεγαλύτερο και πιθανόν να προκύψει αστοχία των ενισχυτικών (τοπικός ελαστο-πλαστικός λυγισμός). Στην αντίθετη περίπτωση αναπτύσσεται μηχανισμός πλαστικής κατάρρευσης του ελάσματος, το δε τελικό φορτίο κατάρρευσης είναι διαφορετικό στις δύο περιπτώσεις. Επίσης, ο τρόπος αστοχίας θα διαφέρει στις δύο περιπτώσεις. Δηλαδή, στην πρώτη περίπτωση, μετά την κατάρρευση θα επακολουθήσει ταχεία αποφόρτιση σε αντίθεση

με τη δεύτερη. Γι' αυτό επιβάλλεται η χρήση υψηλότερων συντελεστών ασφαλείας στην περίπτωση αυτή.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών μετά την κατάρρευση είναι απαραίτητη διότι ορισμένες κατηγορίες κατασκευών επιδεικνύουν ψαθυρή κατάρρευση ενώ άλλες καταρρέουν κατά τρόπο όλκιμο. Αυτό υποδηλώνει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η αποφόρτιση είναι απότομη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η αποφόρτιση γίνεται σταδιακά.

Η παρουσία των αρχικών μετατοπίσεων, των παραμενουσών τάσεων και άλλων παραγόντων δυσχεραίνουν τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των ενισχυμένων ελασμάτων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κατά κανόνα δεν μπορούν να εφαρμοσθούν και στο σχεδιασμό. Συχνά γίνεται χρήση ημι-εμπειρικών κανόνων που βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με θεωρητικά αποτελέσματα για τη σύνταξη κανονισμών σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών και πλοίων ειδικότερα.

3.22 Γενικές Αρχές Επιλογής Διατάξεων Ενίσχυσης

Μια σύντομη επισκόπηση των κυριότερων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής και των φορτίσεων που αυτά φέρουν, οδηγεί στην εξέταση των δυνατών τρόπων ενίσχυσής τους. Θα πρέπει να ειπωθεί καταρχήν ότι 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. Τα ελάσματα που φέρουν εφελκυστικές ή θλιπτικές φορτίσεις ενισχύονται παράλληλα με τον άξονα φόρτισης τους. Όταν οι φορτίσεις είναι εφελκυστικές, το εμβαδόν της διατομής πρέπει να είναι επαρκές ώστε να μην προκύψει διαρροή. Όταν η φόρτιση είναι θλιπτική τότε προκύπτει μία σειρά πιθανών μορφών αστοχίας που πρέπει να εξετασθούν.

Εκτός από την αστοχία του ελάσματος πρέπει να θεωρήσουμε και την :

- Αστοχία του ενισχυτικού.
- Αλληλεπίδραση ελάσματος – ενισχυτικού.
- Επίδραση της τάσης διαρροής.
- Αρχικές μετατοπίσεις.
- Οριακές συνθήκες.

- Τοπική αστοχία των στοιχείων του ενισχυτικού.
- Ολική αστοχία (κατάρρευση) της διατομής.

Συμπεραίνεται ότι το πρόβλημα είναι σύνθετο και συνεπώς στο στάδιο του προκαταρκτικού σχεδιασμού θα πρέπει να καταφύγουμε σε κάποια απλή διαδικασία που να διαθέτει επαρκή ακρίβεια.

Συνήθως χρησιμοποιούνται σχέσεις που δίνουν οι κανονισμοί των Νηογνομόνων ή καμπύλες σχεδιασμού ενισχυμένων ελασμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις το πρόβλημα απλουστεύεται, και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι κύριες πιθανές μορφές αστοχίας. Για τις άλλες, για παράδειγμα τοπικές αστοχίες του κορμού ή του πέλματος του ενισχυτικού, το ενισχυμένο έλασμα σχεδιάζεται έτσι ώστε να προκύψουν για φορτίσεις υψηλότερες του φορτίου διαρροής της διατομής.

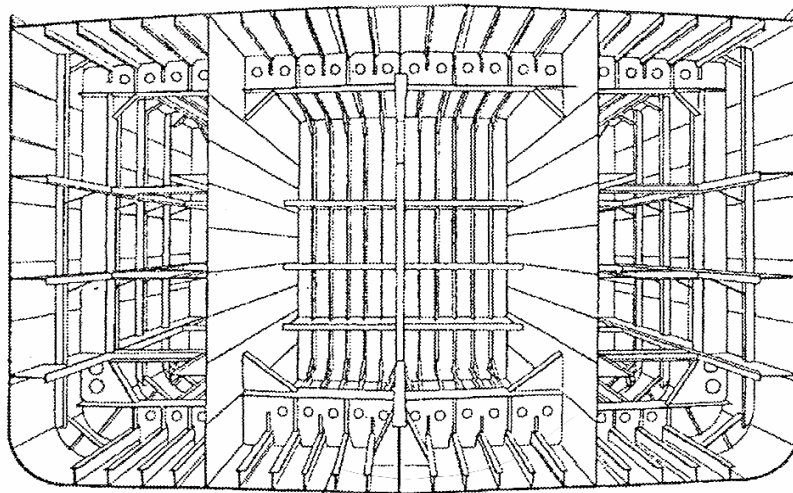
Στην περίπτωση κατανεμημένων φορτίων προστίθενται πάλι ενισχυτικά στο έλασμα, πρέπει όμως τώρα να αποφασισθεί εάν τα ενισχυτικά θα τοποθετηθούν κατά τη μία ή και τις δυο κατευθύνσεις.

Εάν επιλεγεί ενίσχυση κατά τη μια μόνο κατεύθυνση, θα πρέπει αρχικά να αποφασισθεί η κατεύθυνση των ενισχυτικών ενώ σε συνέχεια να επιλεγούν οι βέλτιστες διατάξεις, δηλαδή οι διαστάσεις των ενισχυτικών και του ελάσματος και οι τύποι των διατομών των ενισχυτικών.

Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι για να επιτευχθεί μια πραγματικά βέλτιστη λύση στο πρόβλημα του σχεδιασμού του ενισχυμένου ελάσματος πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κόστη ανέγερσης (εργασίας, υλικών) αλλά και της δια βίου συντήρησης και επισκευής του.

3.22.1 Τα συστήματα ενίσχυσης της γάστρας των πλοίων

Τα συστήματα ενίσχυσης των συμβατικών ναυπηγικών κατασκευών είναι το διάμηκες, το εγκάρσιο και το μικτό, Εικόνα 3-31. Όταν χρησιμοποιούνται οι αρχές της μηχανικής για να εξετασθεί η επάρκεια της αντοχής των διαφόρων τμημάτων της μεταλλικής κατασκευής, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διάφορες καταστάσεις φόρτισης. Εάν ένα έλασμα φέρει φορτίο σε μία μόνο κατεύθυνση, μπορούμε σχετικά εύκολα να προχωρήσουμε σε μία προκαταρκτική επιλογή του συστήματος ενίσχυσης, ιδίως όταν δεν ασκείται κάθετη φόρτιση. Όταν όμως η φόρτιση δρα σε διάφορες κατευθύνσεις, τότε το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο. Δεν θα πρέπει επίσης να αμελούνται και παράγοντες που δεν έχουν άμεση σχέση με την αντοχή.



Εικόνα 3-31: Μικτό σύστημα ενίσχυσης. Διάμηκες σύστημα ενίσχυσης στο κύριο κατάστρωμα και στον πυθμένα και εγκάρσιο στα πλευρά και στις διαμήκεις φρακτές.

Με τη ραγδαία αύξηση των διαστάσεων των εμπορικών πλοίων κατά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, προέκυψαν προβλήματα ανεπάρκειας αντοχής τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια κατεύθυνση. Μέχρι τότε χρησιμοποιείτο το εγκάρσιο σύστημα το οποίο είναι αποδοτικότερο όταν η κύρια φόρτιση δρα κάθετα στο επίπεδο του ελάσματος. Το εγκάρσιο σύστημα και σήμερα είναι διαδεδομένο, ιδίως σε πλοία με συγκριτικά μικρότερο μήκος. Εάν εξετάσουμε τις διατάξεις των ναυπηγικών κατασκευών που έχουν ηλικία μεγαλύτερη των 50 ετών θα δούμε ότι πράγματι κυριαρχεί το εγκάρσιο σύστημα.

Επειδή οι κύριες φορτίσεις του καταστρώματος και του πυθμένα οφείλονται σε ορθές (πρωτεύουσες) τάσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν λυγισμό, το διάμηκες σύστημα αποτελεί μία πρώτη φυσική επιλογή για τις περιοχές αυτές της κατασκευής.

Από πλευράς αντοχής λοιπόν το πλέον αποδοτικό σύστημα για σχετικά μεγάλα πλοία είναι το διάμηκες. Για πρακτικούς λόγους όμως χρησιμοποιείται συχνά και το εγκάρσιο, ιδίως στις πλευρές του πλοίου. Οι λόγοι είναι ότι το διάμηκες σύστημα μπορεί να προκαλέσει :

1. Προβλήματα στοιβασίας του φορτίου.
2. Προβλήματα στις συνδέσεις των εγκάρσιων φρακτών σε επιβατηγά πλοία, στα οποία η εσωτερική διάταξη είναι περίπλοκη.
3. Προβλήματα στα δίκτυα σωληνώσεων, καλωδιώσεων και εξαερισμού.

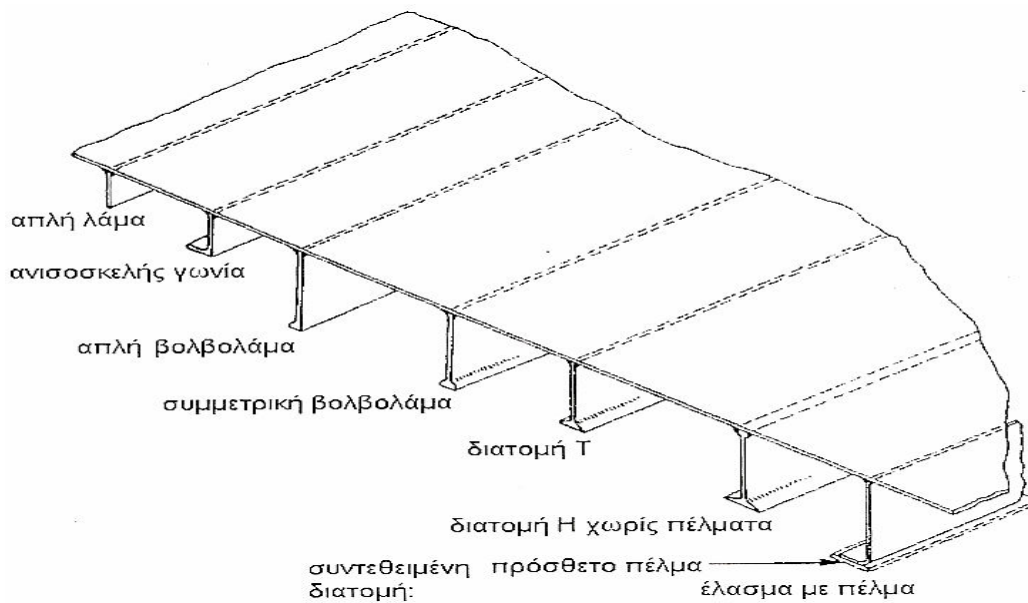
Για τους παραπάνω λόγους μία εφικτή λύση είναι να χρησιμοποιείται διάμηκες σύστημα στα καταστρώματα και στον πυθμένα και εγκάρσιο για τις πλευρές του πλοίου. Πράγματι, στα σύγχρονα εμπορικά και επιβατηγά πλοία ακολουθείται αυτή η πρακτική, ενώ στα πολεμικά πλοία, επειδή το κύριο κριτήριο σχεδιασμού είναι το ελάχιστο βάρος, χρησιμοποιείται παντού το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται το μονοκατευθυνσιακό σύστημα ενίσχυσης ή σύστημα ενίσχυσης σε μία κατεύθυνση με σκοπό τη μείωση του κόστους ανέγερσης της μεταλλικής κατασκευής. Το σύστημα αυτό συναντάται κυρίως σε εμπορικά πλοία με σχετικά απλές διατάξεις (δεξαμενόπλοια, φορτηγά χύδην φορτίου). Στο σύστημα αυτό όλα τα ενισχυτικά είναι τοποθετημένα σε μία μόνο κατεύθυνση (διαμήκη) και έτσι δεν συναντώνται νομείς (απλοί και ενισχυμένοι). Η αντοχή της κατασκευής εξασφαλίζεται επομένως με τα υπάρχοντα διαμήκη στοιχεία και μόνο. Ένα δεύτερο και σημαντικό πλεονέκτημα της διάταξης αυτής είναι η σημαντική μείωση του αριθμού των ασυνεχειών που λειτουργούν ως εστίες συγκέντρωσης τάσεων. Κατά συνέπεια οι κοπωτικές ρωγμές είναι περιορισμένες αλλά και η συντήρηση γίνεται ευκολότερα και με μικρότερο κόστος.

3.22.2 Διατομές πρωτευουσών (χυτών) ενισχύσεων

Οι διατομές που χρησιμοποιούνται για την πρωτεύουσα ενίσχυση (εξωτερικό περίβλημα, καταστρώματα και πυθμένας) της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι οι εξής :

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



Εικόνα 3-32: Οι διάφορες διατομές ενισχύσεων που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές κατασκευές

Εκτός των χυτών διατομών που αναφέρονται παραπάνω, χρησιμοποιούνται και συγκολλητές (συναρμοσμένες) διατομές. Χρησιμοποιούνται διατομές T που διαθέτουν μεγαλύτερη κοπωτική αντοχή καθώς και μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη από τις ανισοσκελείς δοκούς και τις απλές βολβολάμες, λόγω της συμμετρικής τους μορφής. Έχουν όμως το μειονέκτημα της δυσκολίας συγκόλλησης τους, ιδιαίτερα όταν είναι μικρές διατομές. Η επιλογή των διαστάσεων των ενισχυτικών γίνεται αφού καθοριστεί η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης της διατομής ενισχυτικού και ελάσματος με βάση τις απαιτήσεις του Νηογνώμονα. Για τα πλοία συνήθων διαστάσεων οι χρήσεις ασύμμετρων και συμμετρικών διατομών κρίνονται εξίσου αποδεκτές από τους κανονισμούς.

3.22.3 Ρεαλιστική εκτίμηση των κατασκευαστικών στοιχείων

Η στοιχειώδης συμπεριφορά της διατομής πρέπει να ολοκληρωθεί σε όλο το πλοίο, για να δώσει την τελική αντοχή. Το ποια στοιχεία θα πρέπει να απομονωθούν για μεμονωμένη ανάλυση είναι ένα θέμα που μένει στην κρίση του σχεδιαστή ναυπηγού.

Η γνώση γενεών σχεδιαστών πλοίων έχει διαμορφώσει σταθερά μία κατασκευή, η οποία :

- (α) Έχει περισσότερη επιφάνεια διατομής στα ενισχυτικά παρά στα ελάσματα.
- (β) Έχει τα διαμήκη ενισχυτικά σε πιο κοντινά διαστήματα από τα εγκάρσια.
- (γ) Ευνοεί σχετικά υψηλά διαμήκη ενισχυτικά, με προτεινόμενη διατομή τη συμμετρική.

Τέτοιες κατασκευές τείνουν να παρέχουν υψηλά φορτία αστοχίας (κατάρρευσης) σε θλίψη και μια αποδοτική χρήση του υλικού. Αυτό που συμβαίνει, καθώς αυξάνεται σταθερά το φορτίο, είναι ο λυγισμός στο κέντρο των πλακών μεταξύ των ενισχυτικών. Η διάχυση του φορτίου από τα κέντρα των πλακών επιβαρύνει με φορτίο κάθε διάμηκες ενισχυτικό, το οποίο καθώς το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται, τελικά θα υποστεί λυγισμό σε συνδυασμό με το συνεργαζόμενο έλασμα. Αυτό μεταφέρει όλο το φορτίο στις «σκληρές» γωνίες, οι οποίες συνήθως είναι τόσο άκαμπτες σε θλίψη που παραμένουν ευθείες ακόμη και αφού έχει ξεπεραστεί το πλαστικό όριο. Έχει βρεθεί ότι αυτές οι «σκληρές» γωνίες συμπεριφέρονται έτσι σε συνδυασμό με περίπου μισό γειτονέον έλασμα από πλάκες σε κάθε κατεύθυνση. Συνεπώς, τα στοιχεία στα οποία πρέπει να χωριστεί το κύριο σώμα του πλοίου είναι τα ελάσματα από πλάκες (plate panels), τα διαμήκη ενισχυτικά, σε συνδυασμό με ένα τμήμα γειτονέοντος ελάσματος και οι «σκληρές» γωνίες.

Ακολουθώντας τις πιο πάνω γενικές αρχές σχεδιασμού κατασκευών δηλαδή κοντινά διαμήκη ενισχυτικά μεγάλου ύψους, βαριοί εγκάρσιοι νομείς και ελάσματα των οποίων το μήκος είναι μεγαλύτερο του πλάτους τους μπορούν να αποφευχθούν δύο περιπτώσεις λυγισμού :

(α) Συνολικός λυγισμός του δικτυώματος όλων των ελασμάτων και των ενισχυτικών μαζί. Αυτό είναι πιθανόν να συμβεί μόνο όταν τα ελάσματα καταλαμβάνουν το περισσότερο υλικό και τα ενισχυτικά έχουν μικρό μερίδιο.

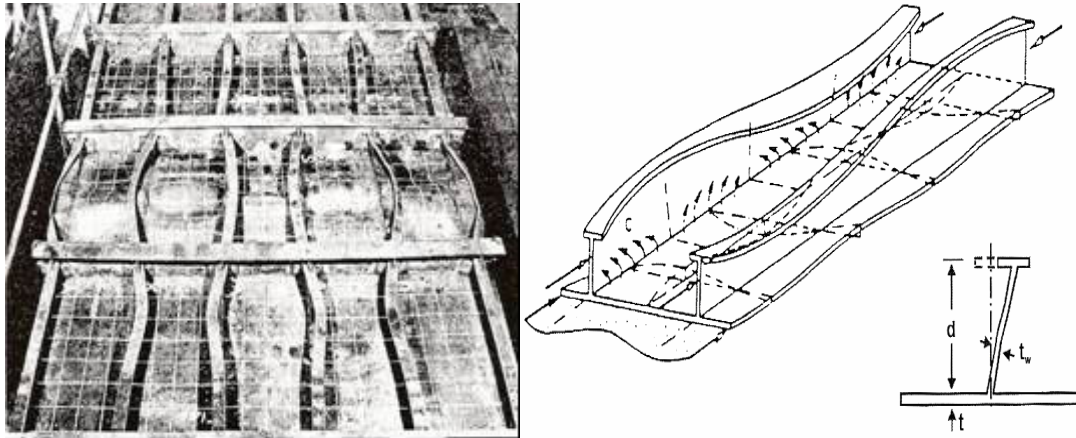
(β) Στρεπτική παραμόρφωση (tripping) των διαμήκων ενισχυτικών εξαιτίας φόρτισης πλάγιου λυγισμού ή στρέψης. Αυτό είναι πιθανόν να συμβεί σε ενισχυτικά, όπως ενισχυτικά ορθογωνικής διατομής (flat bar) με χαμηλή στρεπτική ακαμψία.

3.23 Η Αλληλεπίδραση Ελάσματος – Ενισχυτικού

Ο βαθμός στον οποίο η συμπεριφορά του ενός στοιχείου της διατομής επηρεάζει το άλλο εξαρτάται από τη γεωμετρία, τις οριακές συνθήκες κατά μήκος του άξονα σύνδεσης και το μέγεθος του μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου. Εάν αυξηθεί το φορτίο και προκύψει λυγισμός στο έλασμα, τότε το φορτίο που θα μεταφερθεί στο ενισχυτικό πιθανότατα θα οδηγήσει σε αστοχία του ενισχυτικού και στη συνέχεια θα καταρρεύσει ολόκληρη η διατομή. Εάν όμως λυγίσει πρώτα το ενισχυτικό, η διάχυση του φορτίου μπορεί να μην προκαλέσει αστοχία στο έλασμα και συνεπώς η διατομή δεν φτάνει στο όριό της. Στην περίπτωση αυτή είχαμε διατομή με σαφώς διαφορετικές ικανότητες παραλαβής φορτίων των στοιχείων της. Εάν όμως το ενισχυτικό είχε υψηλότερη τάση λυγισμού από αυτή του ελάσματος, η συνήθης περίπτωση, τότε το έλασμα αστοχεί πρώτα και ακολουθεί διάχυση του φορτίου στο ενισχυτικό.

Στην περίπτωση αυτή η τελική αστοχία της διατομής θα εξαρτηθεί από την ικανότητα παραλαβής του πρόσθετου φορτίου από το ενισχυτικό. Όταν δε προκύψει αστοχία της διατομής υπό αυτές τις συνθήκες η αποφόρτιση είναι άμεση. Η παραπάνω θεώρηση αποτελεί σημαντική απλούστευση του πραγματικού φαινομένου της αλληλεπίδρασης. Στην πραγματικότητα υπεισέρχονται μη-γραμμικά φαινόμενα (μεγάλες μετατοπίσεις, ελαστο-πλαστικό υλικό), μεταβλητές δηλαδή εξαρτημένες οριακές συνθήκες τα οποία λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι. Ο όρος εξαρτημένη οριακή συνθήκη υποδηλώνει ότι η στρεπτική ακαμψία που προσφέρει το ενισχυτικό στο έλασμα και αντίστροφα, μεταβάλλεται με το μέγεθος της φόρτισης. Αυτό συμβαίνει διότι τα στοιχεία της διατομής μετατοπίζονται σε όλο το πεδίο φόρτισης.

Κατά τη θεώρηση του μεμονωμένου ελάσματος το ισοδύναμο πλάτος σε θλίψη είναι ένα ικανοποιητικό μέτρο της αντοχής του. Όταν όμως το έλασμα αποτελεί τμήμα μιας σύνθετης διατομής, η πραγματική συμβολή του στην στήριξη των ενισχυτικών όταν δρα το φορτίο κατάρρευσης θα εξαρτηθεί και από τη δυνατότητα παραλαβής φορτίων από το γειτονικό στοιχείο (ενισχυτικό), πριν και κατά την κατάρρευση της διατομής. Σημασία έχει δηλαδή η ακαμψία του συνεργαζόμενου ελάσματος, έτσι ώστε να παρατείνεται η τελική κατάρρευση της διατομής.



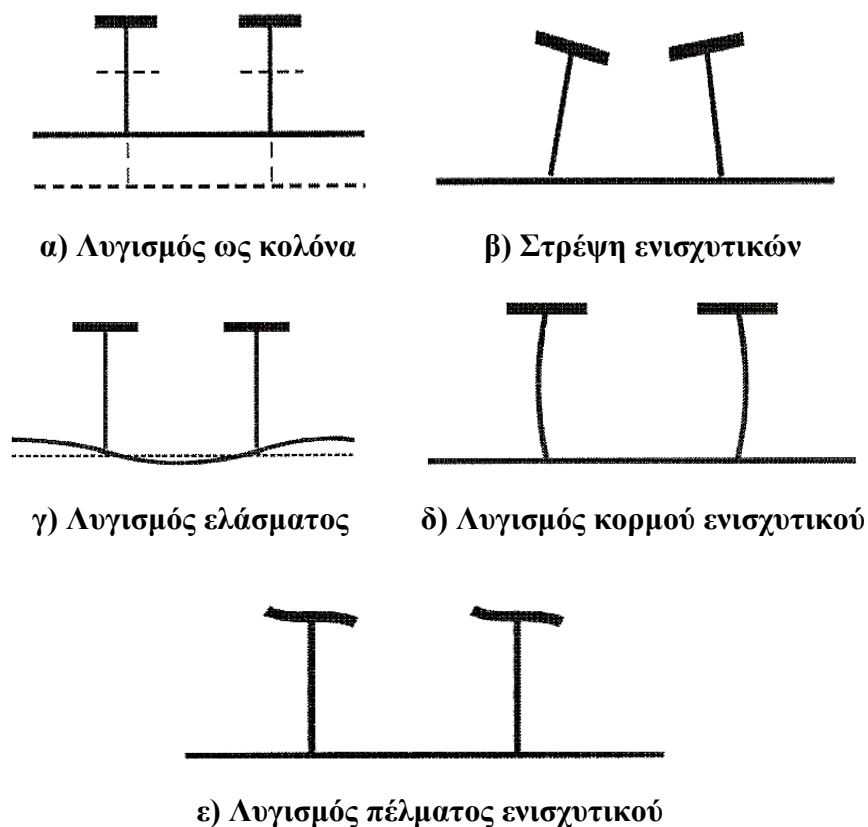
Εικόνα 3-33: Ελαστο-πλαστική κατάρρευση ελάσματος με ορθογώνιο σύστημα ενισχύσεων λόγω μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης (αριστερά) και στρεπτική αλληλεπίδραση ελάσματος και ενισχυτικού (δεξιά)

Κατά την κατάρρευση ενός ενισχυμένου ελάσματος η συμβολή του ελάσματος στην αντοχή της διατομής συνίσταται στην ικανότητα παραλαβής πρόσθετων φορτίων και όχι στη μεταφορική του ικανότητα.

3.23.1 Λυγισμός των ενισχυτικών

Πρόβλημα αντοχής σε θλίψη υπάρχει, εκτός από το κατάστρωμα, και σε όλες τις περιοχές του πλοίου που δέχονται θλιπτικές φορτίσεις, είτε σε συνδυασμό με άλλες φορτίσεις (καταναμημένες, σημειακές ή διατμητικές) είτε όχι. Επομένως, το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής, εκτός ορισμένων εξαιρέσεων (εγκάρσιες φρακτές και γενικά τα στοιχεία της κατασκευής που δέχονται εγκάρσιες φορτίσεις), πρέπει να ελεγχθεί σε λυγισμό. Από πλευράς επιθεώρησης και συντήρησης το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία, καθώς είναι ανάγκη να ληφθεί υπόψη η αστοχία που οφείλεται σε λυγισμό για ένα σημαντικό τμήμα της μεταλλικής κατασκευής. Επειδή δε η γεωμετρία των στοιχείων της κατασκευής είναι τέτοια που ο λυγισμός προκύπτει κυρίως στην ελαστο-πλαστική περιοχή, η εμφάνιση λυγισμού συνοδεύεται από τοπική κατάρρευση της κατασκευής. Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται λυγισμός σε περιοχές της κατασκευής όπου στο στάδιο του αρχικού σχεδιασμού είχε προβλεφθεί η σωστή διάταξη και διαστασιολόγηση, όμως λόγω διάβρωσης ή και κόπωσης προέκυψε ελάττωση του πάχους ή και της κρίσιμης τάσης και ακολούθησε λυγισμός και κατά συνέπεια τοπική κατάρρευση.

Ο ακριβής προσδιορισμός της συμπεριφοράς μιας κατασκευής προϋποθέτει τη θεώρηση κάθε ενός των στοιχείων από τα οποία αυτή αποτελείται ξεχωριστά. Θα εξετάσουμε τώρα τη συμπεριφορά των ενισχυτικών. Κατά τη θεώρηση της συμπεριφοράς του ενισχυτικού πρέπει να εξετάσουμε και την αλληλεπίδρασή του με το έλασμα.



Εικόνα 3-34: Μορφές αστοχίας σε ενισχυμένα ελάσματα

Όταν η αστοχία περιλαμβάνει ολόκληρο στοιχείο της κατασκευής, περιπτώσεις (α) και (β) της Εικόνας 3-34, καλείται πρωτεύουσα ή κύρια και όταν περιορίζεται σε τμήμα στοιχείου, περιπτώσεις (γ), (δ) και (ε) της ίδιας εικόνας, τότε καλείται δευτερεύουσα.

Η δευτερεύουσα αστοχία δεν προκαλεί κατάρρευση της διατομής, εάν όμως προηγηθεί της κύριας τότε ελαττώνεται το φορτίο της τελικής κατάρρευσης. Σε πρακτικές κατασκευές η τελική μορφή συνήθως περιλαμβάνει κύρια και δευτερεύοντα στοιχεία.

3.23.2 Οι διαφοροποιήσεις στην συμπεριφορά των αλουμινένιων ενισχυμένων ελασμάτων

Τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει μία σημαντική επιθυμία για την κατασκευή πλοίων από αλουμίνιο, η οποία έφερε πιο έντονα στο προσκήνιο το θέμα της εξέτασης της θραύσης ενισχυμένων ελασμάτων από χάλυβα και αλουμίνιο. Η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο διαφορετικών τύπων υλικών είναι πολύ κρίσιμη για την ανάπτυξη βελτιστοποιημένων κατασκευών στη ναυπηγική βιομηχανία όσον αφορά τη σχεδίαση των ενισχυμένων ελασμάτων με αυξημένη αντοχή σε θραύση. Στόχος είναι να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν νέες και καινοτόμες προσεγγίσεις και τεχνικές για τον έλεγχο της θραύσης των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών.

Τα ενισχυμένα ελάσματα χρησιμοποιούνται εκτενώς σε χαλύβδινες αλλά και αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές όπως είναι τα πλοία, τα υποβρύχια και οι θαλάσσιες εγκαταστάσεις. Η συμπεριφορά τέτοιων κατασκευών είναι κρίσιμης σπουδαιότητας για τη γενική κατασκευαστική αντοχή και λειτουργικότητά τους. Το αλουμίνιο κερδίζει συνεχώς έδαφος για την εφαρμογή του σε ναυπηγικές κατασκευές που υποβάλλονται σε φορτίσεις, όπου ο υψηλός λόγος αντοχής/βάρους και η ανθεκτικότητα αποτελούν πλεονέκτημα.

Τα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων από αλουμίνιο χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ποικίλες ναυπηγικές κατασκευές ως κύρια κατασκευαστικά στοιχεία. Αυτά τα ενισχυμένα πλαίσια αλουμινίου πρέπει να ανθίστανται σε συνθήκες υψηλής φόρτισης, για παράδειγμα σε επίπεδο αξονικών θλιπτικών και εφελκυστικών φορτίων.

Δεδομένου ότι το αλουμίνιο είναι ένα σχετικά νέο κατασκευαστικό υλικό σε σύγκριση με το χάλυβα, ειδικά στις ναυπηγικές εφαρμογές, οι περισσότεροι από τους υπάρχοντες σχεδιαστικούς κώδικες και κανονισμούς για τα ελάσματα και τα στοιχεία ενίσχυσής τους είναι κυρίως βασισμένοι σε κριτήρια από την εμπειρία από τις χαλύβδινες κατασκευές. Επειδή οι υλικές ιδιότητες του αλουμινίου είναι αρκετά διαφορετικές από εκείνες του χάλυβα, η υιοθέτηση των συμπεριφορών και των αποκρίσεων των χαλύβδινων ενισχυμένων ελασμάτων και τυχόν προσεγγιστικές εφαρμογές των σχεδιαστικών κριτηρίων που διέπουν τις χαλύβδινες κατασκευές σε αντίστοιχες αλουμινένιες κατασκευές είναι αβέβαιες και επισφαλείς και οδηγούν στην εξαγωγή λάθος συμπερασμάτων με αποτέλεσμα την δημιουργία κατασκευών με υψηλό κίνδυνο αστοχίας.

Η μέγιστη αντοχή των ελασμάτων και των συστημάτων ενίσχυσής τους είναι η πιο θεμελιώδης και ζωτικής σημασίας ιδιότητα για τις ναυπηγικές κατασκευές, και μεγάλη πρόοδος στην μελέτη της συμπεριφοράς τους έχει επιτευχθεί ως προς αυτό σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες. Υπάρχουν διαθέσιμες ποικίλες μέθοδοι και υπολογιστικοί κώδικες και μοντέλα για την ανάλυση της μέγιστης αντοχής των ναυπηγικών κατασκευών και των ενισχυμένων ελασμάτων από τα οποία αποτελούνται, που κυμαίνονται από τους πιο απλούς αναλυτικούς τύπους μέχρι τις πιο περίπλοκες αριθμητικές και πειραματικές μεθόδους.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Η ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

4.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εξέταση της μορφής και συμπεριφοράς των ρωγμών, όπως και η χαρτογράφηση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους στις αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές αποτελεί ένα ενδιαφέρον και πολύ σημαντικό πρόβλημα, καθώς το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε διάφορες κλίμακες μεγέθους, που κυμαίνονται από την εμφάνιση μικροσκοπικών κενών στη μεταλλική κατασκευή, την δημιουργία μεγάλων ρωγμών έως και τη θραύση των αλουμινένιων, ενισχυμένων και μη, πλαισίων ελασμάτων. Προκειμένου να μελετηθεί αποτελεσματικά και διεξοδικά αυτό το φαινόμενο στο εργαστήριο με την εκτέλεση πειραμάτων, πρέπει να βελτιστοποιηθούν κάποιοι επιπρόσθετοι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση του πειραματικού προγράμματος όπως είναι το συνολικό κόστος του κατάλληλου προς εξέταση υλικού, ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, και η σωστή χρήση των διαθέσιμων εγκαταστάσεων και τεχνικού εξοπλισμού.

Η μεθοδολογία για το σχεδιασμό των πειραμάτων προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτής της μελέτης παρουσιάζεται αρχικά, στοχεύοντας στην παρατήρηση και περιγραφή όλων των σημαντικών παραγόντων και παραμέτρων της συμπεριφοράς σε θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών. Αυτή η μεθοδολογία περιλαμβάνει την σωστή επιλογή του υπό εξέταση κατασκευαστικού υλικού, την χρήση των κατάλληλων δοκιμίων, την σωστή διαμόρφωσή τους, την απαιτούμενη μηχανουργική τους επεξεργασία, την κατάλληλη πειραματική διάταξη, την πλήρη εκμετάλλευση όλων των δυνατοτήτων που μας παρέχουν οι εγκαταστάσεις, τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης φόρτισης, την εξέταση της συμπεριφοράς του υλικού και τέλος την προσεκτική λήψη, επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Ένα εκτενές πειραματικό πρόγραμμα έχει εκπονηθεί το οποίο περιλαμβάνει μια σειρά πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού αλουμινένιων πλαισίων ελασμάτων με ποικίλους βαθμούς πολυπλοκότητας, διατάξεις και τύπους ενίσχυσης που αναπαριστούν και αντιπροσωπεύουν τις διάφορες τυπικές κατασκευαστικές εφαρμογές των ναυπηγικών κατασκευών των πλοίων. Οι δοκιμές αυτές σχεδιάζονται με σκοπό να προσδιορίσουμε και να αναλύσουμε ποιοτικά τους κανόνες που διέπουν τη συμπεριφορά σε θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών και να εξετάσουμε την έναρξη, διάδοση και σύλληψη των ρωγμών σε αυτές ώστε να οδηγηθούμε στην πλήρη χαρτογράφηση του σχεδίου της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους. Είναι γεγονός, ότι τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος θα βοηθήσουν στην ταξινόμηση των ρωγμών της μεταλλικής κατασκευής ανάλογα με την επικινδυνότητά τους και γενικότερα στην πρόβλεψη της θραύσης των ναυπηγικών κατασκευών. Η έναρξη και η διάδοση των ρωγμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του υλικού, την κατασκευαστική διαμόρφωση, την διάταξη και τον τύπο ενίσχυσης της κατασκευής, την επιβαλλόμενη φόρτιση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η διάδοση των ρωγμών μπορεί να γίνει εξαιρετικά γρήγορα, με ταχύτητα πάνω από 1.000 m/s, αλλά μπορεί επίσης να είναι και εξαιρετικά αργή, με ταχύτητα λιγότερο από 1.0 mm/έτος.



Εικόνα 4-1: Μακρο-ρωγμή μήκους 24 m στο κύριο κατάστρωμα του δεξαμενοπλοίου Castor [24] [πηγή IMO]

Η έναρξη και διάδοση των ρωγμών, κατά σταθερό ή ασταθή τρόπο, στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων είναι η σημαντικότερη αιτία που οδηγεί στην

αστοχία. Μια ναυπηγική κατασκευή περιέχει συνήθως χιλιάδες μακρο-ρωγμές (η απόσταση διαχωρισμού των παρειών της οποίας είναι της τάξης λίγων χιλιοστών) και αρκετά εκατομμύρια μικρο-ρωγμές (η απόσταση διαχωρισμού των παρειών της οποίας είναι της τάξης ενός ατόμου), Εικόνα 4-1. Όλες οι ρωγμές πρέπει να παρατηρούνται και να αξιολογούνται, συνήθως όμως μόνο εκείνες οι ρωγμές που βρίσκονται σε επικίνδυνες περιοχές της κατασκευής οι οποίες δέχονται υψηλές φορτίσεις και οι οποίες παραμορφώνονται έντονα προκαλούν έντονη ανησυχία και πρέπει να παρακολουθούνται και να εξετάζονται ως πιθανές αιτίες έναρξης θραύσης. Ένας από τους πιο σημαντικούς στόχους των ναυπηγών είναι να καθοριστεί ποιες ρωγμές αποτελούν έναν προφανή κίνδυνο για τη θραύση και ποιες όχι, έτσι ώστε να επανασχεδιάζεται η κατασκευή που περιέχει την επικίνδυνη ρωγμή είτε να αποφασίζεται η εφαρμογή της κατάλληλης και αποτελεσματικότερης τεχνικής για την επισκευή της ρωγμής.

4.2 Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Μια σπουδαία πρόκληση κατά τον σχεδιασμό του πειραματικού προγράμματος είναι το πώς θα κατανεμηθεί αποτελεσματικότερα η ερευνητική προσπάθεια, πού θα επικεντρωθεί περισσότερο η προσοχή και πώς θα γίνει η καλύτερη διαχείριση των πειραματικών αποτελεσμάτων προκειμένου να παραχθεί το βέλτιστο δυνατό έργο και να εξαχθεί το μέγιστο ποσό πληροφοριών και συμπερασμάτων ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των απαραίτητων πειραματικών δοκιμών, κερδίζοντας με τον τρόπο αυτό πολύτιμο χρόνο. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων είναι μια σύνθετη διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζονται οι σχέσεις αλληλεπίδρασης και συνάρτησης μεταξύ των ανεξάρτητων πειραματικών μεταβλητών, έτσι ώστε κάποιοι ρυθμιστικοί παράγοντες ελέγχου να μπορούν να προβλεφθούν και να καθοριστούν με μεγάλη ακρίβεια. Μόλις επιτευχθεί η καλύτερη κατανόηση της συμβολής των διαφόρων παραμέτρων που η επίδρασή τους είναι καταλυτική στην διενέργεια της πειραματικής διαδικασίας, η περαιτέρω ερευνητική προσπάθεια μπορεί να κατευθυνθεί αποτελεσματικότερα σε εκείνες τις μεταβλητές που μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα προς όφελος της έρευνας και που επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση των δοκιμών και τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Αρχικά πρέπει να τονίσουμε ότι σε οποιαδήποτε πειραματική μελέτη, ποικίλοι παράγοντες πιθανώς να είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο των μεταβλητών που επηρεάζουν την απόκριση και την συμπεριφορά των ναυπηγικών κατασκευών. Η μετάβαση σε μια πειραματική διαδικασία με μια πλήρη και πολυάριθμη ομάδα δοκιμίων, για την επακριβή αξιολόγηση όλων των επιδράσεων των διαφόρων μεταβλητών και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, θα ήταν ίσως αναποτελεσματική. Όμως, η οργάνωση ενός πλήρους σχεδιασμού των μεταβλητών των πειραμάτων για να καλύψει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς παραγόντων και των συνδυασμένων επιδράσεων αυτών στα αποτελέσματα, είναι απαγορευτική και ασύμφορη από την άποψη του πειραματικού κόστους καθώς και απίστευτα χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μία προσεκτική επιλογή των αντιπροσωπευτικότερων εφαρμογών των ναυπηγικών κατασκευών και των περιπτώσεων φόρτισης βασισμένων στην εμπειρία με σκοπό την εκτέλεση μιας πειραματικής δοκιμής για την εξέταση κάθε μιας τέτοιας αντιπροσωπευτικής περίπτωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση δοκιμίων από το ίδιο υλικό και με την ίδια κατασκευαστική διαμόρφωση των αντιπροσωπευτικών κατασκευαστικών μερών των πραγματικών ναυπηγικών κατασκευών που θέλουμε να εξετάσουμε και αντιστοιχώντας τις πραγματικές επικρατούσες συνθήκες φόρτισης, περιορισμού και παραμόρφωσης με αντίστοιχες μεταβλητές του κάθε πειράματος.

Η δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού είναι μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της αντοχής, της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας και διαφόρων άλλων χαρακτηριστικών μηχανικών ιδιοτήτων ενός κατασκευαστικού υλικού. Η επιλογή αυτού του τύπου πειραματικής δοκιμής έγινε επειδή η ανάλυσή της παρέχει όλα τα χρήσιμα στοιχεία για την ελαστική και πλαστική απόκριση του υλικού όπως είναι : (i) το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young του υλικού, (ii) ο λόγος του Poisson, (iii) το όριο διαρροής και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, (iv) η επιμήκυνση θραύσεως του υλικού και η ελάττωση του εμβαδού της διατομής (δημιουργία λαιμού) κατά την στιγμή της θραύσεως, και (v) διάφορα χαρακτηριστικά όσον αφορά την παραμόρφωση, την πλαστικοποίηση και τη σκλήρυνση του υλικού. Αυτά τα στοιχεία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον ποιοτικό έλεγχο κατά την διαδικασία της παραγωγής. Μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην ταξινόμηση των κατασκευαστικών υλικών σύμφωνα με την ποιότητα και την επίδοσή τους, στην αξιολόγηση των πρόσφατα αναπτυσσόμενων κραμάτων, και στην εξέταση της

ικανοποίησης ενός κατασκευαστικού σχεδίου όσον αφορά τις απαιτήσεις σε θραύση μιας ναυπηγικής κατασκευής.

Επιπλέον, οι μονοαξονικές δοκιμές υποβάλλουν τα δοκίμια σε ένα περιβάλλον επιβαλλόμενων τάσεων παρόμοιο με το λειτουργικό τους, όπως αντίστοιχα υποβάλλονται στην κατασκευή των πλοίων τα ενισχυμένα ή μη πλαίσια ελασμάτων συνήθως σε ένα συνδυασμό πλευρικών και ομοεπίπεδων φορτίων. Τα πλευρικά φορτία προκαλούν την κάμψη των πλαισίων, ενώ τα ομοεπίπεδα φορτία προκαλούν τον αξονικό εφελκυσμό ή θλίψη. Εντούτοις, τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικού εφελκυσμού κατάλληλα διαμορφωμένων και επεξεργασμένων δοκιμών από επιλεγμένα μέρη ενός ελάσματος κάποιου κατασκευαστικού τμήματος ή ενός υλικού μπορούν να μην αντιπροσωπεύσουν συνολικά την αντοχή ολόκληρου του τελικού προϊόντος ή την συμπεριφορά στην υπηρεσιακή του κατάσταση κάτω από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος.

4.2.1 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΟΜΑΔΕΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των κατασκευαστικών υλικών μπορεί να γίνει με τυποποιημένα (για παράδειγμα με εφαρμογή του προτύπου ASTM B557M-06) ή μη τυποποιημένα δοκίμια, ανάλογα με τη ποσότητα, το μέγεθος, τη μορφή και την επεξεργασιμότητα του διαθέσιμου υλικού. Φυσικά, η παρούσα μελέτη ενδιαφέρεται για την εξέταση των χαρακτηριστικών της μηχανικής της θραύσης ενός υλικού με περιορισμένο αριθμό διαθέσιμων δοκιμών, και κατά συνέπεια, η πειραματική εργασία έχει κατά κύριο λόγο επικεντρωθεί στις θεμελιώδεις αρχές που διέπουν την ανάπτυξη και διάδοση των ρωγμών σε ενισχυμένα πλαίσια ναυπηγικών κατασκευών του υπό εξέταση υλικού και στη χαρτογράφηση της πορείας διάδοσής τους. Οι πειραματικές δοκιμές επομένως, διαιρέθηκαν σε δύο συνολικά ομάδες :

✚ 1^η ΟΜΑΔΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ : Πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μηχανικών ιδιοτήτων του εξεταζόμενου κατασκευαστικού υλικού με χρήση δοκιμών τύπου “dogbone”.

✚ **2^η ΟΜΑΔΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ :** Πειραματικές δοκιμές με χρήση μικρής κλίμακας μεγέθους δοκιμίων, ενισχυμένων και μη ενισχυμένων πλαισίων ελασμάτων του υπό εξέταση υλικού.

✚ Η πρώτη ομάδα πειραμάτων περιλαμβάνει αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα εφελκυσμού σε έξι δοκίμια που εξετάστηκαν προκειμένου να καθοριστούν οι χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του υπό μελέτη υλικού. Για αυτή τη σειρά των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ορθογώνια λεπτά δοκίμια εφελκυσμού τύπου “dogbone” που κόπηκαν από ελάσματα του εξεταζόμενου υλικού. Όπως θα παρουσιαστεί αργότερα, υπήρξε μια αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικά μετρούμενων τιμών και των διαθέσιμων τεκμηριωμένων στοιχείων [10] των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, κάτι που επιβεβαιώνει την ορθότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων.

✚ Η επιλογή των δοκιμίων στη δεύτερη ομάδα πειραμάτων βασίστηκε στο διεθνές τυποποιημένο πρότυπο ISO12135:2002 «Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasi-static fracture toughness» [26], που χρησιμοποιεί τα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT (Compact Tension specimens), με παρουσία προϋπάρχουσας ρωγμής και διαμορφωμένο τριγωνικό ή ημικυκλικό άκρο, αμβλείας ή οξείας εγκοπής τύπου U ή τύπου V αντίστοιχα. Μια σειρά πειραματικών δοκιμών θραύσης σε μικρής κλίμακας μεγέθους πλαίσια από ελάσματα ναυπηγικού κράματος αλουμινίου εκτελέστηκαν για να εξεταστεί και να χαρακτηριστεί ο τρόπος δράσης και η συμπεριφορά των ρωγμών καθώς και η διαδικασία με την οποία γίνεται η έναρξη και διάδοση των ρωγμών σε ενισχυμένες και μη κατασκευαστικές διαμορφώσεις των πλοίων. Οι ιδιοκατασκευές (ειδικές αρπάγες για την στερέωση και συγκράτηση των δοκιμίων) της πειραματικής μηχανής που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ομάδα πειραμάτων, σχεδιάστηκαν για να αντέχουν σε εφελκυστικά φορτία που εφαρμόζονται στα δοκίμια των αλουμινένιων πλαισίων από μια μηχανή πειραματικών δοκιμών MTS ικανότητας επιβολής φορτίων ± 250 kN. Οκτώ μη ενισχυμένα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT από ελάσματα ναυπηγικού κράματος αλουμινίου, με διαστάσεις περίπου 120 mm ύψος, 125 mm πλάτος, και 4 mm πάχος, κατασκευάστηκαν με τεχνητά δημιουργούμενες ακραίες διαμπερείς κατά το πάχος ρωγμές, οι οποίες προσανατολίστηκαν οριζόντια στο μέσο του ύψους των δοκιμίων. Επιπλέον, σε αυτή την ομάδα πειραμάτων, συμπεριλαμβάνονται ακόμα εννέα

δοκιμές, σε παρόμοια με τα προηγούμενα, ενισχυμένα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT από το ίδιο ναυπηγικό κράμα αλουμινίου, αλλά με διάφορες γεωμετρίες, τύπους ενισχυτικών (απλές λάμες ή ενισχυτικά τύπου-T), διαμορφώσεις ενισχυτικών (εξελασμένα ή συγκολλητά ενισχυτικά), και ρυθμό μεταβολής μετατόπισης για κάθε δοκιμή ξεχωριστά.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι για την εκάστοτε πειραματική ομάδα ανάλογα με τη μορφή και το μέγεθος των εξεταζόμενων δοκιμίων, χρησιμοποιούνταν από μια ποικιλία εξαρτημάτων της μηχανής (αρπάγες), τα κατάλληλα κάθε φορά για τη συγκράτηση των δοκιμίων. Έτσι, σε αυτή την ομάδα πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά εξαρτήματα για τη συγκράτηση των δοκιμίων στην πειραματική μηχανή λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους τους και της διαφορετικής τους μορφής σε σχέση με τα δοκίμια για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Τα ειδικά αυτά διαμορφωμένα προσαρτήματα εφελκυστικών δοκιμών που σχεδιάστηκαν για την συγκράτηση των δοκιμίων σε αυτή τη συγκεκριμένη πειραματική ομάδα παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

4.2.2 Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ Ο ΤΥΠΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΑΚΡΩΝ ΤΟΥΣ

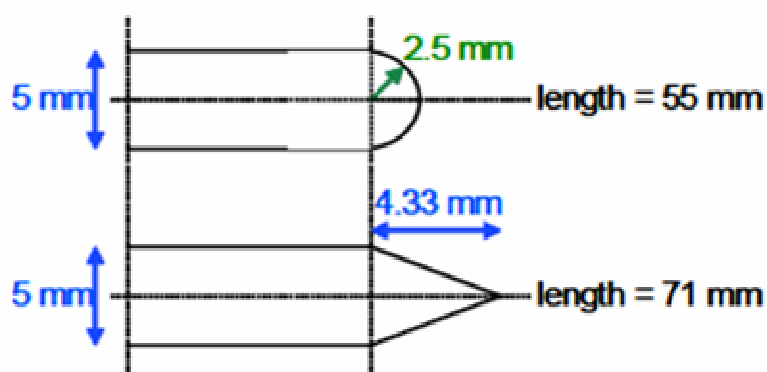
Η θραύση θεωρείται συχνά ως διαδικασία στην οποία η αυξανόμενη φόρτιση προκαλεί ξαφνικά την επιτάχυνση της έναρξης και διάδοσης μιας προϋπάρχουσας ρωγμής. Παρατηρώντας τις ναυπηγικές κατασκευές που έχουν υποστεί θραύση διαπιστώνουμε ότι οι ρωγμές μπορούν να διαμορφωθούν σε όλες τις πιθανές παραλλαγές και να αποκτήσουν μια ποικιλία γεωμετρίας και μορφών. Μια παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί σε βάθος στις κατασκευές αυτές είναι η επίδραση της γεωμετρίας των ρωγμών, με έμφαση στο αρχικό μήκος και στον τύπο του άκρου των ρωγμών (ημικυκλικό τύπου U ή τριγωνικό τύπου V άκρο), στη διάδοση των ρωγμών και τη σύλληψή τους σε ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων. Αυτό σχετίζεται με την ορθά διατυπωμένη και αποδεκτή αντίληψη ότι η ολκιμότητα των υλικών εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες του εντατικού πεδίου και τον περιορισμό των ακρών των ρωγμών (Ο' Dowd [34]).

Η ανάπτυξη των ρωγμών στα όλκιμα ελαστο-πλαστικά υλικά έχει εξεταστεί λεπτομερώς. Στην περίπτωση που η πλαστική ζώνη στο άκρο της ρωγμής είναι

μεγάλη έναντι των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου (πάχος, μήκος και πλάτος του δοκιμίου), οι συνθήκες φόρτισης των ακρών των ρωγμών δεν καθορίζονται επακριβώς, από την γραμμική ελαστική θεωρία της θραύσης (Linear Elastic Fracture Mechanics). Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες για την μελέτη της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών περιλαμβάνουν είτε κριτήρια θραύσης σε μακροσκοπική κλίμακα είτε τοπικές προσεγγίσεις βασισμένες στη μηχανική αστοχία.

Η διαμόρφωση μιας εγκοπής στο άκρο της ρωγμής ενός δοκιμίου εφελκυσμού προκαλεί τοπικά ανακατανομή του εντατικού πεδίου και πιθανώς μια μικρή «διαστρέβλωση» της εφαρμοζόμενης μονοαξονικής φόρτισης, με αποτέλεσμα μία τοπική τριαξονική εντατική κατάσταση στη ρίζα της εγκοπής. Η επίδραση της μορφής και της γεωμετρίας των διαμορφωμένων άκρων στη συμπεριφορά των ρωγμών (ανάπτυξη και διάδοση) αποφασίστηκε να διερευνηθεί περαιτέρω από την παρούσα μελέτη για το υπό εξέταση ναυπηγικό κράμα αλουμινίου. Οι μορφές του άκρου των ρωγμών που εξετάστηκαν ως μεταβλητές μέσω της πειραματικής διαδικασίας ήταν οι εξής δύο :

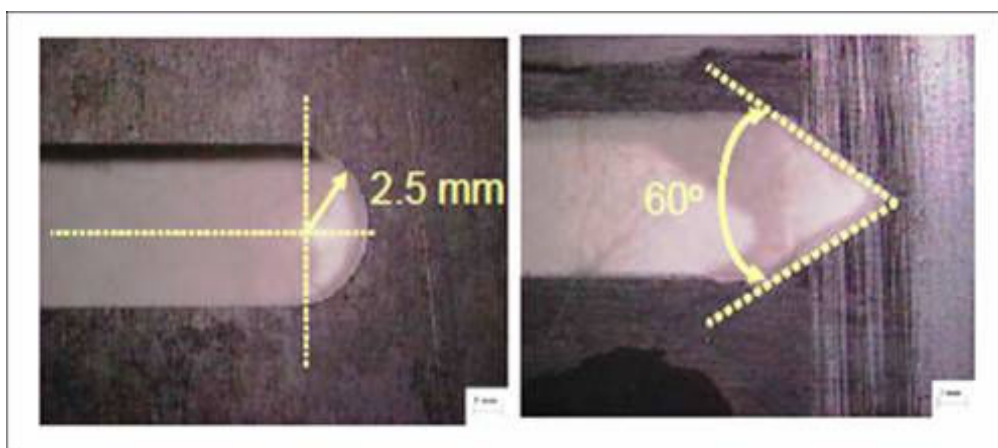
- (i) Ημικυκλικό άκρο ρωγμής (αμβλεία εγκοπή τύπου U, ακτίνας 2.5 mm).
- (ii) Τριγωνικό άκρο ρωγμής (οξεία εγκοπή τύπου V, μήκους 4.33 mm).



Εικόνα 4-2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τεχνητών ρωγμών των δοκιμίων με αρχικό μήκος είτε 55 mm είτε 71 mm και διαφορετική διαμόρφωση των άκρων τους

Η Εικόνα 4-2 παρουσιάζει τις σχηματικές αναπαραστάσεις των τεχνητών ρωγμών στις οποίες περιγράφεται το αρχικό μήκος των ρωγμών καθώς επίσης και η διαμόρφωση και γεωμετρία των δύο διαφορετικών τύπων των άκρων των ρωγμών που εξετάστηκαν.

Δεδομένου ότι ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας ήταν να χαρτογραφηθεί η ακολουθούμενη πορεία διάδοσης των ρωγμών στα ενισχυμένα πλαίσια των ελασμάτων του ναυπηγικού κράματος αλουμινίου, το αρχικό μήκος των ρωγμών επιλέχτηκε ως παράμετρος προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανή απόκλιση και ποικιλομορφία στις ακολουθούμενες πορείες των ρωγμών σε σχέση με το διαθέσιμο μήκος του δοκιμίου που η ρωγμή θα έχει για να διαδοθεί μέχρι να φτάσει στο πέλαμα του ενισχυτικού (είτε στην παρειά είτε στη συγκόλληση του εξελασμένου ή συγκολλητού ενισχυτικού αντίστοιχα).



Εικόνα 4-3: Φωτογραφίες από στερεοσκόπιο που παρουσιάζουν τα δύο είδη των αρχικά διαμορφωμένων άκρων των τεχνητών ρωγμών των δοκιμίων: ημικυκλικό άκρο τύπου U (αριστερά) και τριγωνικό άκρο τύπου V (δεξιά)

Επιπλέον, επειδή η μορφή των ρωγμών επιλέχτηκε προκειμένου να ικανοποιούνται οι γενικές απαιτήσεις των διεθνών τυποποιημένων προτύπων, η γεωμετρία των ακρών των ρωγμών τέθηκε ως παράμετρος και αξιολογήθηκε περαιτέρω. Στην Εικόνα 4-3, παρουσιάζονται οι πραγματικές εικόνες των ρωγμών των δοκιμίων οι οποίες λήφθηκαν πριν από την πραγματοποίηση των δοκιμών και για τις δύο περιπτώσεις διαμορφωμένου άκρου ρωγμής, και στις οποίες μετρήθηκε με τη βοήθεια του στερεοσκοπίου η αρχική γεωμετρία τους.

4.2.3 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ

Μια μεγάλη ποικιλία υλικών χρησιμοποιείται στη ναυπηγική για την κατασκευή των πλοίων και των ναυπηγικών κατασκευών γενικότερα, με το χάλυβα

να αποτελεί την βασική επιλογή. Σε μια προσπάθεια να μειωθεί το κατασκευαστικό κόστος, η συντήρηση και οι λειτουργικές δαπάνες, η σύγχρονη ναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιεί όλο και περισσότερο τα κράματα αλουμινίου ως μέσο μείωσης του πάχους των ελασμάτων, και έτσι του βάρους της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων με ότι οφέλη αυτό συνεπάγεται, όπως περιγράψαμε στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας.

Στην παρούσα μελέτη, το εξεταζόμενο υλικό που επιλέχθηκε ως βάση για την εκτέλεση των πειραμάτων είναι το ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 1561 ή ισοδύναμα AlMg6MnZr σύμφωνα με το πρότυπο ISO 209-1 [27], το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ήδη στην κατασκευή σύγχρονων πλοίων και σε ποικίλες εφαρμογές σε διάφορες ναυπηγικές κατασκευές.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα τεκμηριωμένα στοιχεία, η επί τοις εκατό περιεκτικότητα των στοιχείων πρόσμιξης του ναυπηγικού κράματος αλουμινίου 1561 ή ισοδύναμα AlMg6MnZr είναι :

- **Μαγνήσιο (Mg) : 5.5 - 6.5 %**
- **Βηρύλλιο (Be) : 0.0001 - 0.003 %**
- **Ζιρκόνιο (Zr) : 0.02 - 0.12 %**
- **Αλουμίνιο (Al) : το υπόλοιπο**



Εικόνα 4-4: Ναυπηγικά ελάσματα και ενισχυμένα πλαίσια αλουμινίου με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές και από τα οποία κόπηκαν τα εξεταζόμενα δοκίμια εφελκυσμού

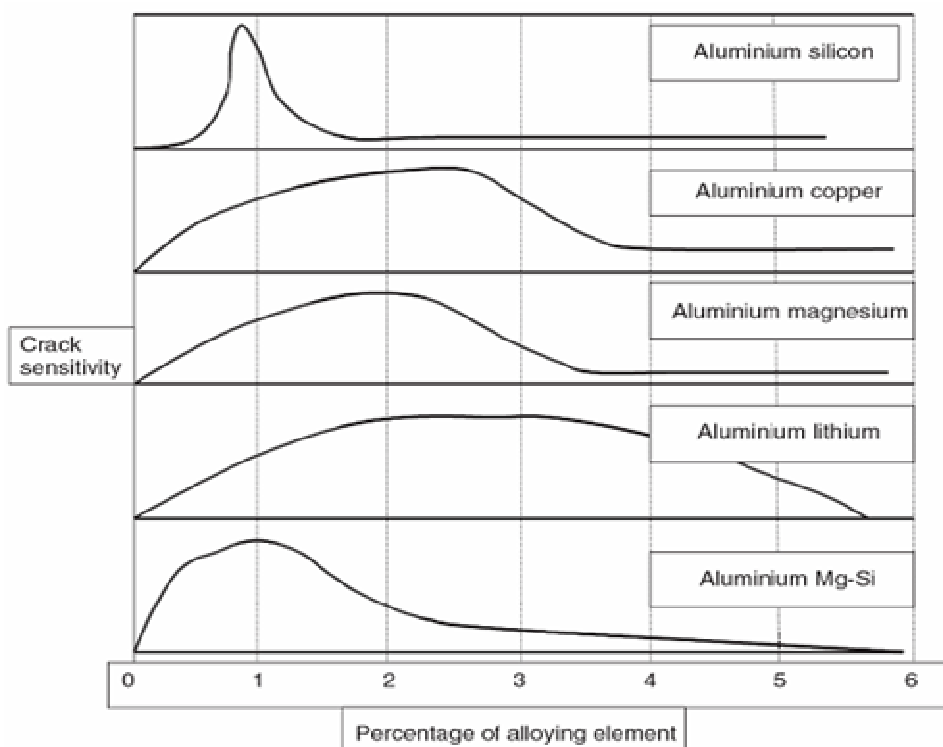
Το ναυπηγικό αλουμίνιο διατίθεται συνήθως στη μορφή λεπτών ελασμάτων φύλλων, κατατομών, ενισχυμένων πλαισίων, δηλαδή φύλλων ελασμάτων με εξελασμένα ενισχυτικά και σε σωλίνες. Στην δική μας περίπτωση τα δοκίμια με τα εξελασμένα ενισχυτικά από το ναυπηγικό κράμα αλουμινίου 1561 που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα κόπηκαν από ένα ενισχυμένο πλαίσιο ναυπηγικού ελάσματος με διαστάσεις 4 x 8000 x 1670 (πάχος x μήκος x πλάτος σε mm), που αντιστοιχεί σε μια συνολική μάζα 201.600 Kg. Επίσης, τα μη ενισχυμένα δοκίμια κόπηκαν από ένα απλό φύλλο ελάσματος με διαστάσεις 4 x 1500 x 400 mm, που αντιστοιχεί σε μια συνολική μάζα 63.600 Kg. Η πυκνότητα του υλικού είναι $2.65 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ με βάση τα στοιχεία του κατασκευαστή, Εικόνα 4-4.

Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως τεκμηριώνονται επίσης από τα διαθέσιμα τεκμηριωμένα στοιχεία του κατασκευαστή είναι :

- Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό : $\sigma_{TS} = 332.2 \text{ MPa (34 Kg/mm}^2\text{)}$.
- Όριο διαρροής : $\sigma_Y = 186.2 \text{ MPa (19.0 Kg/mm}^2\text{)}$.
- Σχετική επιμήκυνση θραύσης (αντοχή έναντι των ρωγμών) κατά μήκος των ινών του υλικού : $\delta_R = 11.0 \%$.

Αυτό το ναυπηγικό κράμα αλουμινίου – μαγνησίου χαρακτηρίζεται ως ένα μέσης αντοχής μη θερμικά σκληρυνόμενο κράμα αλουμινίου. Επίσης, η ανάπτυξη θερμότητας κατά τη συγκόλληση, σε ένα κράμα αυτής της ομάδας δεν προκαλεί σημαντική μείωση της αντοχής του στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη (Heat Affected Zone).

Ο κάθε τύπος κράματος αλουμινίου έχει διαφορετική ευαισθησία και είναι σε διαφορετικό βαθμό ευάλωτος όσον αφορά την ανάπτυξη ρωγμών, γεγονός που εξαρτάται από το βασικό στοιχείο πρόσμιξης και τη συγκέντρωσή του στο τελικό κράμα αλουμινίου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-5 (Mazzolani [15]).



Εικόνα 4-5: Η επίδραση του βασικού στοιχείου πρόσμιξης και της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας στην ευαισθησία των κραμάτων αλουμινίου όσον αφορά την ανάπτυξη των ρωγμών [15]

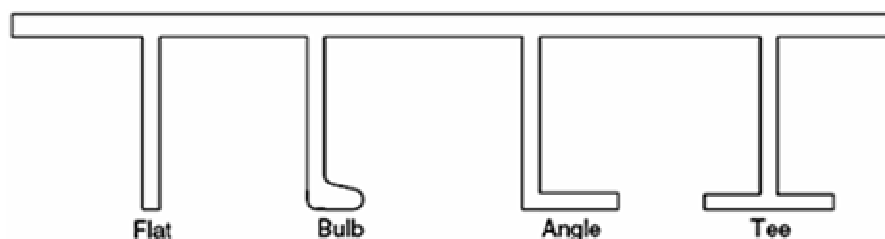
4.2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Δύο είναι οι τύποι της κατασκευαστικής διαμόρφωσης της ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν και εξετάστηκαν κατά την εκτέλεση του πειραματικού προγράμματος: (i) τα εξελασμένα και (ii) τα συγκολλητά ενισχυτικά τύπου-T και απλής λάμας, αντίστοιχα. Αν και η ολκιμότητα των διαφόρων ναυπηγικών κατασκευαστικών χαλύβων έχει εξεταστεί ήδη από τον Burch [35] και τον Pussegoda [37], [38], η επίδραση της κατασκευαστικής διαμόρφωσης δεν έχει μελετηθεί ποτέ ως σημαντική παράμετρος για τη θραύση, αλλά έχει μόνο θεωρηθεί και αναπτυχθεί ως μηχανισμός σύλληψης των ρωγμών. Η ίδια προσέγγιση έχει ακολουθηθεί και από τον Chao [36] κατά την εξέταση της διάδοσης των ρωγμών σε δοκίμια με αυχενικές συγκολλήσεις και τον υπολογισμό του ρυθμού διάδοσης των ρωγμών. Η επιρροή των διαστάσεων της κατασκευής στη σύλληψη των ρωγμών για τους ναυπηγικούς χάλυβες έχει εξεταστεί από τον Priest [41], αποδεικνύοντας ότι τόσο το πλάτος όσο

και το μήκος της κατασκευής επιδρούν στο ρυθμό απελευθέρωσης της ενέργειας κατά τη σύλληψη των ρωγμών.

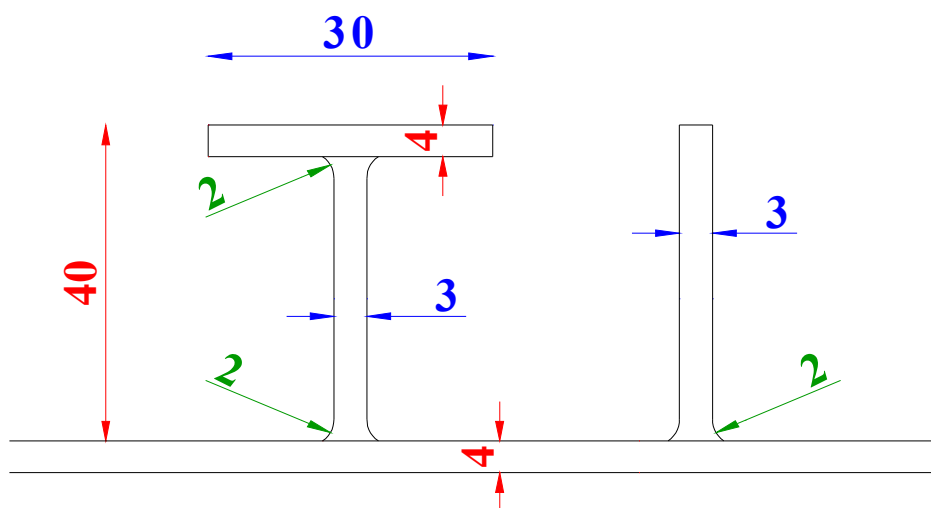
4.2.5 ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ενισχυτικών που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές είναι οι απλές λάμες, τα ενισχυτικά διατομής T, οι απλές και οι συμμετρικές βολβολάμες και οι ανισοσκελείς γωνίες, Εικόνα 4-6.



Εικόνα 4-6: Οι κυριότεροι τύποι ενισχυτικών που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές

Στην παρούσα μελέτη επικεντρωθήκαμε σε δύο από τους προαναφερθέντες τύπους ενισχυτικών. Έτσι, επιλέχθηκαν και εξετάστηκαν δοκίμια με ενίσχυση απλής λάμης και ενισχυτικών διατομής T.



Εικόνα 4-7: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις των ενισχυτικών τύπου-T (αριστερά) και απλής λάμης (δεξιά) που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των εξεταζόμενων εξελασμένων και συγκολλητών δοκιμίων CT, αντίστοιχα (διαστάσεις σε mm)

Τα εξελασμένα δοκίμια με τα εγκατεστημένα ενισχυτικά διατομής T κόπηκαν από μεγάλα ενισχυμένα ελάσματα του υπό μελέτη κράματος αλουμινίου της συγκεκριμένης διαμόρφωσης τα οποία έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή ενός υπάρχοντος πλοίου. Επομένως, αυτός ο τύπος ενίσχυσης έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με ρεαλιστικές προδιαγραφές, έτσι ώστε να ανθίσταται αποτελεσματικά στα λειτουργικά φορτία που αναπτύσσονται στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι έχει επιλεγεί ως κατάλληλο να φέρει όλο το εύρος των φορτίσεων που θεωρούνται ως πιθανές να αντιμετωπίσουν οι ναυπηγικές κατασκευές, αλλά η συμπεριφορά του έναντι θραύσης θα πρέπει να εξεταστεί αφού αποτελεί έναν αστάθμητο παράγοντα, δύσκολο να προβλεφθεί. Τέλος, πρέπει να επισημάνουμε ότι κατά τη διάρκεια του πειραματικού προγράμματος δεν εξετάστηκε η ενδεχόμενη επίδραση του πάχους των δοκιμίων στα χαρακτηριστικά της θραύσης, αφού κρατήθηκαν εξ αρχής ως σταθερά και δεν μεταβλήθηκαν τόσο το πάχος των ελασμάτων όσο και των ενισχυτικών τους.

4.2.6 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Τα περισσότερα από τα κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου εμφανίζουν πολύ καλή συγκολλητότητα. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι συγκόλλησης των κραμάτων αλουμινίου είναι με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW), καλούμενη συγκόλληση TIG (για το αδρανές αέριο βολφραμίου), ή συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding, GMAW), καλούμενη συγκόλληση MIG (για το αδρανές αέριο μετάλλων). Η GTAW συγκόλληση χρησιμοποιείται συνήθως για να ενώσει ελάσματα πάχους περίπου από 0.8 έως 3.2 mm, ενώ η συγκόλληση GMAW χρησιμοποιείται σε παχύτερα ελάσματα.

Όλα τα κράματα αλουμινίου χαρακτηρίζονται από τη μείωση της αντοχής τους στη Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη της συγκόλλησης (ΘΕΖ), αν και αυτή η μείωση είναι μικρότερη στα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου (σειρά 5xxx). Ο Rigo et al. [43] ερεύνησε την επίδραση της συγκόλλησης στην μέγιστη αντοχή, επικεντρώνοντας στην περιοχή της συγκόλλησης, στο πλάτος της ΘΕΖ, και την αντίστοιχη υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού λόγω της αναπτυσσόμενης υψηλής θερμοκρασίας. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι δύο βασικότερες παράμετροι που

επηρεάζουν συνήθως την μέγιστη αντοχή είναι το όριο διαρροής του υλικού και το πλάτος της ΘΕΖ. Η επίδραση των παραμενουσών τάσεων, οι αρχικές ατέλειες και σφάλματα της συγκόλλησης θεωρείται ότι έχουν δευτερεύουσα επίδραση. Εντούτοις, μια πιο πρόσφατη και λεπτομερής έρευνα που αφορά στην μείωση της μέγιστης αντοχής των πλαισίων ελασμάτων λόγω της ελάττωσης του ορίου διαρροής στη ΘΕΖ αποδεικνύει ότι η μείωση που προκύπτει είναι λιγότερο σημαντική από την αρχικά αναμενόμενη (Richir [44]).

Η συγκόλληση των πειραματικών δοκιμίων του εξεταζόμενου ναυπηγικού κράματος αλουμινίου για την παρούσα μελέτη, βασίστηκε σε προδιαγραφόμενες διαδικασίες και μεθόδους συγκόλλησης οι οποίες περιγράφονται από τεκμηριωμένα τεχνικά στοιχεία που παρείχε το ναυπηγείο. Τα συγκολλητά δοκίμια έχουν υποστεί κάποιες αρχικές παραμορφώσεις λόγω της συγκόλλησης, οι οποίες όμως περιορίστηκαν σε ένα μέγιστο όριο των 2 mm. Γενικά, οι παραμορφώσεις λόγω της συγκόλλησης είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν επακριβώς δεδομένου ότι εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους όπως περιγράφονται από τον Bruce et al. [45]. Πολλές από αυτές τις παραμέτρους μεταβάλλονται υπό την επίδραση διαφορετικών συνθηκών.

4.2.7 Η ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (Experimental set-up)

Οι δοκιμές εφελκυσμού εκτελέστηκαν στη πειραματική μηχανή εφελκυσμού MTS του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, η οποία παρέχει μέγιστη δυνατότητα επιβαλλόμενης φόρτισης ± 250 kN. Αφού στερεωθεί το ορθογώνιο δοκίμιο εφελκυσμού τύπου “dogbone” στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, προσαρμόζεται κατάλληλα σε αυτό ένα επιμηκυσιόμετρο στο μέσο περίπου του ελεύθερου τμήματός του και αρχίζει η φόρτιση. Για διάφορα φορτία καταγράφονται οι αντίστοιχες ενδείξεις που παίρνουμε από τις άντυγες του επιμηκυσιομέτρου ώστε να καταγράψουμε την προκαλούμενη παραμόρφωση, δηλαδή την επιμήκυνση του δοκιμίου σε σχέση με τη φόρτιση μέχρι τη θραύση, για τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υπό εξέταση κράματος αλουμινίου 1561, Εικόνα 4-8.



Εικόνα 4-8: Η πειραματική διάταξη κατά τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561 με τη χρήση δοκιμίων τύπου “dogbone”. Διακρίνονται επίσης το επιμηκυνσιόμετρο και οι χρησιμοποιούμενες αρπάγες της μηχανής για τη συγκράτηση των δοκιμίων

Αν κατά το πείραμα εξαντληθούν οι ενδείξεις της άντυγας, σταματάμε τη φόρτιση, μηδενίζουμε το επιμηκυνσιόμετρο (το επανατάσσουμε) και μετά συνεχίζουμε φροντίζοντας στις καινούργιες ενδείξεις να προσθέτουμε την τελευταία ανάγνωση πριν την επανάταξη. Οι κωδικοποιημένες μετρήσεις που προέκυπταν από την εκτέλεση κάθε πειράματος αποθηκεύονταν και αναλύονταν με την βοήθεια ενός προσωπικού υπολογιστή που είχε συνδεθεί άμεσα με τη συσκευή καταγραφής των μετρήσεων της πειραματικής μηχανής.

Ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη και ο οποίος παρουσιάζει σπουδαίο ενδιαφέρον για την απόκριση των ναυπηγικών κατασκευών είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης και η ευαισθησία που εμφανίζουν, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των επιβαλλόμενων φορτίσεων στο θαλάσσιο περιβάλλον. Η δυσθραυστότητα του χάλυβα, ο οποίος είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο υλικό για τις ναυπηγικές κατασκευές, είναι μια ιδιότητα του υλικού η οποία είναι ιδιαίτερα συσχετισμένη με το ρυθμό παραμόρφωσης. Εντούτοις, για τους περισσότερους ναυπηγικούς χάλυβες η γνώση της ολκιμότητας του υλικού, όπως αυτή μετριέται από την παραμόρφωση θραύσης $\bar{\epsilon}_f$, είναι κυρίως χρήσιμη για τις περιπτώσεις ρυθμού φόρτισης που εμφανίζονται στις ημιστατικές δοκιμές ($\epsilon = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). Παρόλα αυτά, τα πλοία και οι ναυπηγικές κατασκευές γενικότερα κατά τη

διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής μπορούν να υποβληθούν σε σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς σε σχέση με αυτόν που συναντάται στις ημιστατικές φορτίσεις. Έτσι, υπάρχει μια διακύμανση στην ταχύτητα επιβολής της φόρτισης, από μεσαίο ρυθμό φόρτισης ($\varepsilon = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$) στην περίπτωση για παράδειγμα σφυρόκρουσης έως ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς φόρτισης ($\varepsilon = 2 \text{ s}^{-1}$) στην περίπτωση δυναμικών φορτίσεων, όπως για παράδειγμα, της σύγκρουσης. Ο προσδιορισμός της δυσθραυστότητας των συνήθους και υψηλής αντοχής χαλύβδινων ελασμάτων πλοίων, πραγματοποιήθηκε για ρυθμούς φόρτισης που αντιπροσωπεύουν τις στατικές, ημιστατικές, και δυναμικές συνθήκες φόρτισης από τον Pussegoda et al. [39].

Για την παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε όλα τα πειράματα να πραγματοποιηθούν σε ένα εύρος διακύμανσης του ρυθμού της επιβαλλόμενης φόρτισης που κυμαίνεται από 0.5 έως 2.00 mm/min, με σκοπό την επίτευξη χαμηλού ρυθμού παραμόρφωσης. Επομένως, οι πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού που εκτελέστηκαν με αυτό τον ρυθμό φόρτισης μπορούν να θεωρηθούν ως ημιστατικές.

Όλα τα δοκίμια CT που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα υπέστησαν πριν τις δοκιμές κατάλληλη μηχανουργική επεξεργασία, είτε για την διαμόρφωση των άκρων των τεχνητών ρωγμών, είτε στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκιμίων για την ελάττωση του υλικού του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate), με σκοπό την εξέταση της επίδρασής τους στην πορεία των ρωγμών. Οι παράλληλες πλευρές του ανοίγματος της ρωγμής σε όλα τα δοκίμια είχαν απόσταση 5 mm μεταξύ τους, και ήταν κάθετες ως προς το άκρο της ρωγμής είτε αυτό είχε μορφή αμβλείας εγκοπής τύπου U είτε οξείας εγκοπής τύπου V. Προκειμένου να μετρηθούν οι ακριβείς διαστάσεις της ρωγμής και του διαμορφωμένου άκρου τους χρησιμοποιήθηκε και το στερεοσκόπιο του εργαστηρίου.

Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές εφελκυσμού για τη μελέτη της θραύσης των δοκιμίων του κράματος αλουμινίου 1561, οποιεσδήποτε χρήσιμες πληροφορίες και απαραίτητες μετρήσεις του εκάστοτε πειράματος καταγράφονταν τόσο από μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή όσο και από έναν υπολογιστή, ενώ κάποιες φορές χρησιμοποιήθηκε και το οπτικό μικροσκόπιο. Ο υπολογιστής κατέγραφε τα δεδομένα που εξήχθησαν από το κάθε πείραμα λαμβάνοντας στοιχεία όσον αφορά τη φόρτιση από την πειραματική μηχανή MTS. Επιπρόσθετα, η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή χρησιμοποιήθηκε για να καταγράψει τα διαδοχικά στάδια των πειραμάτων μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, προσφέροντας ταυτόχρονα μια παραστατική απεικόνιση της

παραμόρφωσης των δοκιμίων καθώς και των χαρακτηριστικών ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών με την πάροδο του χρόνου, Εικόνα 4-9.



Εικόνα 4-9: Η πειραματική διάταξη για τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού στα ενισχυμένα και μη συμπαγή δοκίμια CT, όπου διακρίνονται το εξεταζόμενο δοκίμιο, οι αρπάγες και τα μπουλόνια συγκράτησής του, οι πείροι ασφαλείας, καθώς και η χρησιμοποιούμενη ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής

4.3 1^η ΟΜΑΔΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ: Ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΥΠΟΥ “dogbone”

4.3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η γνώση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών παίζει έναν από τους σπουδαιότερους ρόλους στον υπολογισμό των διαστάσεων των τμημάτων μιας κατασκευής και στην επιλογή των υλικών από τα οποία θα κατασκευασθεί και επομένως έχει άμεση σχέση με το κόστος της. Ο προσδιορισμός των επικίνδυνων

ορίων φορτίσεως των διαφόρων υλικών σε όλες τις δυνατές καταπονήσεις και στην συνέχεια ο καθορισμός των ασφαλών ορίων φορτίσεως σε κάθε περίπτωση αποτελούν στοιχεία απαραίτητα για την κατάλληλη και ορθή χρήση των υλικών στους διάφορους κλάδους της μηχανικής.

Ο μηχανικός δεν μπορεί να υπολογίσει την συμπεριφορά ενός μεταλλικού υλικού ούτε να προσδιορίσει τις αποδεκτές καταπονήσεις χωρίς να γνωρίζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Πρέπει δηλαδή να γνωρίζει από ποιο φορτίο και πέρα το υλικό θα παραμορφωθεί κατά αναντίστροφο τρόπο προκαλώντας αλλαγές στη γεωμετρία του και ποιο είναι το οριακό φορτίο που είναι δυνατόν να αντέξει πριν την οριστική του θραύση.

Στις κατασκευές χρησιμοποιούμε πραγματικά υλικά με τις αδυναμίες και τα ελαττώματά τους. Δεν μένει, λοιπόν, άλλος δρόμος από την εκτέλεση μηχανικών δοκιμών για τον πειραματικό προσδιορισμό του χαρακτήρα τους και μάλιστα σε δοκίμια που έχουν μέγεθος συγκρίσιμο με τα στελέχη των κατασκευών, δηλαδή μακροσκοπικά. Οι μηχανικές δοκιμές πρέπει να είναι απλές, αναπαραγωγίσιμες και τα αποτελέσματα ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα, κατά τον ίδιο τρόπο από όλους. Για το λόγο αυτό, διεθνείς οργανισμοί κανονικοποιούν τις δοκιμές τους. Η κανονικοποίηση αυτή των δοκιμών αφορά στη γεωμετρία των δοκιμίων και των ενδείξεων, στις συσκευές των δοκιμών και την βαθμονόμησή τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

4.3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η μηχανική δοκιμή από την οποία μπορούμε να πάρουμε μια πλήρη 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 υλικού. Οι παρακάτω παράμετροι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά των διαφόρων ειδών των ναυπηγικών μεταλλικών υλικών από πλευράς αντοχής :

1. Η ακαμψία, δηλαδή η επιμήκυνση (σύντμηση) ανά μονάδα φορτίου, της οποίας μέτρο είναι 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.

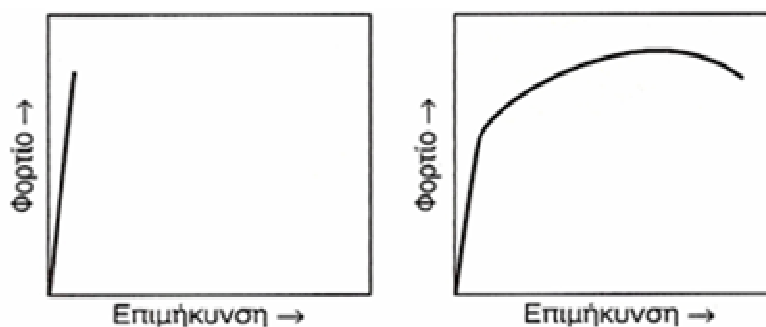
Η καταγραφή της καμπύλης $F = f(\Delta l)$ ή $\sigma = f(\epsilon)$ είναι χαρακτηριστική του κάθε μεταλλικού υλικού. Στην επόμενη Εικόνα 4-10 παρουσιάζονται δύο είδη καμπυλών εφελκυσμού που αντιστοιχούν στα δύο κύρια είδη δυνατής συμπεριφοράς των υλικών σε εφελκυσμό :

➤ **Συμπεριφορά ψαθυρού υλικού.**

Στην περίπτωση του ψαθυρού υλικού δεν υπάρχει πλαστική περιοχή διότι η θραύση επέρχεται πριν την παραμόρφωση.

➤ **Συμπεριφορά όλκιμου υλικού.**

Η μόνιμη παραμόρφωση που πραγματοποιείται, συνοδεύεται συνήθως από σκλήρυνση του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζει την πλειονότητα των μετάλλων και κραμάτων.

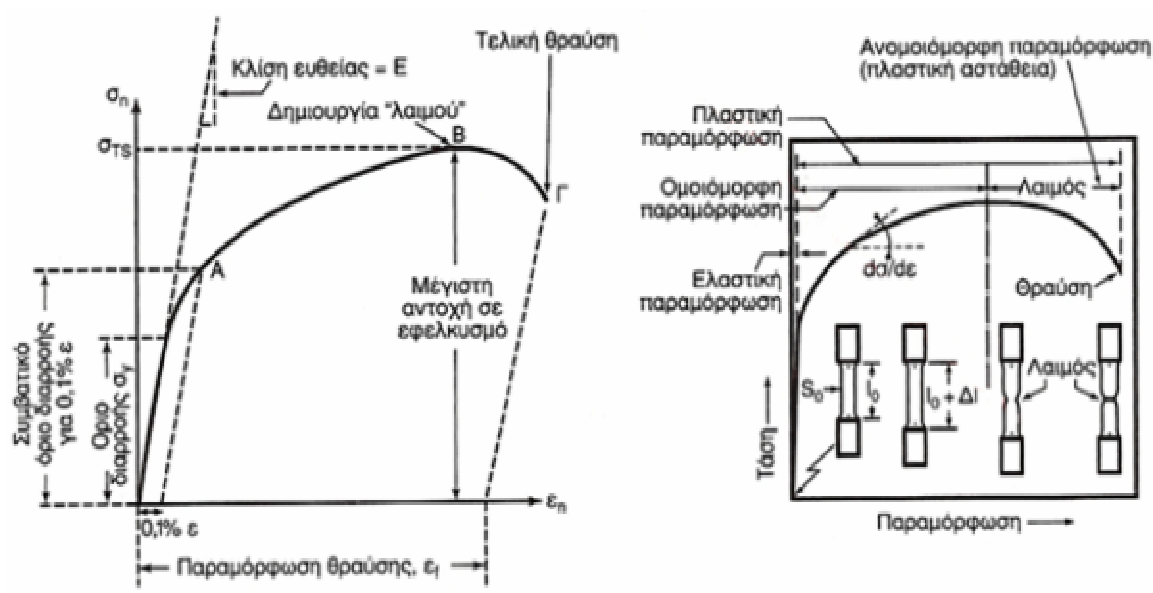


Εικόνα 4-10: Χαρακτηριστική συμπεριφορά σε εφελκυσμό. Συμπεριφορά ψαθυρού (αριστερά) και όλκιμου (δεξιά) υλικού

4.3.3 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται για ναυπηγικές κατασκευές διαφέρει, ανάλογα με το είδος τους, το μέγεθος της φόρτισης, τη φορά της, την

γεωμετρία της κατασκευής και άλλους συναφείς παράγοντες. Ας θεωρήσουμε τη συμπεριφορά των υλικών στο φαινομενολογικό επίπεδο και ας εξετάσουμε την απόκριση ενός δοκιμίου, που υποβάλλεται σε εξωτερικό μονοαξονικό εφελκυσμό. Εάν συντάξουμε τις καμπύλες μεταβολής της φόρτισης με την επιβαλλόμενη αξονική μετάθεση των άκρων, θα αποκτήσουμε καμπύλες που έχουν τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4-11. Η εικόνα αυτή αποκαλύπτει τη συνολική συμπεριφορά ενός υλικού σε ολόκληρο το πεδίο εφελκυσμού, από μηδενικό αρχικό φορτίο μέχρι και την τελική θραύση. Παρατηρούμε ότι η απόκριση μπορεί να υποδιαιρεθεί σε μία σειρά σταδίων, το καθένα από τα οποία έχει τη δική του χαρακτηριστική μορφή. Σύμφωνα με την Εικόνα 4-11, ορίζονται και τα ακόλουθα μεγέθη ως εξής :



Εικόνα 4-11: Διάγραμμα σ - ϵ κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (αριστερά) και σχηματική παράσταση θραύσης δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (δεξιά)

➤ **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 δυνατότητές 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 της Εικόνας 4-11, μετά το οποίο η τάση αρχίζει να ελαττώνεται.

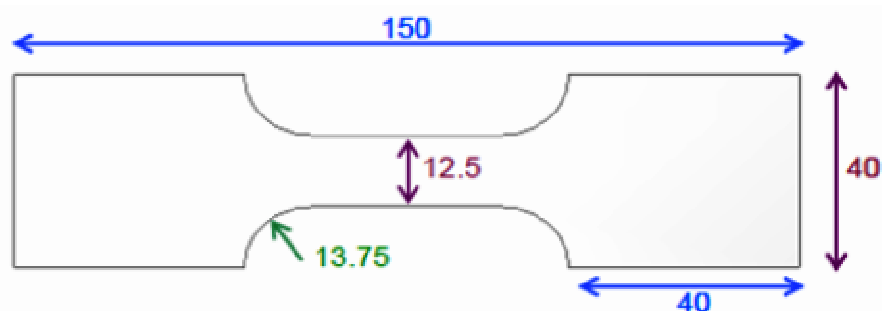
➤ **σ_{TS} : Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό.** Είναι η μέγιστη τάση στο διάγραμμα σ - ϵ , κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, πάνω από την οποία εμφανίζεται η δημιουργία λαιμού. Το σημείο B αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει το δοκίμιο, δηλαδή στη μέγιστη τάση, σ_{TS} , του υλικού, η οποία λέγεται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

➤ **ϵ_f : Παραμόρφωση θραύσης.** Είναι η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά την 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 θραύσεως του υλικού και η αντίστοιχη παραμόρφωση, ϵ_f παραμόρφωση θραύσεως, ενώ η επί τοις εκατό έκφρασή της ονομάζεται ολκιμότητα του υλικού και είναι μέτρο της δυνατότητας παραμορφώσεως του υλικού στην πλαστική περιοχή.

➤ **E : Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young.** Η κλίση του ευθυγράμμου 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.

4.3.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σκοπός της πειραματικής δοκιμής του εφελκυσμού είναι ο καθορισμός της συμπεριφοράς των υλικών όταν καταπονούνται σε εφελκυστικά φορτία και ο προσδιορισμός διαφόρων μηχανικών τους ιδιοτήτων όπως είναι η τάση διαρροής, η τάση θραύσης, η δυσθραυστότητα, το μέτρο ελαστικότητας του Young, η ολκιμότητα, η επιμήκυνση θραύσεως και άλλες. Επιπλέον σε μία τυπική δοκιμή εφελκυσμού κατασκευάζεται το διάγραμμα συμβατικών τάσεων - παραμορφώσεων (engineering stress-strain curve) καθώς και το διάγραμμα πραγματικών τάσεων - παραμορφώσεων (true stress-strain curve) του εξεταζόμενου υλικού. Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού, σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση. Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι, συνήθως, ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. 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.



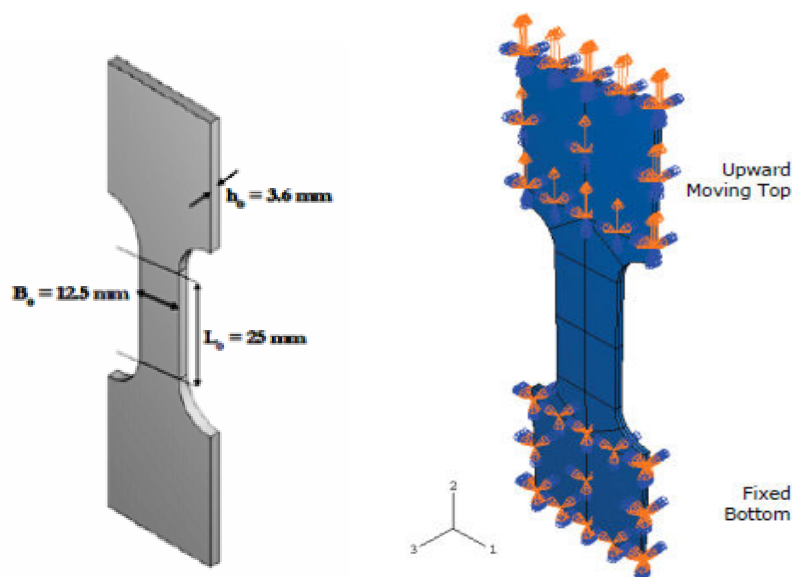
Εικόνα 4-12: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις των ορθογώνιων δοκιμίων τύπου “dogbone” τα οποία εξετάστηκαν για τον πειραματικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561 (διαστάσεις σε mm)

Ο προσανατολισμός και η σωστή τοποθέτηση του ορθογώνιου 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 τυποποιημένα πρότυπα του ASTM, όπως το A370,

E8 και B557, 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. Η Εικόνα 4-12, παρουσιάζει σχηματικά τη μορφή και τις διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού τύπου “dogbone” που χρησιμοποιήθηκαν για την πρώτη ομάδα του πειραματικού προγράμματος.

Η επιλογή του προσανατολισμού των δοκιμίων είναι σημαντική ώστε να μπορεί να γίνει τυποποίηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων σχετικά με την διαφοροποίηση των ιδιοτήτων του υλικού ανά κατεύθυνση, η οποία εμφανίζεται συχνά στη μικροδομή των υλικών κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της επεξεργασίας τους. Η πρώτη ύλη από την οποία λαμβάνονται τα δοκίμια των πειραμάτων εφελκυσμού διατίθεται σε μορφή λεπτού φύλλου ελάσματος. Το τμήμα του ελάσματος από το οποίο θα κοπούν τα δοκίμια παίζει σπουδαίο ρόλο, επειδή ο τρόπος με τον οποίο παράγεται το έλασμα και επίσης η επεξεργασία στην οποία υποβάλλεται επηρεάζει πολλές φορές την ομοιομορφία της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων του ελάσματος κατά το μήκος του, καθώς επίσης και κατά τη διεύθυνση του πλάτους του. Επιπρόσθετα, η δυσθραυστότητα ενός υλικού συνήθως εξαρτάται από τον προσανατολισμό του και την κατεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με τις κύριες διευθύνσεις της μηχανικής του κατεργασίας ή τη διεύθυνση μετατόπισης των κόκκων στη μικροδομή του υλικού. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους ανωτέρω παράγοντες, και για να προσδιορίσουμε πιθανές διαφοροποιήσεις και αποκλίσεις των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού ανά κατεύθυνση ανάλογα με τον προσανατολισμό των εξεταζόμενων δοκιμίων, αποφασίστηκε τα πειραματικά δοκίμια εφελκυσμού να κοπούν και κατά τη διαμήκη και κατά την εγκάρσια διεύθυνση του ελάσματος σε σχέση με την κατεύθυνση εξέλασής του. Έτσι, σε αυτή την ομάδα πειραμάτων για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561 πραγματοποιήθηκαν συνολικά έξι δοκιμές εφελκυσμού. Αυτά τα έξι δοκίμια τύπου “dogbone” των οποίων οι διαστάσεις και η μορφή παρουσιάστηκαν παραπάνω (Εικόνα 4-12), χωρίστηκαν σε δύο μικρότερες ομάδες των τριών δοκιμίων η κάθε μία ανάλογα με τον προσανατολισμό τους, καθώς τα τρία (1AX, 2AX, 3AX) από τα έξι δοκίμια κόπηκαν

από το έλασμα κατά τη διεύθυνση του μήκους του ενώ τα άλλα τρία (1AY, 2AY, 3AY) κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του πλάτους του ελάσματος.



Εικόνα 4-13: Οι απαιτούμενες διαστάσεις (αρχικό εμβαδό και μήκος μέτρησης) των δοκιμίων τύπου “dogbone” για τον υπολογισμό των πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων (αριστερά) και σχηματική αναπαράσταση της μορφής της επιβαλλόμενης εφελκυστικής φόρτισης (δεξιά)

Στην Εικόνα 4-13, παρουσιάζεται ο τρόπος εγκατάστασης του δοκιμίου στην πειραματική μηχανή και η φόρτιση στην οποία υποβάλλεται με το ένα άκρο του δοκιμίου να είναι πακτωμένο και το άλλο να εφελκύεται κατακόρυφα προς τα πάνω. Επιπλέον, δίνονται παραστατικά κάποιες βασικές διαστάσεις των δοκιμίων εφελκυσμού τύπου “dogbone” οι οποίες είναι απαραίτητες για τους περαιτέρω υπολογισμούς των τάσεων και παραμορφώσεων καθώς επίσης και για την ανάλυση των εξαγόμενων πειραματικών αποτελεσμάτων. Αυτές είναι το αρχικό πάχος h_0 και το αρχικό πλάτος B_0 και μήκος L_0 μετρήσεως των δοκιμίων. Πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι το μήκος L_0 δεν είναι ούτε το μήκος όλου του δοκιμίου, έτσι όπως το παίρνουμε να το τοποθετήσουμε στην μηχανή, ούτε το ελεύθερο μήκος του, το μήκος δηλαδή του τμήματός του που βρίσκεται έξω από τις αρπάγες της μηχανής. Το αρχικό μήκος μετρήσεως για τα δοκίμια εφελκυσμού, καθορίζεται σύμφωνα με κάποιους διεθνείς κανονισμούς (συμβάσεις).

Η πειραματική συσκευή εφελκυσμού MTS έλεγχε και ρύθμιζε συνεχώς τη σχέση μεταξύ της μετατόπισης (δ) και της επιβαλλόμενης δύναμης (P), ενώ

ταυτόχρονα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής κατέγραφε τα εξαγόμενα αποτελέσματα των πειραμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν μετέπειτα για την κατασκευή των συμβατικών και πραγματικών καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων και για τον τελικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561. Τα δεδομένα που εξήχθησαν από την πειραματική μηχανή για κάθε δοκιμή εφελκυσμού χωρίς καμία επιπλέον επεξεργασία δίνουν κατευθείαν μια σχέση ανάμεσα στην μετατόπιση (δ) και την δύναμη (P), $P = P(\delta)$. Η συμβατική τάση και παραμόρφωση (ε_{eng} και σ_{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 αναφέραμε παραπάνω.

Στη συνέχεια υπολογίζονται η αντίστοιχη πραγματική τάση (true stress) και πραγματική παραμόρφωση (true strain) με βάση τις ακόλουθες σχέσεις :

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

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

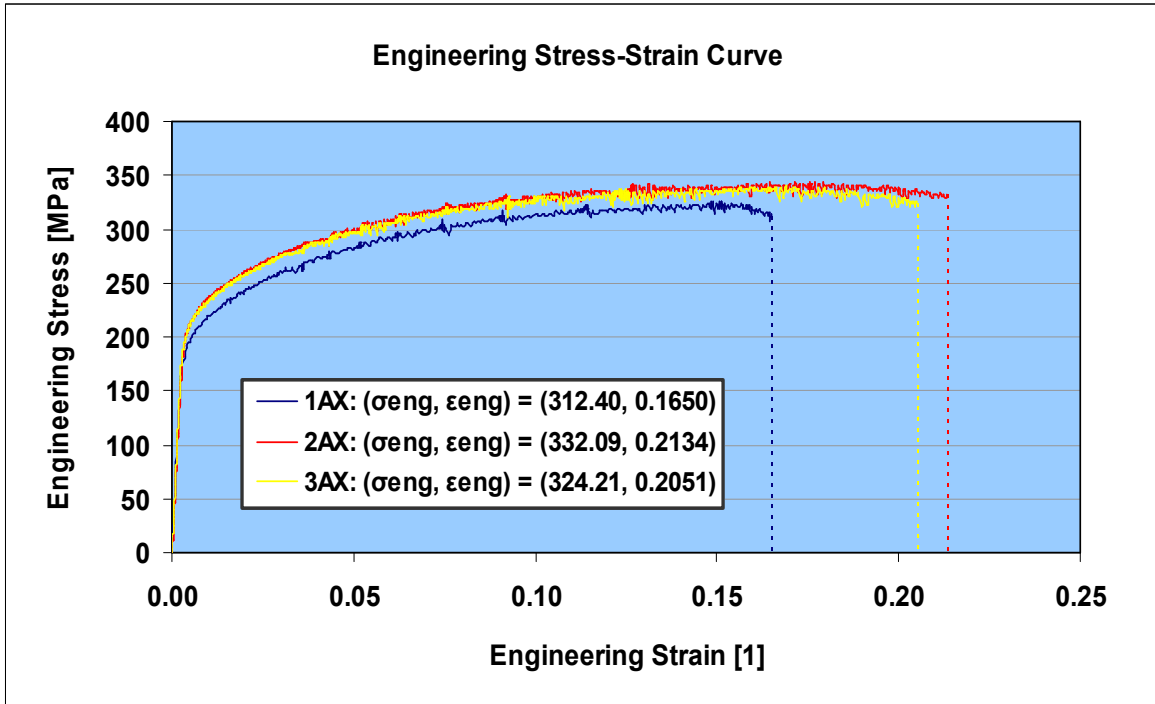
Τα αναλυτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών εφελκυσμού αυτής της ομάδας πειραμάτων, μετά από την απαραίτητη επεξεργασία με χρήση των σχέσεων που περιγράψαμε προηγουμένως, παρουσιάζονται στον επόμενο συγκεντρωτικό Πίνακα 4.1.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα Διαγράμματα 4-14 και 4-15 στα οποία αναπαρίστανται οι καμπύλες συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων που κατασκευάστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού για κάθε ομάδα των τριών δοκιμών 1AX, 2AX, 3AX (L-direction) και 1AY, 2AY, 3AY (T-direction), αντίστοιχα.

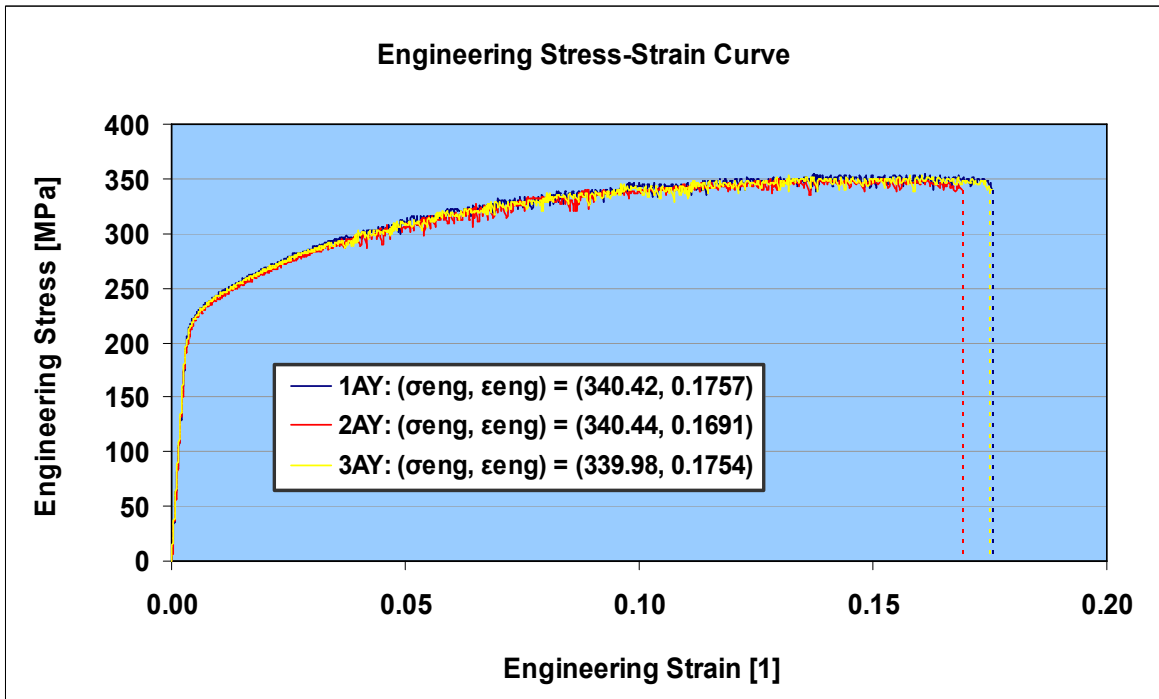
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΑΣΗ
	ϵ_{eng}	σ_{eng}	ϵ_{true}	σ_{true}
	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]
1AX	16.50	312.40	15.28	363.96
2AX	21.34	332.09	19.34	402.95
3AX	20.51	324.21	18.66	390.72
1AY	17.57	340.42	16.19	400.24
2AY	16.91	340.44	15.62	398.01
3AY	17.54	339.98	16.16	399.61
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ AX (L-direction)	19.45	322.90	17.76	385.88
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ AY (T-direction)	17.34	340.28	15.99	399.28
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	18.40	331.59	16.87	392.58

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα συμβατικών και πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων της ομάδας των ορθογώνιων δοκιμίων εφελκυσμού τύπου “dogbone” τη στιγμή της θραύσης

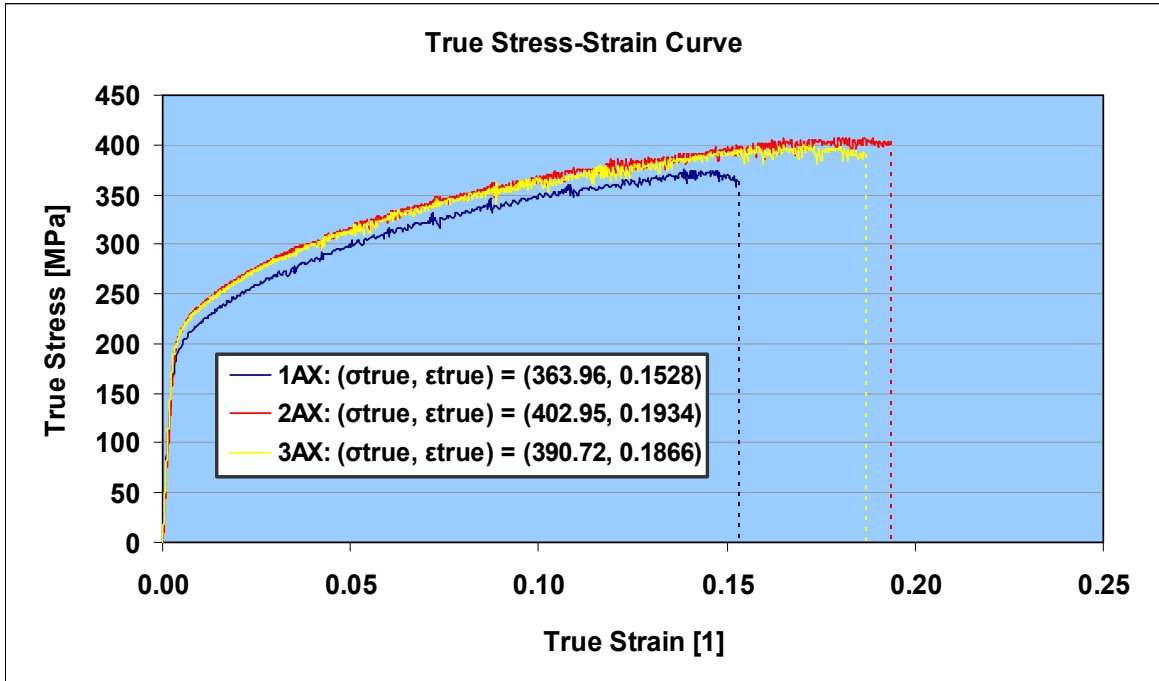
Είναι γεγονός ότι η καμπύλη συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων που προκύπτει από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού δεν δίνει μια αληθινή ένδειξη των χαρακτηριστικών παραμόρφωσης ενός μεταλλικού υλικού λόγω του ότι είναι εντελώς βασισμένη στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου, οι οποίες όμως μεταβάλλονται συνεχώς κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής. Επομένως, θα πρέπει να υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση οι τιμές των πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων οι οποίες δίνουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα όσον αφορά τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού μέσω της πειραματικής διαδικασίας και αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα χαρακτηριστικά της πλαστικής ροής του υλικού. Οι καμπύλες πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων που προέκυψαν παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4-16 και 4-17, για τις ομάδες των τριών δοκιμίων AX (L-direction) και AY (T-direction), αντίστοιχα.



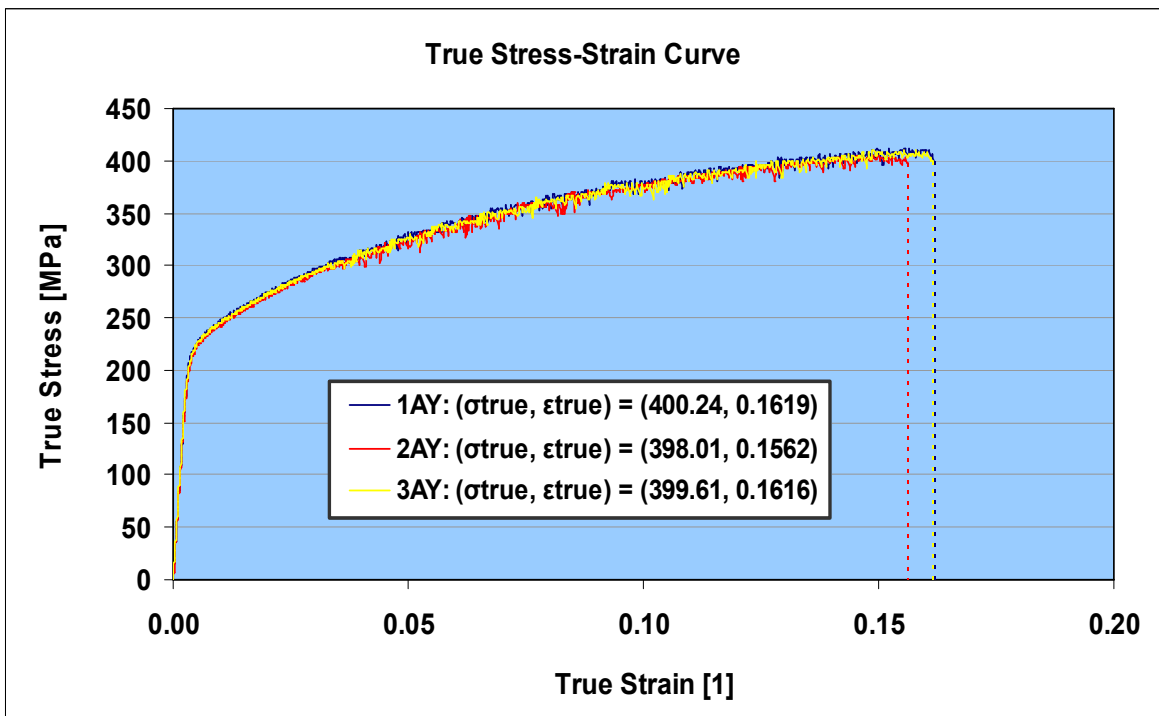
Εικόνα 4-14: Οι καμπύλες συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AX τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του μήκους (L-direction)



Εικόνα 4-15: Οι καμπύλες συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AY τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του πλάτους (T-direction)



Εικόνα 4-16: Οι καμπύλες πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AX τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του μήκους (L-direction)



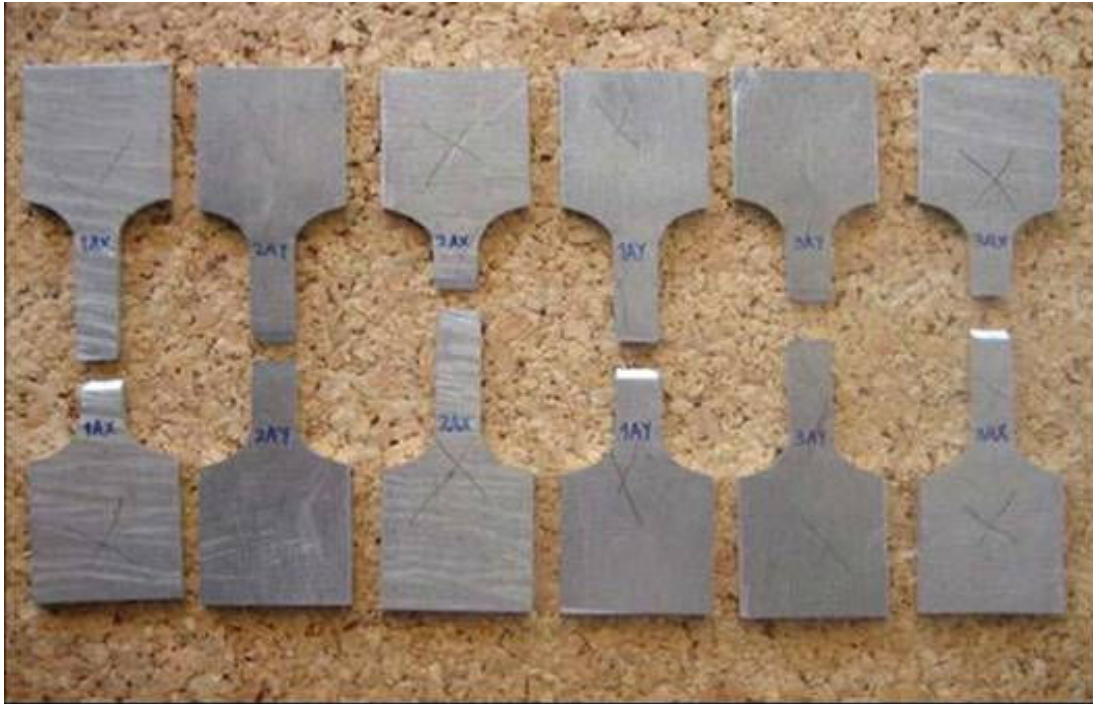
Εικόνα 4-17: Οι καμπύλες πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων AY τύπου “dogbone” τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση του πλάτους (T-direction)

Μια σύγκριση μεταξύ των διαθέσιμων τεκμηριωμένων στοιχείων [10] για τις ιδιότητες του εξεταζόμενου κράματος αλουμινίου 1561 και των αντίστοιχων πειραματικά μετρούμενων ιδιοτήτων του υλικού παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2. Επιπλέον, ο συντελεστής αναλογίας, E , μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων που είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young του υλικού ορίζεται πειραματικά ως το πηλίκο σ/ϵ , το οποίο αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμικής ελαστικής περιοχής (ευθύγραμμο τμήμα) της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας, E , όπως υπολογίστηκε από τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης βρέθηκε ίσο με, $E = 65.87 \text{ GPa}$. Όπως διαπιστώνεται τελικά οι μετρούμενες ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 1561 μέσω της πειραματικής διαδικασίας σχεδόν ταυτίζονται και με τον τρόπο αυτό επαληθεύουν τις ήδη γνωστές από διαθέσιμα στοιχεία ιδιότητες του υλικού. Έτσι, το γεγονός αυτό καθιστά επιτυχή την ακολουθούμενη πειραματική διαδικασία.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 1561	ΤΕΚΜΗΡΙΩΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (κατά μήκος των ινών)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (μέσος όρος δοκιμίων AX και AY)
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ σ_{TS} [MPa]	332.2	331.6
ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ σ_Y [MPa]	186.2	187.3

Πίνακας 4.2: Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561 μεταξύ των διαθέσιμων τεκμηριωμένων στοιχείων και των αντίστοιχων πειραματικά μετρούμενων τιμών

Τα έξι δοκίμια εφελκυσμού τα οποία εξετάστηκαν σε αυτή την πρώτη ομάδα πειραμάτων, παρουσιάζονται στην τελική τους μορφή μετά τη θραύση τους στην Εικόνα 4-18, όπου μπορεί να παρατηρηθεί ότι κυριαρχεί η θραύση των δοκιμίων υπό μια μικρή κλίση.



Εικόνα 4-18: Η τελική μορφή των έξι δοκιμίων τύπου “dogbone” μετά τη θραύση

4.3.5 ΚΥΡΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΗΚΑΝ

Η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος αλουμινίου 1561, είχε σαν αποτέλεσμα την αστοχία των δοκιμίων τύπου “dogbone”. Μια προσεκτική παρατήρηση των επιφανειών θραύσης των έξι αυτών δοκιμίων οδηγεί στη διαπίστωση ότι η θραύση πραγματοποιήθηκε υπό γωνία 45° περίπου ως προς την διεύθυνση της επιβαλλόμενης φόρτισης, Εικόνα 4-19. Έτσι, ως συνέπεια δημιουργήθηκαν δύο κεκλιμένες επιφάνειες θραύσης, ενώ ένα ενιαίο χείλος διαχωρισμού είναι ευδιάκριτο καθ’ όλη την έκταση της επιφάνειας θραύσης και των έξι δοκιμίων εφελκυσμού.

Οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την μετάβαση σε αυτής της μορφής κεκλιμένη επιφάνεια θραύσης αυτών των λεπτών δοκιμίων τύπου “dogbone” δεν είναι απόλυτα σαφείς, ακόμη και στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, και επομένως πρέπει να επιλυθούν. Αυτό το είδος θραύσης με την συγκεκριμένη μορφή της επιφάνειας θραύσης είναι ένας κοινός τρόπος αστοχίας των λεπτών ελασμάτων αλουμινίου που υποβάλλονται σε συνθήκες εγκάρσιας επίπεδης παραμόρφωσης (transverse plane strain). Διάφορες δοκιμές σε λεπτά ελάσματα κράματος αλουμινίου Al2024-T3

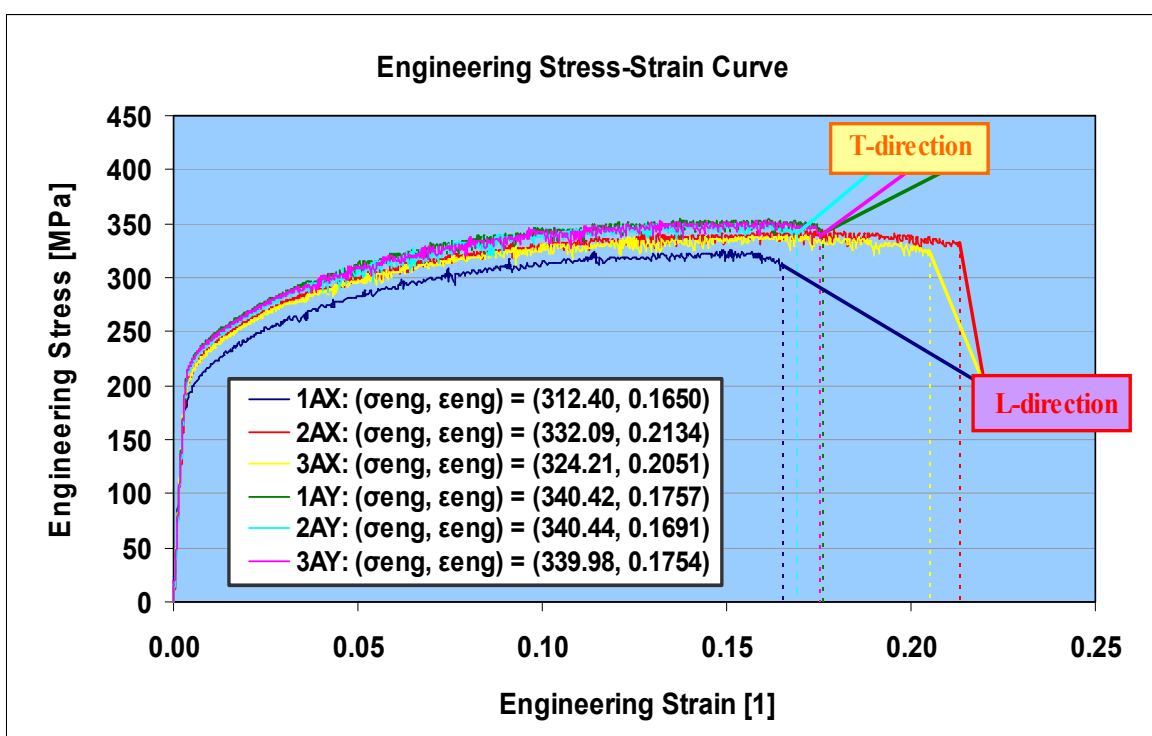
εκτελέστηκαν από τον Lan [46] προκειμένου να εξασφαλιστεί η βαθιά γνώση για τον προσδιορισμό και επαλήθευση ενός κριτηρίου που διέπει αυτού του είδους την θραύση υπό κλίση, και προκειμένου να επιτευχθεί η ανάπτυξη των θεωρητικών λύσεων και αριθμητικών μεθόδων που θα προβλέπουν επακριβώς τα φαινόμενα που την χαρακτηρίζουν. Η επιστήμη και τεχνολογία των υλικών και η εξέτασή τους σε μικροσκοπικό επίπεδο μπορούν να προσφέρουν τη απαιτούμενη γνώση και τις απαντήσεις σε αυτό το πεδίο της έρευνας.



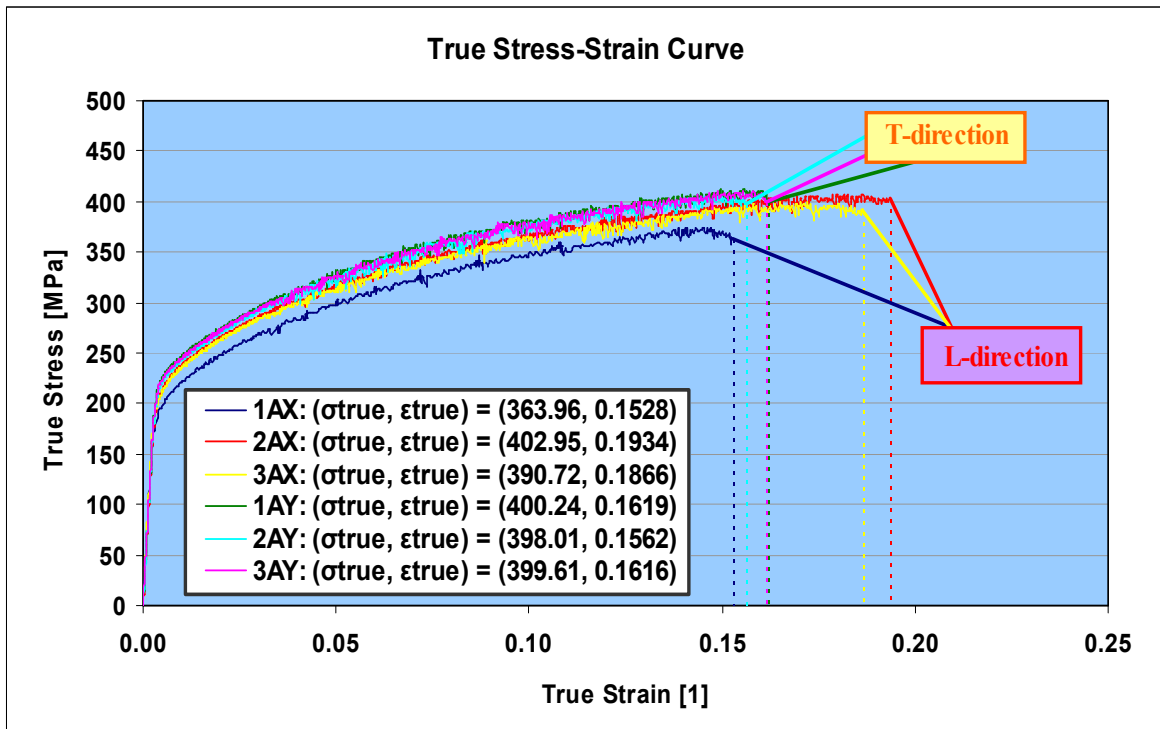
Εικόνα 4-19: Ο τρόπος θραύσης που παρατηρήθηκε στην πρώτη ομάδα πειραμάτων στα δοκίμια εφελκυσμού “dogbone”

Μια εξέταση των αποτελεσμάτων αυτής της ομάδας πειραμάτων και ειδικά των καμπυλών που παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης, είτε της συμβατικής είτε της πραγματικής, καταδεικνύει ότι οι μετρούμενες τιμές των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του υλικού είναι πολύ κοντά σε αυτές που είναι ήδη τεκμηριωμένες από διαθέσιμα έγγραφα [10]. Εντούτοις, η μικρή απόκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρατηρείται στην ομάδα των τριών δοκιμίων 1AX, 2AX και 3AX τα οποία κόπηκαν κατά την διεύθυνση του μήκους (L-direction) του ελάσματος, αποδεικνύει το γεγονός ότι το υλικό παρουσιάζει μικρή ανομοιομορφία στις ιδιότητές του στη συγκεκριμένη διεύθυνση. Αντίθετα, υπάρχει μεγάλη ταύτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την άλλη ομάδα των τριών δοκιμίων 1AY, 2AY και 3AY τα οποία κόπηκαν κατά την διεύθυνση του πλάτους (T-direction). Μια σύγκριση των πειραματικών

αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμών iAX και iAY (i = 1, 2, 3), όπως αναπαρίσταται στα διαγράμματα των Εικόνων 4-20 και 4-21, δείχνει την απόκλιση η οποία οφείλεται στον διαφορετικό προσανατολισμό των δοκιμίων αυτών των δύο ομάδων και η οποία είναι απολύτως φυσιολογική. Επίσης, η διαπίστωση ότι και τα έξι δοκίμια δεν παρουσίασαν οποιαδήποτε σημαντική δημιουργία λαιμού κατά τη θραύση τους δεν μπορεί από μόνη της να ταξινομήσει το υλικό είτε στην όλκιμη είτε στην ψαθυρή συμπεριφορά. Η ολοκλήρωση αυτής της ομάδας του πειραματικού προγράμματος παρείχε τις πληροφορίες που απαιτήθηκαν για την εξέταση των χαρακτηριστικών της θραύσης της επιλεγμένης ποιότητας υλικού, ναυπηγικού κράματος αλουμινίου 1561, που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή σύγχρονων πλοίων.



Εικόνα 4-20: Σύγκριση των καμπυλών συμβατικών τάσεων – παραμορφώσεων οι οποίες προέκυψαν και από τα έξι δοκίμια AX και AY τύπου “dogbone” της πρώτης πειραματικής ομάδας



Εικόνα 4-21: Σύγκριση των καμπυλών πραγματικών τάσεων – παραμορφώσεων οι οποίες προέκυψαν και από τα έξι δοκίμια AX και AY τύπου “dogbone” της πρώτης πειραματικής ομάδας

4.4 2^η ΟΜΑΔΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ : ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΔΟΚΙΜΙΑ

4.4.1 Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ CT (Compact tension specimens)

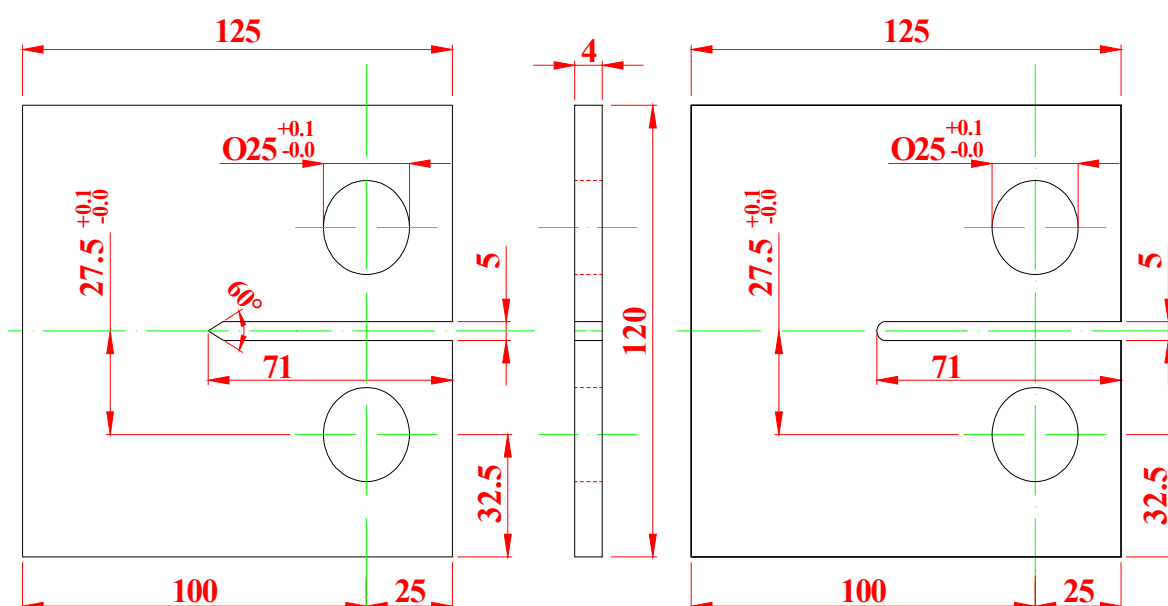
Για την αξιολόγηση του επιπέδου ασφάλειας μιας κατασκευής, είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να προβλεφθεί και να εκτιμηθεί η απόκριση της κατασκευής κάτω από οποιαδήποτε τυχαία φόρτιση και επίσης να προσδιοριστούν τα κατάλληλα κριτήρια για τα αποδεκτά επίπεδα ζημιάς που προκαλούνται από κάποιο ατύχημα ή κατασκευαστική αστοχία και δεν θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια ολόκληρης της κατασκευής. Το δεύτερο βήμα αυτής της πειραματικής εργασίας περιλαμβάνει μία ομάδα δοκιμών εφελκυσμού σε μικρής κλίμακας συμπαγή δοκίμια CT με μια προϋπάρχουσα τεχνητή ρωγμή, τα οποία κρίθηκαν ως τα πιο κατάλληλα για αυτόν τον τύπο πειραμάτων. Αυτή η πειραματική ομάδα, χωρίζεται σε τρεις μικρότερες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο και τη μορφή των δοκιμίων CT που εξετάζονται σε κάθε περίπτωση. Έτσι, προκύπτουν οι εξής τρεις υποομάδες δοκιμίων :

- Μη ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού.
- Ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T (extruded specimens).
- Ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού με συγκολλητά ενισχυτικά τύπου απλής λάμας (welded specimens).

Σκοπός των πειραμάτων αυτών είναι η παρατήρηση και εξέταση της γενικής συμπεριφοράς μιας υπάρχουσας ρωγμής σε κάποιο κατασκευαστικό στοιχείο και η μελέτη της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής της καθώς και η αξιολόγηση της συμβολής και της αποτελεσματικότητας του ενισχυτικού στη σύλληψή της όταν αυτή βρίσκεται αντιμέτωπη με μια διαμορφωμένη διάταξη ενίσχυσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τεχνητές ρωγμές των δοκιμίων CT δεν υπέστησαν καμία επεξεργασία παρά μόνο η εγκοπή του άκρου των ρωγμών διαμορφώθηκε κατάλληλα σύμφωνα με τα πρότυπα που απαιτήθηκαν από το ISO [26].

4.4.2 ΜΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ CT ΔΟΚΙΜΙΑ

Η υποομάδα αυτή των μη ενισχυμένων δοκιμίων CT περιλαμβάνει συνολικά οκτώ δοκίμια με αρχικό μήκος ρωγμής 71 mm, εκ των οποίων τα τέσσερα με ημικυκλικό άκρο ρωγμής (αμβλεία εγκοπή τύπου U), ενώ τα άλλα τέσσερα με τριγωνικό άκρο ρωγμής (οξεία εγκοπή τύπου V). Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-22.



Εικόνα 4-22: Η μορφή και οι διαστάσεις των μη ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT: Δοκίμια CTiUTR ($i = 1, 2, 3, 4$) με τριγωνικό άκρο ρωγμής (αριστερά) και CTiUHC ($i = 1, 2, 3, 4$) με ημικυκλικό άκρο ρωγμής (δεξιά) (διαστάσεις σε mm)

Η πρώτη σειρά δοκιμών αυτής της ομάδας εκτελέστηκε σε τέσσερα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT με αρχικό μήκος ρωγμών 71 mm και ημικυκλική (αμβλεία τύπου U) άκρη ρωγμών ακτίνας 2.5 mm, τα οποία ονομάστηκαν CTiUHC ($i = 1, 2, 3, 4$) δοκίμια. Η εκτέλεση κάθε μιας από τις τέσσερις δοκιμές έγινε με διαφορετικό ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ώστε να εξεταστεί με τον τρόπο αυτό η πιθανή επίδρασή του στην κατεύθυνση διάδοσης των ρωγμών. Έτσι λοιπόν, ο ρυθμός μεταβολής μετατόπισης κυμαινόταν από 0.5 έως 2.0 mm/min, αυξανόμενος κατά 0.5 ξεκινώντας πρώτα από το δοκίμιο CTiUHC, του οποίου η δοκιμή εφελκυσμού έγινε

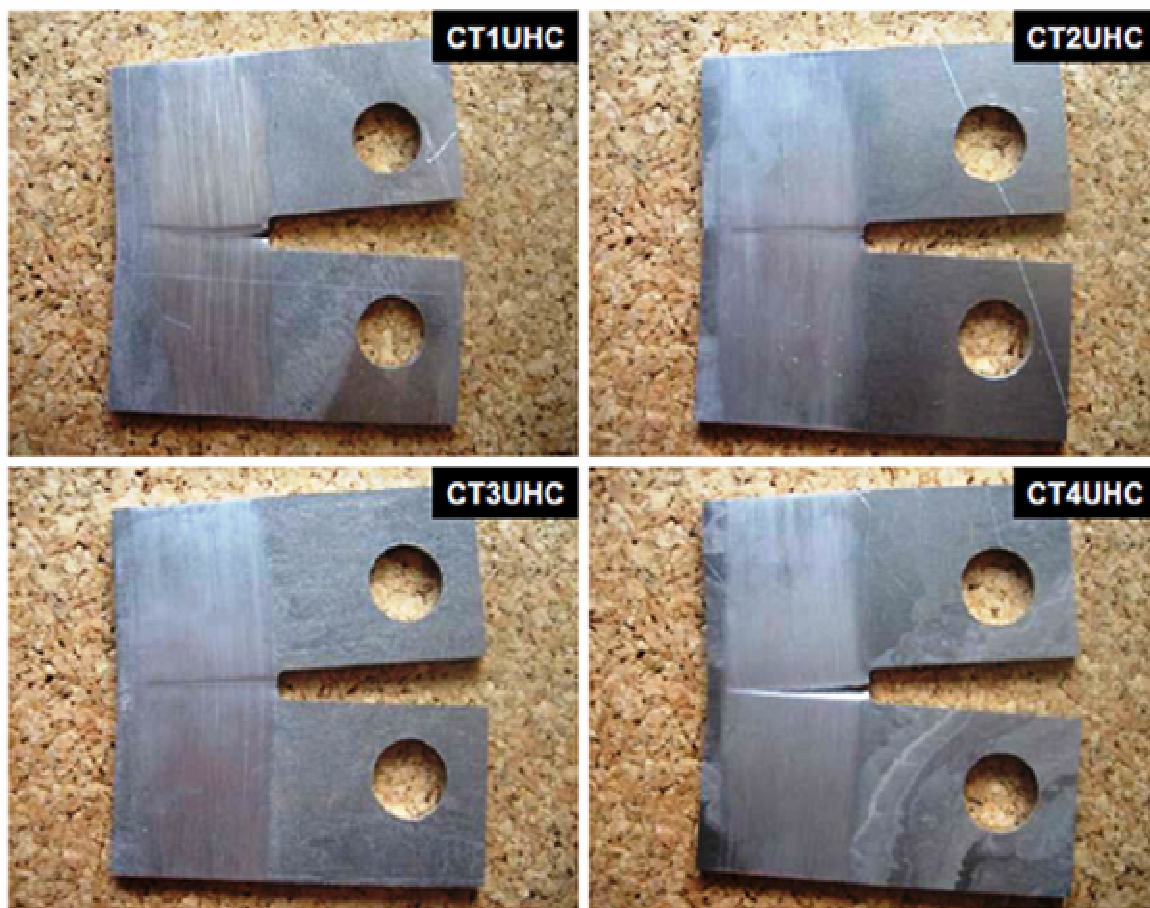
με τον ελάχιστο ρυθμό μεταβολής μετατόπισης και καταλήγοντας στο δοκίμιο CT4UHC.

Η επόμενη σειρά δοκιμών εκτελέστηκε επίσης σε τέσσερα συμπαγή δοκίμια εφελκυσμού CT με το αρχικό μήκος ρωγμών να είναι και πάλι 71 mm, αλλά αυτή τη φορά με τριγωνική (οξεία τύπου V) άκρη ρωγμών πλάτους 2.5 mm και γωνίας 60°, τα οποία ονομάστηκαν CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4) δοκίμια. Όπως και στην πρώτη σειρά δοκιμών έτσι και σε αυτήν, ο ρυθμός μεταβολής μετατόπισης κυμάνθηκε από 0.5 έως 2.0 mm/min, αυξανόμενος κατά 0.5 αρχίζοντας από το δοκίμιο CT1UTR, το οποίο εξετάστηκε με τον ελάχιστο ρυθμό μεταβολής μετατόπισης και καταλήγοντας τελικά στο δοκίμιο CT4UTR. Στον Πίνακα 4.3 συνοψίζονται οι ακριβείς διαστάσεις των οκτώ μη ενισχυμένων δοκιμών CT που εξετάστηκαν, τα χαρακτηριστικά των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν και ο ρυθμός μεταβολής μετατόπισης με οποίο εκτελέστηκε το κάθε πείραμα.

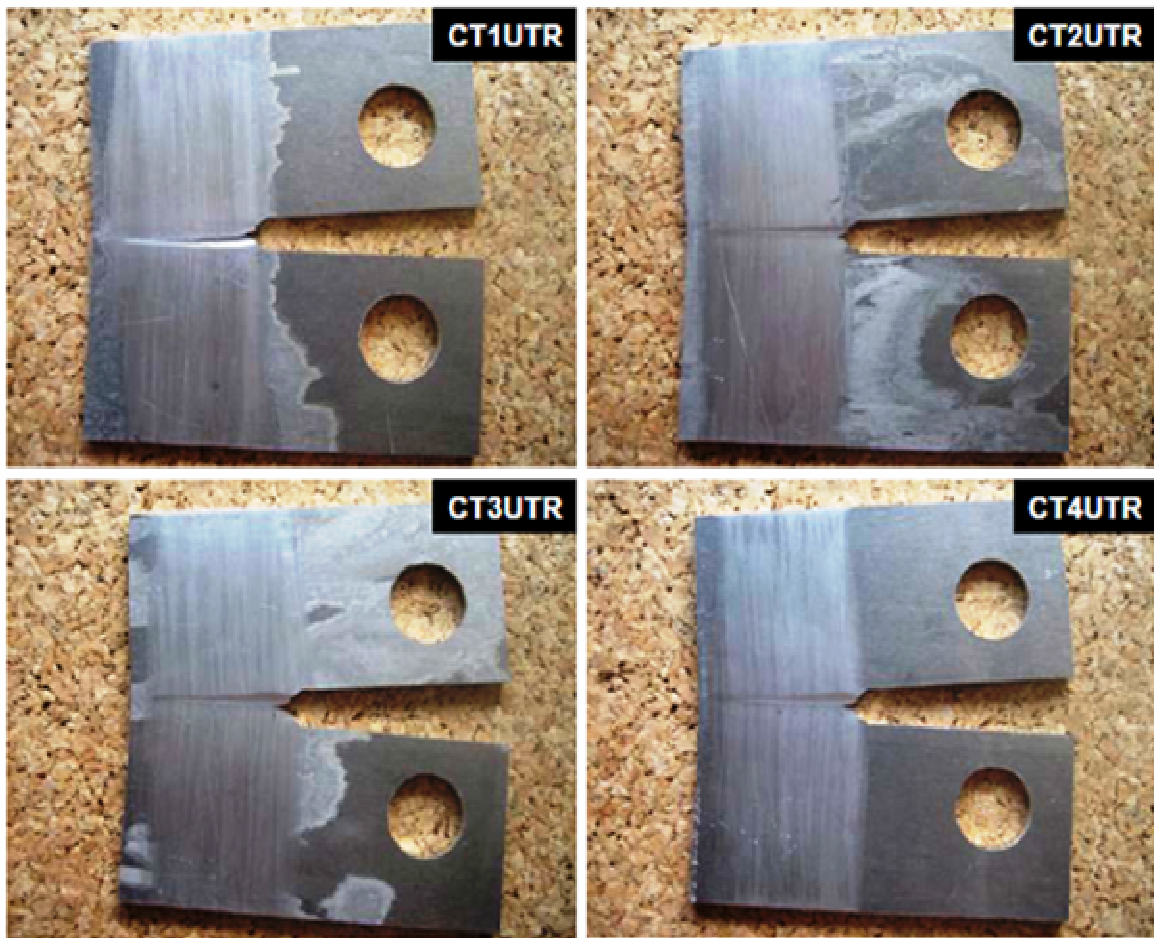
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ [mm/min]	ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΗΣ [mm]	ΜΟΡΦΗ ΑΚΡΟΥ ΡΩΓΜΗΣ
CT1UHC	124.9	120.4	0.5	71	Ημικυκλικό
CT2UHC	125.3	120.1	1.0	71	Ημικυκλικό
CT3UHC	125.2	120.6	1.5	71	Ημικυκλικό
CT4UHC	125.1	120.5	2.0	71	Ημικυκλικό
CT1UTR	125.1	120.5	0.5	71	Τριγωνικό
CT2UTR	125.1	120.0	1.0	71	Τριγωνικό
CT3UTR	125.1	120.5	1.5	71	Τριγωνικό
CT4UTR	125.1	120.4	2.0	71	Τριγωνικό

Πίνακας 4.3: Κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μη ενισχυμένων συμπαγών δοκιμών εφελκυσμού CT και των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν

Η αναμενόμενη περίπτωση διάδοσης των ρωγμών κάθετα ως προς την διεύθυνση της επιβαλλόμενης φόρτισης, προέκυψε σαν αποτέλεσμα των πειραμάτων εφελκυσμού στην ομάδα των μη ενισχυμένων δοκιμών CTiUHC και CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4), όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4-23 και 4-24. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυτών παρατηρήθηκε μόνο ομοεπίπεδη παραμόρφωση των εξεταζόμενων δοκιμών.

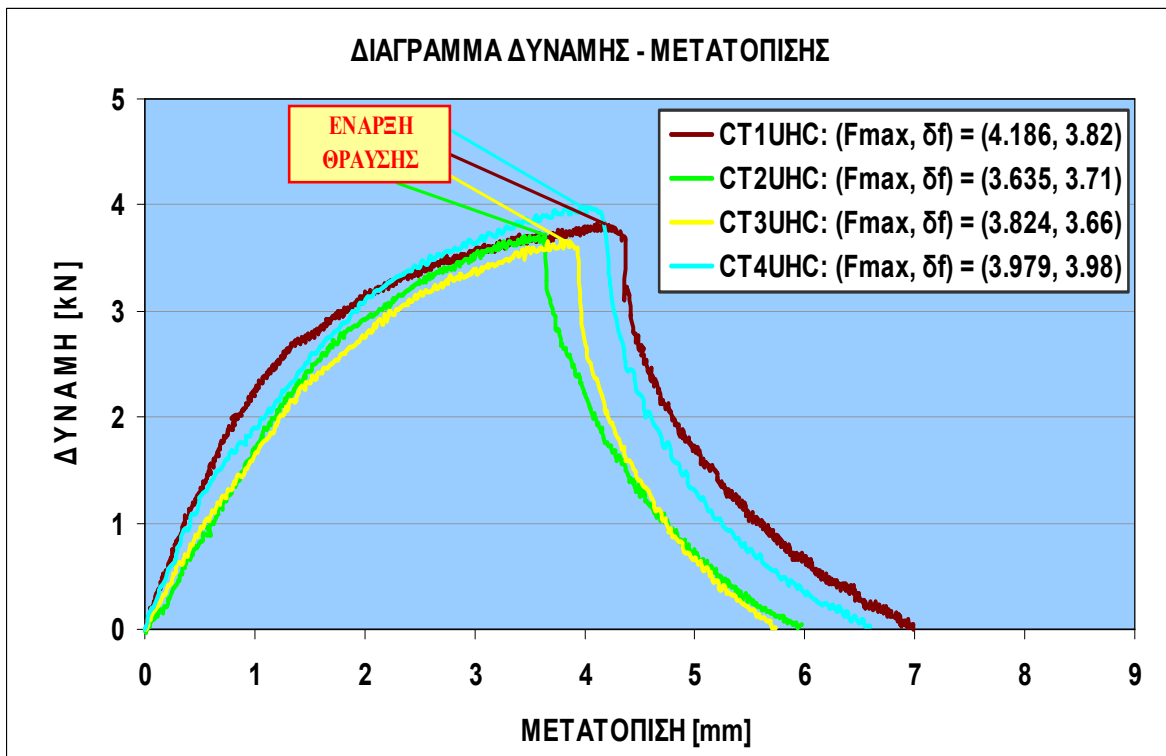


Εικόνα 4-23: Μη ενισχυμένα CT δοκίμια με την ονομασία CT_iUHC ($i = 1, 2, 3, 4$), αρχικό μήκος ρωγμών 71 mm και ημικυκλικό (αμβλύ τύπου U) άκρο ρωγμής, τα οποία εξετάστηκαν με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης που κυμαινόταν από 0.5 έως 2.0 mm/min αυξανόμενος κατά 0.5 mm/min. Η διάδοση της ρωγμής έγινε κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης

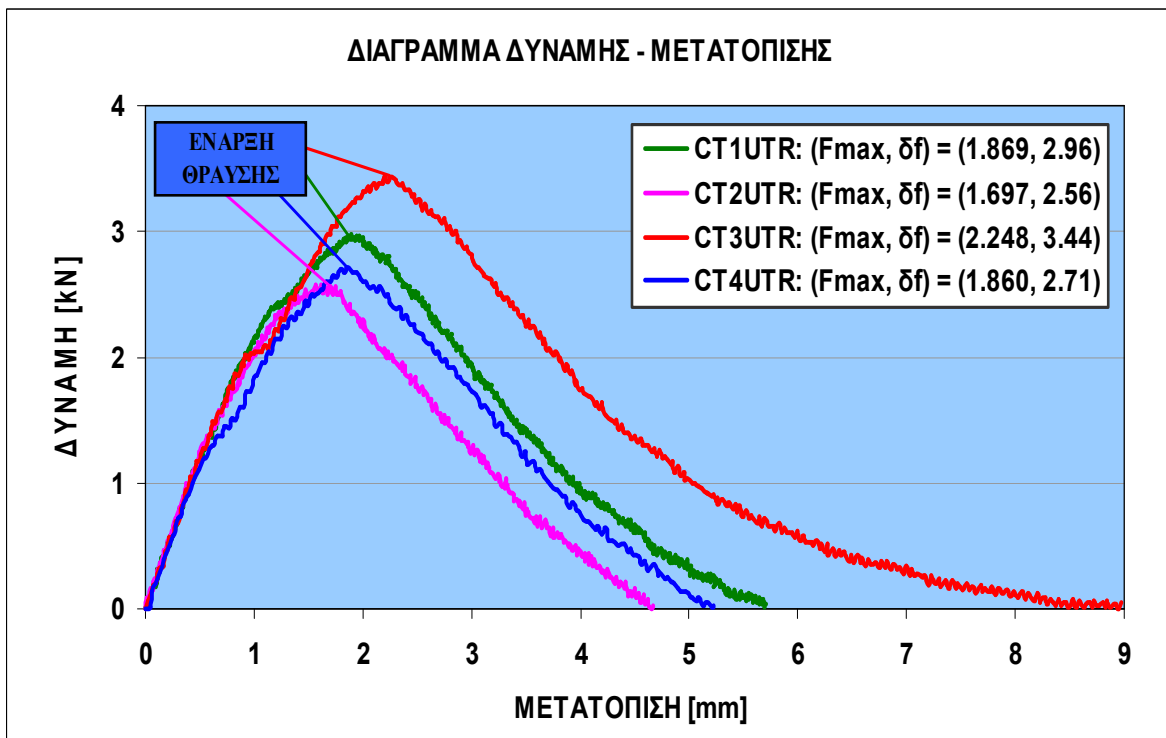


Εικόνα 4-24: Μη ενισχυμένα CT δοκίμια με την ονομασία CT_iUTR ($i = 1, 2, 3, 4$), αρχικό μήκος ρωγμών 71 mm και τριγωνικό (οξύ τύπου V) άκρο ρωγμής, τα οποία εξετάστηκαν με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης που κυμαινόταν από 0.5 έως 2.0 mm/min αυξανόμενος κατά 0.5 mm/min. Η διάδοση της ρωγμής έγινε κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης

Στις Εικόνες 4-25 και 4-26 αναπαρίστανται τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης τα οποία κατασκευάστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων στις ομάδες των μη ενισχυμένων δοκιμίων CT_iUHC και CT_iUTR ($i = 1, 2, 3, 4$), αντίστοιχα. Επίσης, στα διαγράμματα αυτά εμφανίζονται και οι τιμές της μέγιστης επιβαλλόμενης δύναμης και της μετατόπισης έως την έναρξη της θραύσης του εκάστοτε δοκιμίου.



Εικόνα 4-25: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUHC ($i = 1, 2, 3, 4$) με ημικυκλικό άκρο ρωγμής

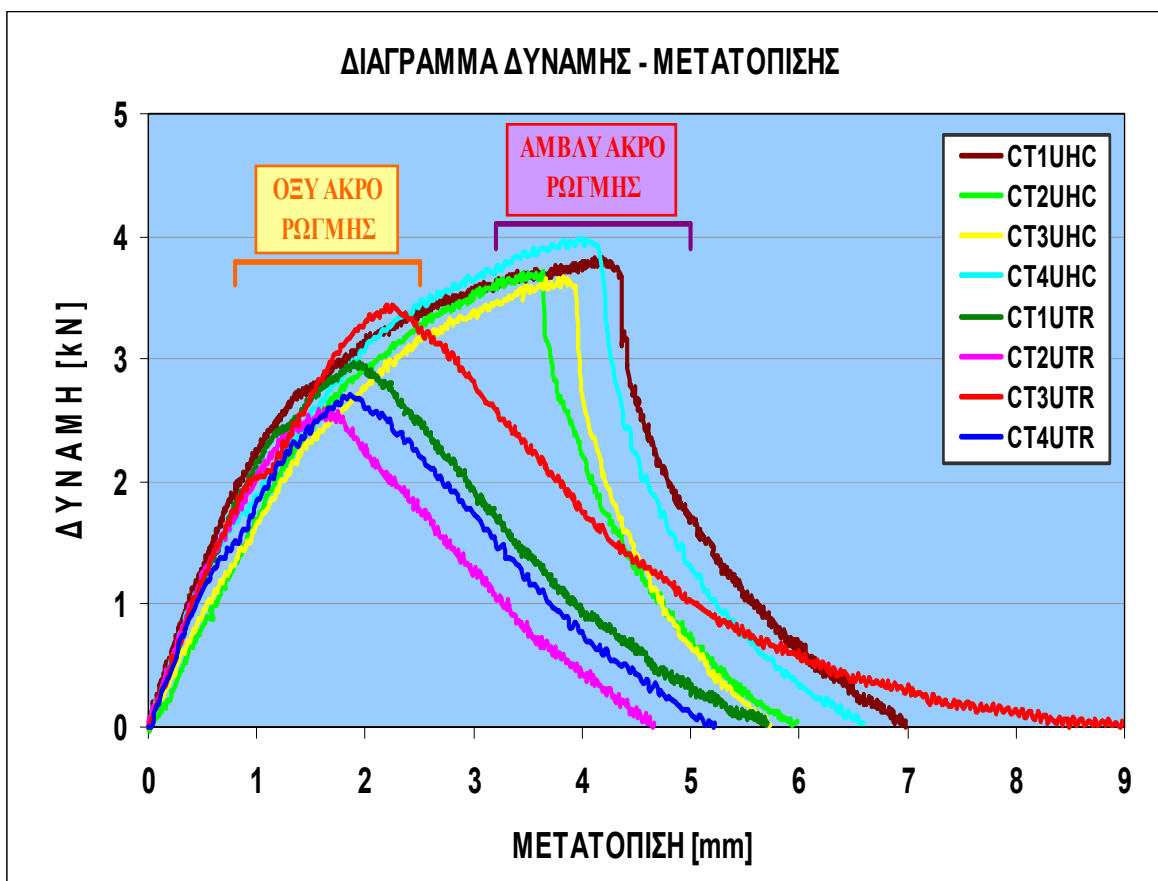


Εικόνα 4-26: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUTR ($i = 1, 2, 3, 4$) με τριγωνικό άκρο ρωγμής

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
CT1UHC	3.82	4.186
CT2UHC	3.71	3.635
CT3UHC	3.66	3.824
CT4UHC	3.98	3.979
CT1UTR	2.96	1.869
CT2UTR	2.56	1.697
CT3UTR	3.44	2.248
CT4UTR	2.71	1.860

Πίνακας 4.4: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUHC και CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4)

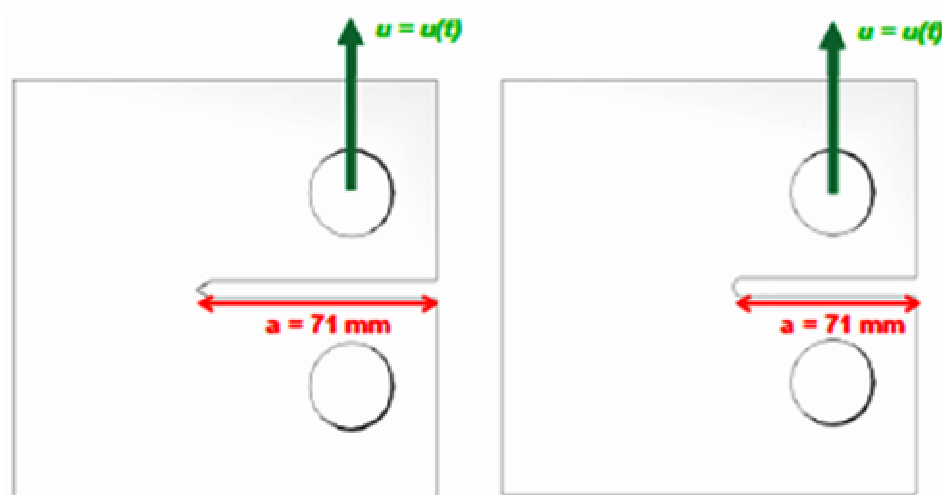
Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης που προέκυψαν από το σύνολο των δοκιμών σε αυτήν την σειρά πειραμάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-27, στην οποία ξεχωρίζει και η κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με τη μορφή του άκρου της ρωγμής που περιέχουν. Έτσι, κάποιος μπορεί να παρατηρήσει ότι η κάθε μία από τις δύο οικογένειες των δοκιμίων με τα ακριβώς ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, βρίσκεται μέσα σε μία συγκεκριμένη περιοχή τιμών που ποικίλλει ανάλογα με το ρυθμό μεταβολής μετατόπισης. Η γεωμετρία του άκρου των ρωγμών ήταν επομένως η κύρια παράμετρος που είχε επίδραση στη διαφοροποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία έδειξαν ότι όσο πιο οξεία είναι η άκρη των ρωγμών τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη αντοχή του ελάσματος, καθώς η θραύση επέρχεται για μικρότερες τιμές της επιβαλλόμενης δύναμης και μετατόπισης. Ο Πίνακας 4.4 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα αυτής της ομάδας πειραμάτων και δείχνει ότι η μέγιστη δύναμη και η μετατόπιση μέχρι τη θραύση διαφέρουν σημαντικά για τα δοκίμια CTiUHC και CTiUTR (i = 1, 2, 3, 4). Μια περαιτέρω ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των μη ενισχυμένων δοκιμίων CT αποκαλύπτει ότι δεν υπάρχει ισχυρή σχέση εξάρτησης μεταξύ της μέγιστης εφαρμοζόμενης δύναμης και του ρυθμού παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-27: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης της ομάδας των μη ενισχυμένων δοκιμίων CTiUHC και CTiUTR ($i = 1, 2, 3, 4$) για διάφορους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης (0.5 έως 2.0 mm/ min). Παρατηρείται η κατηγοριοποίηση των καμπυλών σε δύο ομάδες (περιοχές τιμών), ανάλογα με τη γεωμετρία του άκρου των ρωγμών

Η Εικόνα 4-28 παρουσιάζει σχηματικά το είδος της φόρτισης στην οποία υποβλήθηκαν τα ενισχυμένα και μη ενισχυμένα δοκίμια CT. Η δυνατότητα ελέγχου σε κάθε δοκιμή εφέλκυσμού του ρυθμού μεταβολής μετατόπισης μέσω της πειραματικής μηχανής MTS, μας επέτρεψε να παρατηρήσουμε τα χαρακτηριστικά της διάδοση των ρωγμών με γυμνό μάτι. Σε αυτό συνέβαλε ο χαμηλός ρυθμός αύξησης και προχώρησης των ρωγμών, όπου τα ευδιάκριτα και ξεχωριστά βήματα του σχεδίου της ακολουθούμενης πορείας τους μπόρεσαν να προσδιοριστούν, γεγονός που είναι σπάνιο να παρατηρηθεί και να καταγραφεί κατά τη διάρκεια των πραγματικών περιστατικών θραύσης διαφόρων κατασκευαστικών στοιχείων, όπου οι ρωγμές συνήθως διαδίδονται είτε με πάρα πολύ υψηλό είτε πολύ αργό ρυθμό ανάπτυξης.

Επιπλέον, ο μεταβαλλόμενος ρυθμός μεταβολής μετατόπισης αποτέλεσε μία εξαιρετικά σημαντική παράμετρο για τη σύγκριση του σχεδίου της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών, μεταξύ ενισχυμένων και μη ενισχυμένων δοκιμίων με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά άλλα διαφορετικό ρυθμό μεταβολής μετατόπισης.



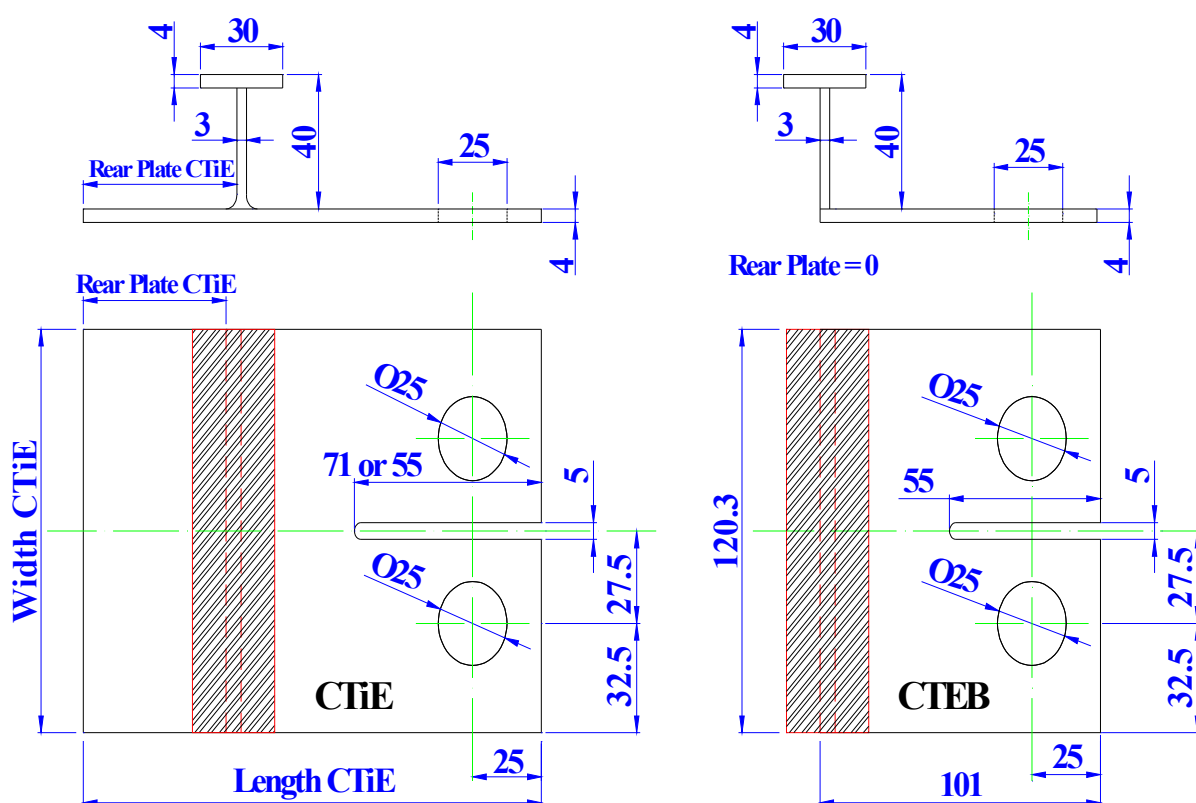
Εικόνα 4-28: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διαδικασίας στην οποία αναπαρίστανται τα μη ενισχυμένα δοκίμια CT με τα δύο διαφορετικά είδη γεωμετρίας του άκρου των ρωγμών (τριγωνικό ή ημικυκλικό άκρο) να υποβάλλονται σε ποικίλους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης

4.4.3 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ CT ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΕΞΕΛΑΣΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΑ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ

4.4.4 Ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T (extruded specimens)

Σε αυτή την ομάδα πειραμάτων εξετάστηκαν τέσσερα ενισχυμένα CT δοκίμια με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T και ημικυκλικό άκρο ρωγμών, που ονομάστηκαν CTiE ($i = 1, 2, 3$) και CTiEB, και τα οποία είχαν παρόμοια μορφή και γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τα μη ενισχυμένα δοκίμια της προηγούμενης πειραματικής ομάδας. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού με διαφορετικούς ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης, ο οποίος για τα δοκίμια CT1E και CT2E είχε την

τιμή 0.5 mm/min, ενώ για τα δοκίμια CT2E και CTEB την τιμή 1.0 mm/min. Διαφοροποιήσεις μεταξύ των τεσσάρων αυτών ενισχυμένων δοκιμών υπήρξαν επίσης και ως προς το αρχικό μήκος των τεχνητών ρωγμών και το μήκος του υπάρχοντος υλικού του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού τύπου-T (rear plate). Αν και το πλάτος των δοκιμών κρατήθηκε το ίδιο με αυτό των μη ενισχυμένων δοκιμών CTiUHC και CTiUTR (120 mm), το μήκος των δοκιμών αυξήθηκε σε 167 mm για τα δοκίμια CTiE ($i = 1, 2, 3$) και μειώθηκε σε 114 mm για το δοκίμιο CTEB, στο οποίο το υλικό του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού κόπηκε εντελώς (rear plate = 0). Στην Εικόνα 4-29 παρουσιάζονται σχηματικά η μορφή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών CTiE ($i = 1, 2, 3$) και CTEB, καθώς και οι μεταξύ τους διαφοροποιήσεις. Επίσης, διακρίνονται και οι διαστάσεις του ενισχυτικού τύπου-T, όπου το πάχος και το ύψος του κορμού του ενισχυτικού είναι ίσο με $t_e = 3$ mm και $h_e = 40$ mm, αντίστοιχα.



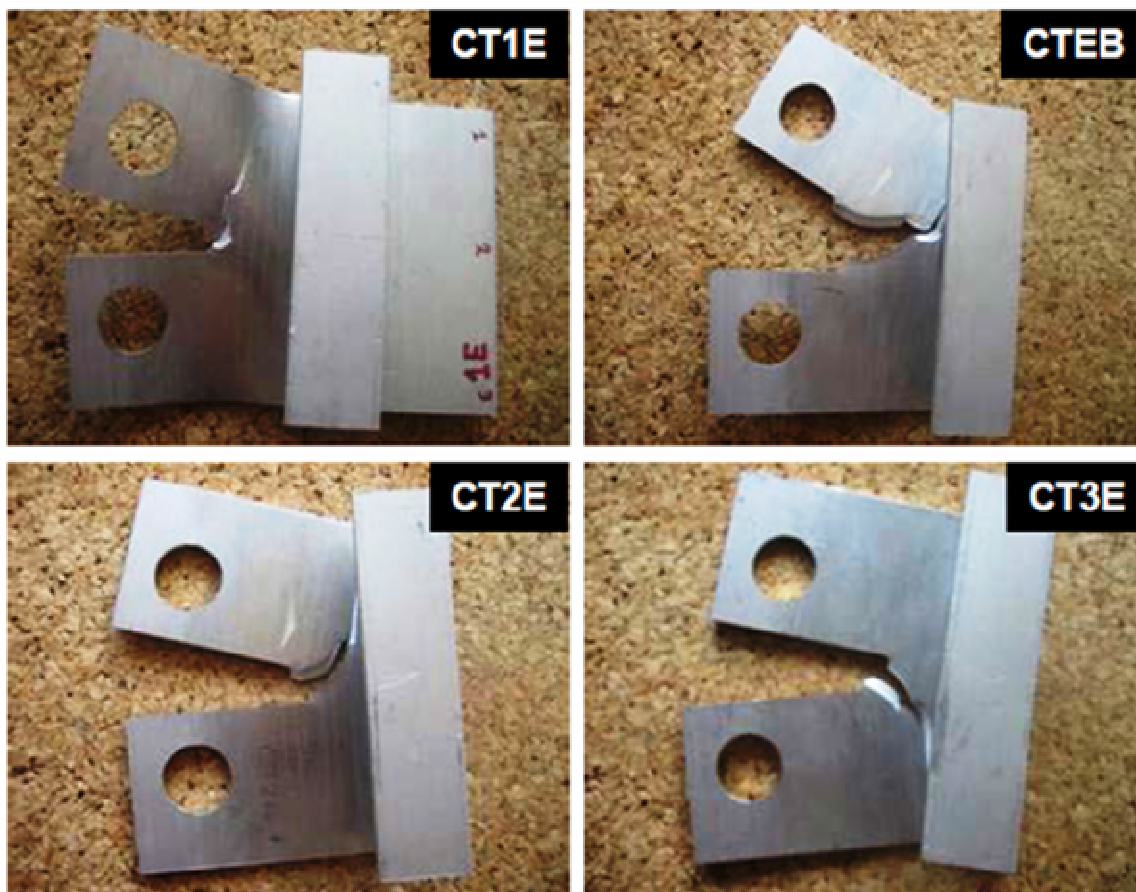
Εικόνα 4-29: Η μορφή και οι διαστάσεις των ενισχυμένων δοκιμών εφελκυσμού CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T και ημικυκλικό άκρο ρωγμών: δοκίμια CTiE ($i = 1, 2, 3$) (αριστερά) και CTEB (Rear Plate = 0) (δεξιά) (διαστάσεις σε mm)

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ [mm/min]	ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΗΣ [mm]	ΜΗΚΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ (Rear Plate) [mm]
CT1E	167.0	120.0	0.5	55	65.0
CT2E	123.5	121.5	0.5	71	20.0
CT3E	124.9	120.0	1.0	71	16.0
CTEB	101.0	120.3	1.0	55	0.0

Πίνακας 4.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκιμίων CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T και των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν

Ο Πίνακας 4.5 συγκεντρώνει τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά και των τεσσάρων δοκιμίων αυτής της σειράς πειραμάτων, των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν, καθώς και το ρυθμό μεταβολής μετατόπισης στον οποίο εξετάστηκε το καθένα. Επίσης, στην Εικόνα 4-29 παρουσιάζονται φωτογραφίες των τεσσάρων δοκιμίων που δείχνουν την τελική τους μορφή μετά την θραύση. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν σε αυτή την πειραματική ομάδα είχαν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες (τα δοκίμια CT2E και CT3E είναι περίπου όμοια) σχετικά με το μήκος του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό (rear plate). Επιπλέον, πρέπει να επισημάνουμε ότι το δοκίμιο CT1E παρουσίασε μη επίπεδη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής, κάτι το οποίο είναι εμφανές και από την Εικόνα 4-30. Γενικά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας των δοκιμίων CTiE (i = 1, 2, 3) και CTEB έδειξαν ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών παρουσίασε παρόμοια χαρακτηριστικά και φαινόμενα, τα οποία συνοψίζονται στα εξής :

- (i) Έναρξη της ρωγμής με μια αρχική γωνία 60°.
- (ii) Η ρωγή σταματάει σχεδόν στα μέσα της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του ενισχυτικού.
- (iii) Στροφή της ρωγμής, αλλαγή κατεύθυνσης και επαναπροσανατολισμός της.
- (iv) Η ρωγή διαδίδεται παράλληλα με το πέλμα του ενισχυτικού και αποτυγχάνει να διαδοθεί διαμέσου του ενισχυτικού διαπερνώντας το, σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

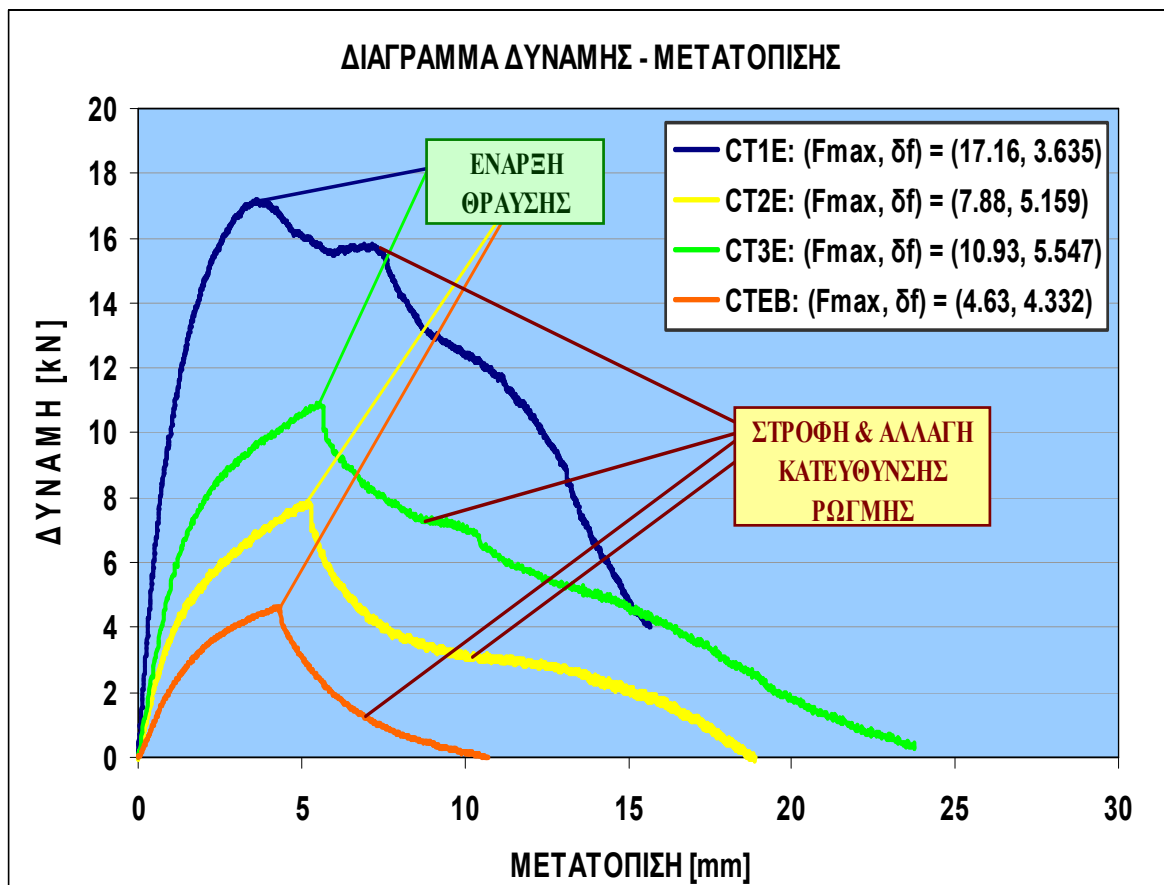


Εικόνα 4-30: Τελική μορφή των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT_iE ($i = 1, 2, 3$) και CTEB με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T μετά τη θραύση. Παρατηρούμε ότι και στις τέσσερις περιπτώσεις η ρωγμή απέτυχε να διαδοθεί μέσω του ενισχυτικού

Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης κάθε δοκιμίου CT_iE ($i = 1, 2, 3$) και του δοκιμίου CTEB που προέκυψαν από αυτή την σειρά πειραμάτων, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-31. Σε αυτό το διάγραμμα μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν τα ευδιάκριτα βήματα της έναρξης, μικρής παύσης, στροφής και αλλαγής κατεύθυνσης των ρωγμών. Ο Πίνακας 4.6 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές δοκιμές στα τέσσερα ενισχυμένα δοκίμια CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T, όπου εξετάζεται η σχέση μεταξύ της δύναμης και της μετατόπισης σε δύο διαφορετικές θέσεις της πορείας των ρωγμών (έναρξη θραύσης, στροφή και αλλαγή κατεύθυνσης της ρωγμής).

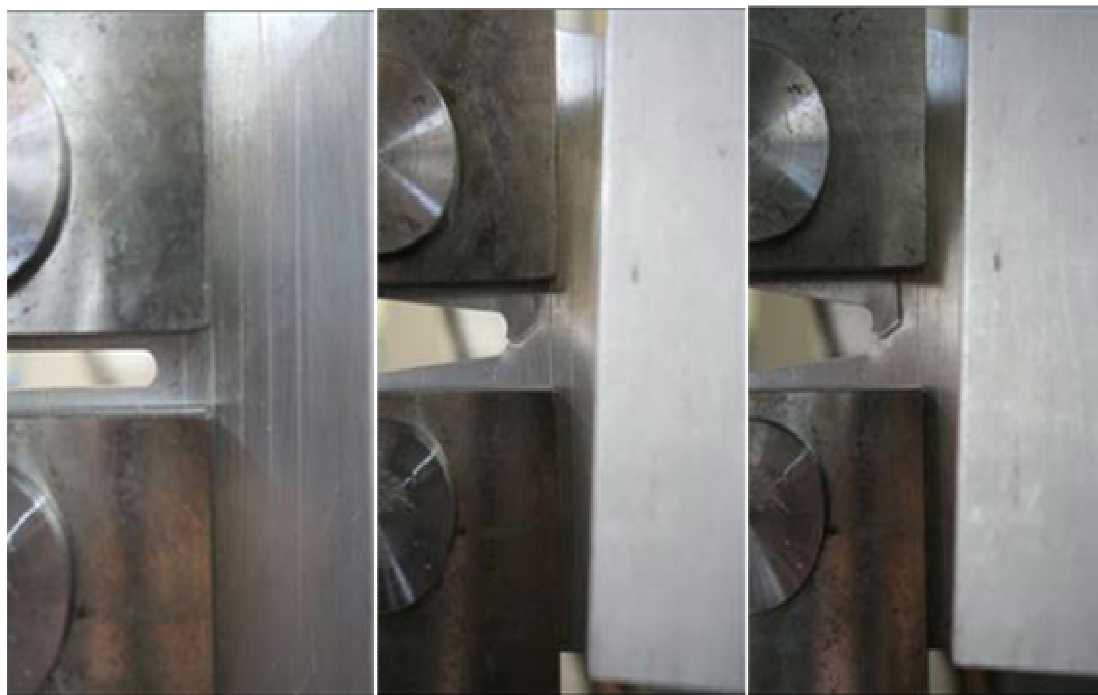
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]	ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΡΟΦΗΣ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΡΟΦΗΣ [mm]
CT1E	17.16	3.635	15.67	6.132
CT2E	7.88	5.159	3.10	10.215
CT3E	10.93	5.547	7.26	8.768
CTEB	4.63	4.332	1.27	6.959

Πίνακας 4.6: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των ενισχυμένων δοκιμών εφελκυσμού CTiE (i = 1, 2, 3) και CTEB με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T



Εικόνα 4-31: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των ενισχυμένων δοκιμών CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-Ta

Πρώτο εξετάστηκε το δοκίμιο CT1E, με εγκατεστημένο ένα εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και μήκος ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό ίσο με 65.0 mm. Ο ρυθμός μεταβολής μετατόπισης στον οποίο εξετάστηκε το δοκίμιο αυτό ήταν ίσος με 0.5 mm/min και το αρχικό μήκος ρωγμής 55 mm. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρήθηκε ότι η ρωγμή διαδόθηκε αρχικά για 7.2 mm, ενώ μετά έστριψε απότομα κατά 90° αλλάζοντας κατεύθυνση, και συνεχίζοντας έπειτα να διαδίδεται παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, Εικόνα 4-32. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το δοκίμιο CT1E εμφάνισε σημαντική μη επίπεδη παραμόρφωση, η οποία προκλήθηκε λόγω της επίδρασης του μεγάλου μήκους της επιφάνειας του ελάσματος που βρισκόταν στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (Rear Plate = 65.0 mm). Η έναρξη της ρωγμής έγινε στη μέγιστη δύναμη των 17.16 kN, η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 3.635 mm έως τη θραύση.



Εικόνα 4-32: Παρουσίαση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο CT1E με ημικυκλικό άκρο ρωγμής και διαστάσεις της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό τύπου-T, $65 \times 120 \times 4$ mm. Παρατηρείται: η έναρξη της ρωγμής υπό γωνία 60°, η στροφή και αλλαγή κατεύθυνσης και τέλος η διάδοσή της παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και το ενισχυτικό

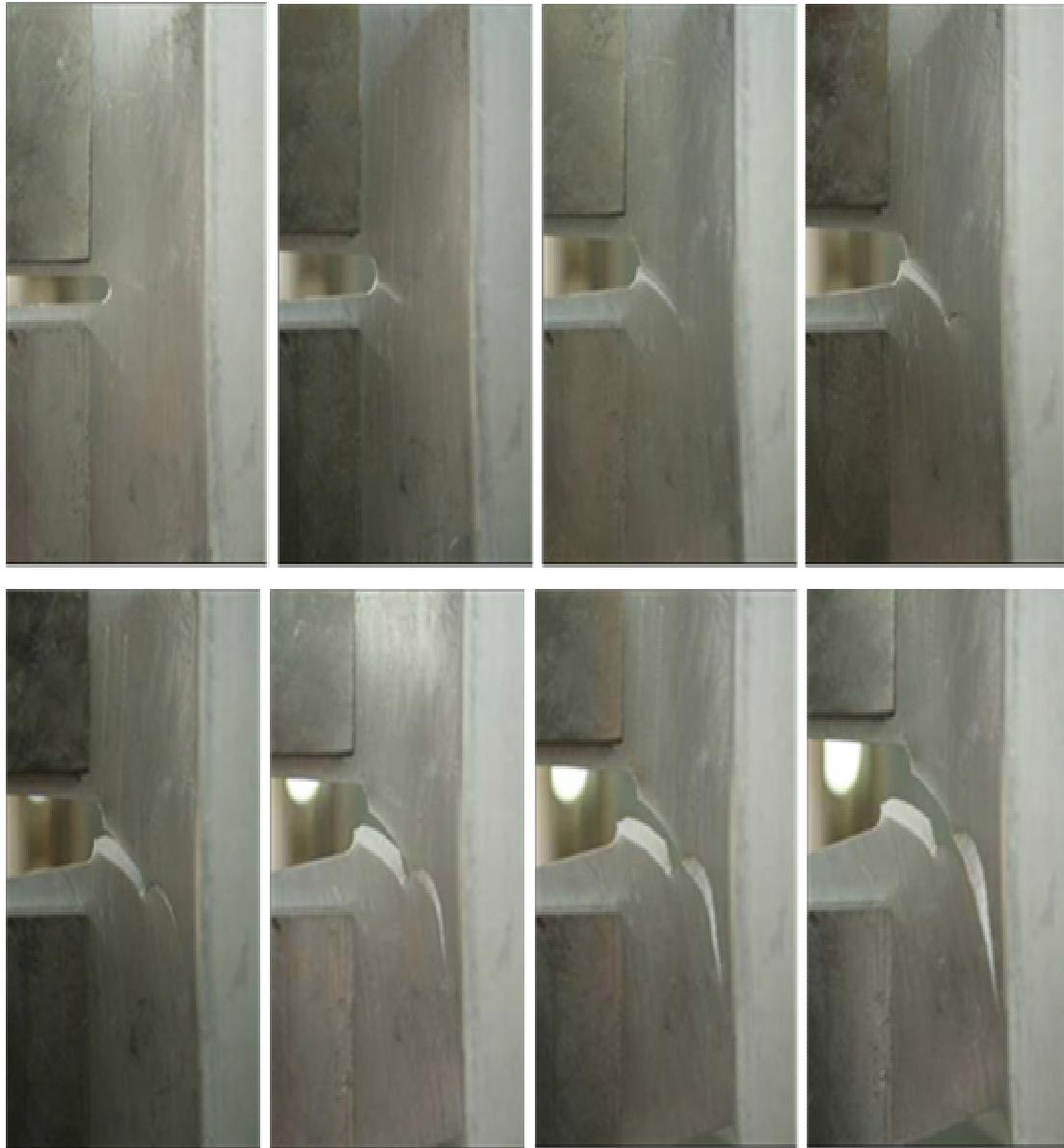
Σε σύγκριση με το δοκίμιο CT1E το οποίο εξετάστηκε στην αρχή, το δοκίμιο CT2E ήταν μια διαφορετική περίπτωση. Οι κύριες διαστάσεις του δοκιμίου αυτού

ήταν παρόμοιες με τις αντίστοιχες των μη ενισχυμένων δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη πειραματική ομάδα με εξαίρεση την ύπαρξη στο δοκίμιο CT2E του ενισχυτικού τύπου-T. Το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό ήταν ίσο με 20.0 mm και το αρχικό μήκος της ρωγμής 71 mm. Η δοκιμή αυτή εκτελέστηκε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης 0.5 mm/min. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στη μέγιστη δύναμη των 7.88 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 5.159 mm έως τη θραύση. Η ρωγμή διαδόθηκε υπό γωνία 60° όσον αφορά την διεύθυνση της φόρτισης και σχεδόν στα μέσα της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του πέλματος του ενισχυτικού (η μέτρηση στο στερεοσκόπιο έδειξε 15.3 mm από το αρχικό άκρο της ρωγμής σε μια συνολική απόσταση 31 mm), η ρωγμή άλλαξε κατεύθυνση κατά μια γωνία 30° περίπου, και μετά αφού διένυσε 1.5 mm ξαφνικά σταμάτησε. Σε εκείνο το σημείο, η ρωγμή έστριψε (η γωνία του ανοίγματος της ρωγμής κατά τη διάρκεια της θραύσης μεταβλήθηκε κατά 180° σε σχέση με την αρχική γωνία) και ξεκίνησε να διαδίδεται ξανά με κατεύθυνση παράλληλη (0°) στην διεύθυνση φόρτισης, ακολουθώντας την πορεία αυτή μέχρι το σημείο που σταμάτησε η δοκιμή, Εικόνα 3-33.

Η τρίτη δοκιμή στην οποία εξετάστηκε το δοκίμιο CT3E ήταν παρόμοια με την προηγούμενη (CT2E), με τη διαφορά ότι η φόρτιση έγινε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης 1.0 mm/min. Επίσης, το αρχικό μήκος της ρωγμής ήταν 71 mm και το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού τύπου-T ήταν ίσο με 16.0 mm. Η έναρξη της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στη μέγιστη δύναμη των 10.93 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 5.547 mm έως τη θραύση. Η ρωγμή διαδόθηκε υπό γωνία 60° όσον αφορά την διεύθυνση της φόρτισης, όπως και πριν στο δοκίμιο CT2E, μόνο που στην περίπτωση του δοκιμίου CT3E η διάδοση της ρωγμής έγινε προς την ακριβώς αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή αντισυμμετρικά (γωνία 180°) σε σχέση με την προηγούμενη δοκιμή. Ομοίως με τη δοκιμή που προηγήθηκε, σχεδόν στα μέσα της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του πέλματος του ενισχυτικού (η μέτρηση στο στερεοσκόπιο έδειξε 15.1 mm από το αρχικό άκρο της ρωγμής σε μια συνολική απόσταση 31 mm), η ρωγμή άλλαξε κατεύθυνση κατά γωνία 30°, και μετά από 1.7 mm ξαφνικά σταμάτησε. Σε εκείνο το σημείο, η ρωγμή έστριψε και ξεκίνησε να διαδίδεται ξανά με κατεύθυνση παράλληλη αλλά αντίθετη (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης (αντίθετη στην περίπτωση αυτή με την προηγούμενη δοκιμή). Η πορεία διάδοσης της ρωγμής ακολούθησε αυτήν την κατεύθυνση μέχρι το σημείο που η δοκιμή σταμάτησε, Εικόνα 4-34.



Εικόνα 4-33: Παρουσιάζονται τα διακριτά βήματα της πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT2E με εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν: έναρξη της ρωγμής, διάδοσή της υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, παύση, στροφή, επανέναρξη, αλλαγή κατεύθυνσης και διάδοση παράλληλα (0°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και το ενισχυτικό



Εικόνα 4-34: Παρουσιάζονται τα διακριτά βήματα της πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT3E με εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν: έναρξη της ρωγμής, διάδοσή της υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, παύση, στροφή, επανέναρξη, αλλαγή κατεύθυνσης κατά 30° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και τέλος διάδοση παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης

Στην τελευταία δοκιμή αυτής της ομάδας πειραμάτων εξετάστηκε το δοκίμιο CTEB. Το δοκίμιο CTEB είχε παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τα τρία προηγούμενα δοκίμια (CT1E, CT2E, CT3E) με τη διαφορά ότι σε αυτό δεν υπήρχε καθόλου υλικό του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate = 0), δεδομένου ότι αυτό αποφασίστηκε να αφαιρεθεί με μηχανουργική κατεργασία (κοπή). Η δοκιμή αυτή διενεργήθηκε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ίσο με 1.0 mm/min και το αρχικό μήκος της ρωγμής του δοκιμίου CTEB ήταν 55 mm. Η έναρξη της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στη μέγιστη δύναμη των 4.63 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 4.332 mm έως τη θραύση. Η ρωγμή διαδόθηκε αρχικά υπό γωνία 90° (κάθετα) ως προς την διεύθυνση της φόρτισης. Καθώς η ρωγμή διαδιδόταν, έστριψε σε μια γωνία 60° περίπου. Σχεδόν στα 3/4 της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του πέλματος του ενισχυτικού (η μέτρηση στο στερεοσκόπιο παρουσίασε 21.4 mm από το αρχικό άκρο της ρωγμής σε μια συνολική απόσταση 31 mm), η ρωγμή άλλαξε κατεύθυνση έχοντας προσανατολισμό 90° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, και ξαφνικά σταμάτησε. Έπειτα από εκείνο το σημείο, η ρωγμή ξεκίνησε να διαδίδεται ξανά με κατεύθυνση κάθετα (90°) στην διεύθυνση της φόρτισης προχωρώντας κατευθείαν προς το πέλμα του ενισχυτικού. Φτάνοντας στο πέλμα του ενισχυτικού, η ρωγμή σταμάτησε πάλι σε μια προσπάθεια να διαδοθεί περνώντας διαμέσου του ενισχυτικού, όμως απέτυχε να το διαπεράσει, άλλαξε πάλι προσανατολισμό, και διαδόθηκε με κατεύθυνση παράλληλα (0° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης) στο πέλμα του ενισχυτικού μέχρι τη χρονική στιγμή που η δοκιμή σταμάτησε, Εικόνα 4-35.



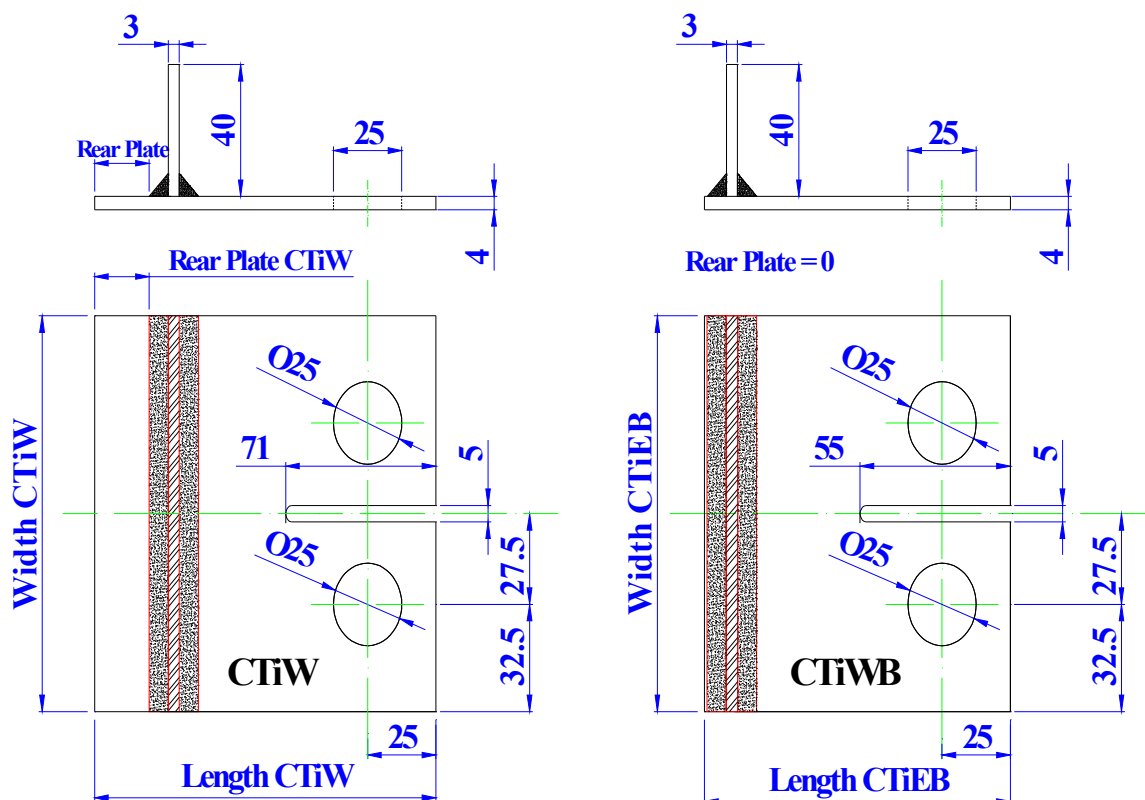
Εικόνα 4-35: Παρουσιάζεται η ακολουθούμενη πορεία διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CTED με εξελασμένο ενισχυτικό τύπου-T και μηδενική επιφάνεια του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού. Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής: έναρξη της ρωγμής, διάδοσή της αρχικά υπό γωνία 90° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, καθώς διαδιδόταν έστριψε υπό γωνία 60° , στα $\frac{3}{4}$ της απόστασης πάυση, στροφή και αλλαγή κατεύθυνσης, επανέναρξη διάδοσης κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης (90°) προς το ενισχυτικό, αποτυγχάνει να το διαπεράσει, αλλάζει ξανά κατεύθυνση και διαδίδεται παράλληλα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης και το ενισχυτικό

4.4.5 Ενισχυμένα CT δοκίμια εφελκυσμού με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας (Welded Specimens)

Σε αυτή την ομάδα πειραμάτων εξετάστηκαν τα ενισχυμένα δοκίμια εφελκυσμού CT, με συγκολλητά ενισχυτικά τύπου απλής λάμας (flat bar) τα οποία ονομάστηκαν CTiW ($i = 1, 2, 3$) και CTiWB ($i = 1, 2$). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για διάφορους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης, ενώ διαφοροποιήσεις μεταξύ των δοκιμών υπήρχαν και ως προς το αρχικό μήκος ρωγμών και το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate). Η ιδιαιτερότητα των δοκιμών CTiWB ($i = 1, 2$) σε σχέση με τα δοκίμια CTiW ($i = 1, 2, 3$) είναι ότι στα πρώτα δεν υπάρχει καθόλου υλικό του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό (rear plate = 0). Όλα τα δοκίμια αυτής της ομάδας κόπηκαν από μια μεγαλύτερη συγκολλητή κατασκευαστική διαμόρφωση ελασμάτων. Τα δοκίμια παρουσίασαν ασήμαντες διαφορές στο πλάτος και το μήκος τους σε σχέση με τα μη ενισχυμένα δοκίμια CTiUHC και CTiUTR ($i = 1, 2, 3, 4$). Το ύψος και το πάχος του κορμού του ενισχυτικού ήταν όμοια με τα αντίστοιχα των εξελασμένων ενισχυτικών τύπου-T, που σημαίνει δηλαδή ότι το πάχος ήταν ίσο με $t_w = 3$ mm και το ύψος του $h_w = 40$ mm. Οι Πίνακες 4.7 και 4.8 παρουσιάζουν μια λεπτομερή περιγραφή των κύριων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμών CTiW ($i = 1, 2, 3$) και CTiWB ($i = 1, 2$) καθώς και των ρωγμών που περιέχουν. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 4.8 δίνει πληροφορίες και για τις διαστάσεις της συγκόλλησης του ενισχυτικού. Η Εικόνα 4-37 παρουσιάζει τη μορφή των δοκιμών αυτής της πειραματικής ομάδας μετά την θραύση.

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΗΚΟΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ [mm]	ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ [mm/min]	ΜΗΚΟΣ ΡΩΓΜΗΣ [mm]	ΜΗΚΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΠΙΣΩ ΑΠΟ ΤΟ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ (rear plate) [mm]
CT1W	123.5	118.0	2.0	71	20.0
CT2W	124.6	118.0	0.5	71	10.0
CT3W	125.5	118.2	1.0	71	20.0
CT1WB	111.9	117.8	1.0	55	0.0
CT2WB	114.2	119.3	1.5	55	0.0

Πίνακας 4.7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ενισχυμένων δοκιμών CT με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας και των τεχνητών ρωγμών που περιέχουν



Εικόνα 4-36: Η μορφή και οι διαστάσεις των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας και ημικυκλικό άκρο ρωγμών: δοκίμια CT_iW (i = 1, 2, 3) (αριστερά) και CT_iWB (i = 1, 2) (rear plate = 0) (δεξιά) (διαστάσεις σε mm)

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΚΡΟΥ ΡΩΓΜΗΣ & ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ [mm]	ΥΨΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ [mm]	ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ [mm]
CT1W	31.0	4.9	18.5
CT2W	33.4	4.9	18.3
CT3W	27.2	5.0	19.2
CT1WB	45.0	5.6	18.1
CT2WB	48.4	5.1	18.5

Πίνακας 4.8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης των ενισχυμένων δοκιμίων CT με ενισχυτικά απλής λάμας



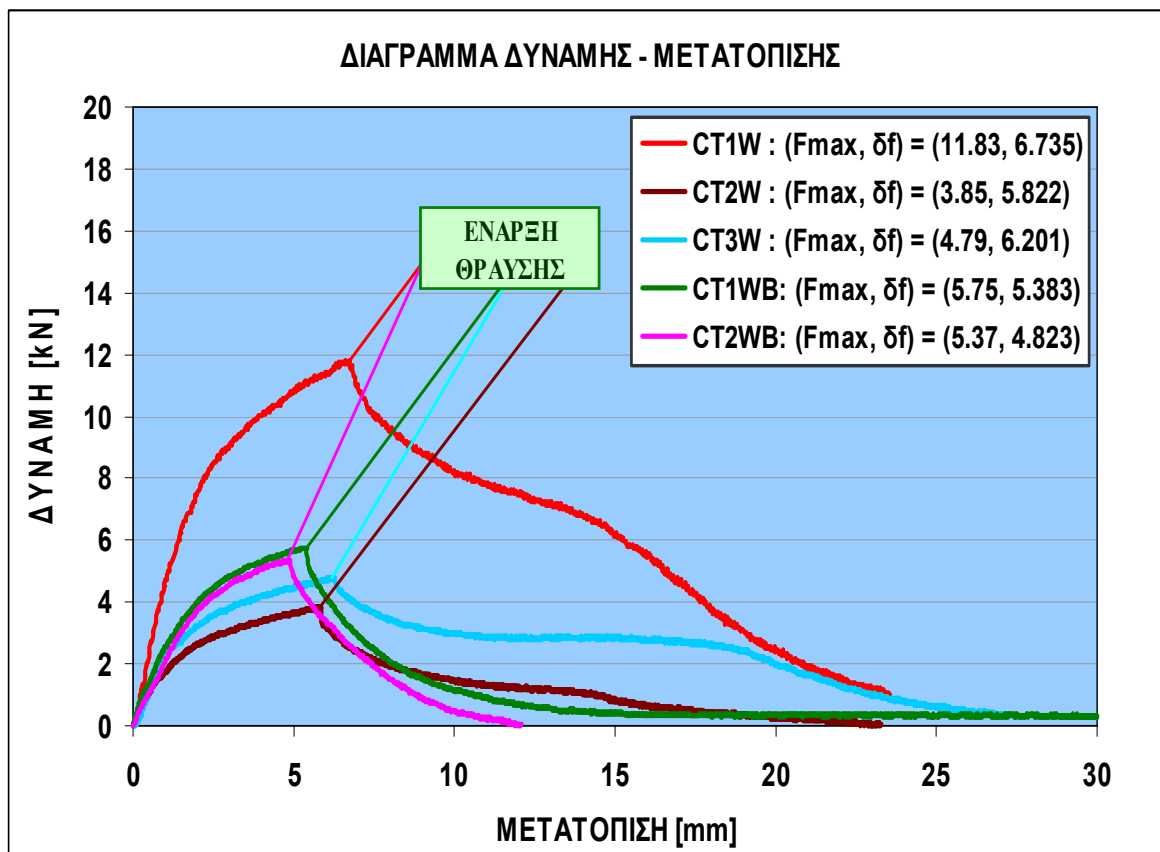
Εικόνα 4-37: Τελική μορφή των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT_iW ($i = 1, 2, 3$) και CT_iWB ($i = 1, 2$) με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας μετά τη θραύση. Παρατηρούμε ότι η ρωγμή σε δύο περιπτώσεις, συγκεκριμένα στα δοκίμια CT₂W και CT₂WB, κατάφερε να διαδοθεί μέσω της συγκόλλησης και του ενισχυτικού. Στο δοκίμιο CT₂W η ρωγμή διαπέρασε με την πρώτη τη συγκόλληση καθώς πλησίαζε στο ενισχυτικό. Αντίθετα, στο δοκίμιο CT₂WB η ρωγμή τελικά εισχώρησε στη συγκόλληση υπό γωνία αφού όμως αρχικά είχε αποτύχει στην προσπάθειά της να περάσει μέσω της συγκόλλησης, συνεχίζοντας να διαδίδεται παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
CT1W	11.83	6.735
CT2W	3.85	5.822
CT3W	4.79	6.201
CT1WB	5.75	5.383
CT2WB	5.37	4.823

Πίνακας 4.9: Πειραματικά αποτελέσματα μέγιστης δύναμης και αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CTiW (i = 1, 2, 3) και CTiWB (i = 1, 2) με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας

Ο Πίνακας 4.9 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές δοκιμές στα πέντε ενισχυμένα δοκίμια CT αυτής της ομάδας με συγκολλητά ενισχυτικά τύπου απλής λάμας, όπου φαίνεται και η σχέση μεταξύ της μέγιστης δύναμης και της αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση για κάθε δοκιμή. Οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης των δοκιμίων CTiW (i = 1, 2, 3) και CTiWB (i = 1, 2) που προέκυψαν από αυτή την σειρά πειραμάτων, παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί στην Εικόνα 4-38.

Τα πέντε δοκίμια αυτής της πειραματικής ομάδας είχαν παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τα μη ενισχυμένα δοκίμια CT, με τη διαφορά της ύπαρξης στα δοκίμια CTiW (i = 1, 2, 3) και CTiWB (i = 1, 2) των συγκολλητών ενισχυτικών απλής λάμας. Τα δοκίμια εξετάστηκαν για διάφορους ρυθμούς μεταβολής μετατόπισης οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7. Αυτή η σειρά των πειραμάτων ξεκίνησε με την εξέταση πρώτα των τριών δοκιμίων CTiW (i = 1, 2, 3) τα οποία είχαν αρχικό μήκος ρωγμής 71 mm και διαφορετικό μήκος της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό και ολοκληρώθηκε με τα δύο δοκίμια CTiWB (i = 1, 2) με αρχικό μήκος ρωγμής 55 mm και μηδενικό μήκος ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού. Ο Πίνακα 3.9 παρουσιάζει τη μέγιστη δύναμη και την αντίστοιχη μετατόπιση έως τη θραύση για κάθε ένα δοκίμιο αυτής της ομάδας ξεχωριστά.



Εικόνα 4-38: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας

Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο δοκίμιο CT1W το οποίο εξετάστηκε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ίσο με 2.0 mm/min και με μήκος της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό 20.0 mm. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στη μέγιστη δύναμη των 11.83 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 6.735 mm έως τη θραύση. Έπειτα, η ρωγή ξεκίνησε να διαδίδεται με αρχική γωνία 60° όσον αφορά την διεύθυνση της φόρτισης και σχεδόν στα 3/4 της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του πέλματος του ενισχυτικού (η μέτρηση στο στερεοσκόπιο έδειξε 21.4 mm από το αρχικό άκρο της ρωγμής σε μια συνολική απόσταση 31 mm), η ρωγή άλλαξε προσανατολισμό συνεχίζοντας να διαδίδεται με κατεύθυνση παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης ακολουθώντας την πορεία αυτή μέχρι το σημείο που η δοκιμή σταμάτησε, Εικόνα 4-39.

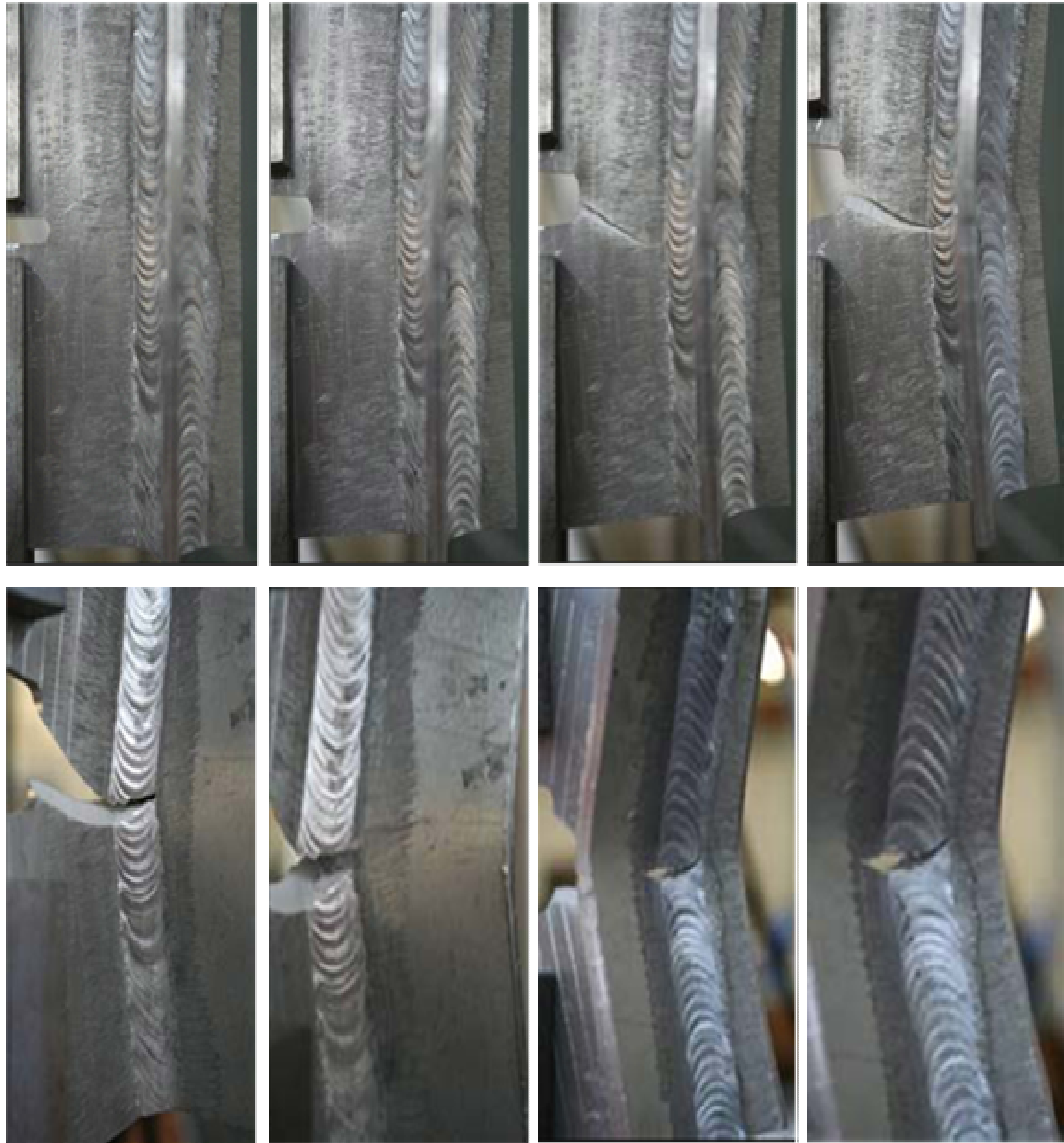
Έπειτα, εξετάστηκε το δοκίμιο CT2W το οποίο είχε παρόμοιες κύριες διαστάσεις με το προηγούμενο δοκίμιο CT1W, με τη διαφορά ότι τώρα το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό ήταν 10.0 mm. Επίσης, η δοκιμή

αυτή έγινε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ίσο με 0.5 mm/min. Η έναρξη της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στη μέγιστη δύναμη των 3.85 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 5.822 mm έως τη θραύση. Η ρωγμή ξεκίνησε να διαδίδεται, όπως και πριν, με αρχική γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης και σχεδόν στα 3/4 της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του πέλματος του ενισχυτικού (η μέτρηση στο στερεοσκόπιο έδειξε 22.6 mm από το αρχικό άκρο της ρωγμής σε μια συνολική απόσταση 31 mm), η ρωγμή άλλαξε προσανατολισμό έχοντας κατεύθυνση κάθετα (90°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης κινούμενη προς τη συγκόλληση και το ενισχυτικό. Τελικά, η ρωγμή διαδόθηκε διαμέσου της συγκόλλησης, διαπερνώντας το πέλμα του ενισχυτικού και συνεχίζοντας την πορεία της στην επιφάνεια του ελάσματος που υπήρχε πίσω από το ενισχυτικό. Κάποιος μπορεί να παρατηρήσει ότι η ρωγμή διαδόθηκε ταυτόχρονα και στο ίδιο το ενισχυτικό καθώς και στο υλικό του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό «ταξιδεύοντας» με το ίδιο ρυθμό ανάπτυξης. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής τόσο κατά τη διάδοσή της στο πέλμα του ενισχυτικού όσο και στην επιφάνεια του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό ήταν παρόμοιος, Εικόνα 4-40.

Τέλος, από την ομάδα των τριών δοκιμίων CTiW (i = 1, 2, 3) εξετάστηκε το δοκίμιο CT3W το οποίο είχε παρόμοιες κύριες διαστάσεις και ίσο μήκος ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό (20.0 mm), με το πρώτο δοκίμιο CT1W. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ίσο με 1.0 mm/min. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στη μέγιστη δύναμη των 4.79 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 6.201 mm έως τη θραύση. Το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο δοκίμιο CT3W ήταν όμοιο με αυτό που περιγράψαμε αναλυτικά στην περίπτωση του δοκιμίου CT1W.



Εικόνα 4-39: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT1W με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και παρουσίαση των φαινομένων που παρατηρήθηκαν: έναρξη της ρωγμής, διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, αλλαγή κατεύθυνσης και διάδοση παράλληλα αλλά αντίθετα (υπό γωνία 180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης



Εικόνα 4-40: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT2W με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και παρουσίαση των φαινομένων που παρατηρήθηκαν: έναρξη και διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 30° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, στροφή και αλλαγή προσανατολισμού με κατεύθυνση κάθετα (90°) στη διεύθυνση της φόρτισης, διάδοση της ρωγμής διαμέσου της συγκόλλησης και του ενισχυτικού, συνεχίζοντας την πορεία της στην επιφάνεια του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό (rear plate) με τον ίδιο ρυθμό προχώρησης

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα δύο δοκίμια CTiWB ($i = 1, 2$). Το δοκίμιο CT1WB είχε παρόμοιες κύριες διαστάσεις με τις αντίστοιχες των προηγούμενων δοκιμίων CTiW ($i = 1, 2, 3$), αλλά δεν είχε καθόλου πρόσθετο υλικό ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε με ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ίσο με 1.0 mm/min. Η έναρξη της ρωγμής έγινε στη μέγιστη δύναμη των 5.75 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 5.383 mm έως τη θραύση. Η ρωγμή ξεκίνησε να διαδίδεται με αρχική γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης και διατηρώντας τον προσανατολισμό αυτόν έφτασε έως τη συγκόλληση στο πέλμα του ενισχυτικού. Στο σημείο εκείνο, η ρωγμή προσπάθησε να διαδοθεί διαμέσου της συγκόλλησης και του ενισχυτικού και να το διαπεράσει, όμως απέτυχε. Έτσι τελικά, άλλαξε κατεύθυνση και συνέχισε τη διάδοσή της κινούμενη παράλληλα με τη συγκόλληση στο πέλμα του ενισχυτικού και παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, ακολουθώντας αυτή την κατεύθυνση μέχρι το σημείο που η δοκιμή σταμάτησε, Εικόνα 4-41.

Η τελευταία δοκιμή εκτελέστηκε στο δοκίμιο CT2WB το οποίο είχε παρόμοιες διαστάσεις με αυτές του προηγούμενου δοκιμίου CT1WB και επίσης δεν είχε καθόλου πρόσθετο υλικό ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού. Το δοκίμιο CT2WB εξετάστηκε σε ρυθμό μεταβολής μετατόπισης ίσο με 1.5 mm/min. Η έναρξη της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στη μέγιστη δύναμη των 5.37 kN η οποία αντιστοιχεί σε μετατόπιση 4.823 mm έως τη θραύση. Η ρωγμή διαδόθηκε με αρχική γωνία 30° όσον αφορά την διεύθυνση της φόρτισης και στα μέσα της απόστασης μεταξύ του αρχικού άκρου της ρωγμής και του πέλματος του ενισχυτικού άλλαξε προσανατολισμό κινούμενη πλέον σχεδόν κάθετα (90°) στην διεύθυνση της φόρτισης. Αφού έφτασε έως τη συγκόλληση στο πέλμα του ενισχυτικού, η ρωγμή αρχικά απέτυχε να διαδοθεί διαμέσου του ενισχυτικού και έτσι άλλαξε ξανά προσανατολισμό με κατεύθυνση διάδοσης αυτή τη φορά παράλληλα με τη συγκόλληση στο πέλμα του ενισχυτικού και παράλληλα αλλά αντίθετα (180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης. Στη συνέχεια, αφού η ρωγμή διαδόθηκε για περίπου 5 mm ακολουθώντας αυτή την πορεία, πέρασε διαμέσου της συγκόλλησης και του πέλματος του ενισχυτικού ακολουθώντας ένα παρόμοιο σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής με αυτό που παρατηρήθηκε στην περίπτωση του δοκιμίου CT2W, μέχρι το σημείο που η δοκιμή σταμάτησε, Εικόνα 4-42.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ομάδας των ενισχυμένων δοκιμίων CT, διαπιστώνουμε ότι η ρωγμή απέτυχε και στις τέσσερις

περιπτώσεις των δοκιμίων CT1E, CT2E, CT3E και CTEB να διαπεράσει τα εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T, ενώ στις δύο από τις πέντε δοκιμές, και συγκεκριμένα στα δοκίμια CT2W και CT2WB, η ρωγμή κατάφερε να διαδοθεί διαμέσου των συγκολλητών ενισχυτικών απλής λάμας. Αυτό αποδεικνύει ότι τα εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T, τα οποία είχαν απόλυτη επιτυχία στη σύλληψη των ρωγμών καθίστανται περισσότερο αποτελεσματικά σε σχέση με τα συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας. Η υψηλότερη αποτελεσματικότητα των εξελασμένων ενισχυτικών γενικότερα στη σύλληψη των ρωγμών σε σχέση με τα συγκολλητά ενισχυτικά οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα σφάλματα της συγκόλλησης τα οποία δεν είναι δυνατό να εξαλειφθούν και τα οποία μειώνουν την ανθεκτικότητα και την αντίσταση των συγκολλητών ενισχυτικών στη διάδοση των ρωγμών.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα αναφέρθηκαν μέχρι τώρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών σχετικά με την επιτυχία ή την αποτυχία διάδοσή τους διαμέσου των ενισχυτικών δεν εξαρτάται από το έργο που απαιτείται στην προσπάθεια προχώρησης των ρωγμών αλλά είναι κυρίως συνάρτηση των φυσικών χαρακτηριστικών της ρωγμής, της κατασκευαστικής διαμόρφωσης, της διάταξης και του τύπου των ενισχυτικών, και τέλος της ποιότητας της εργασίας κατά τη διαδικασία κατασκευής, όπως είναι για παράδειγμα η ποιότητα της συγκόλλησης ή εξέλασης των ελασμάτων. Επίσης, από τα πειράματα φαίνεται ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό και με το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ενισχυτικού και ακολουθεί συγκεκριμένες πορείες οι οποίες μπορούν να χαρτογραφηθούν.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4-43, παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης που προέκυψαν από τα πειράματα σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια CT, τόσο εκείνων με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T, όσο και εκείνων με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας, ενώ ο Πίνακας 4.10 συγκεντρώνει για όλα τα ενισχυμένα δοκίμια τις τιμές της μέγιστης δύναμης και της αντίστοιχης μετατόπισης έως τη θραύση.



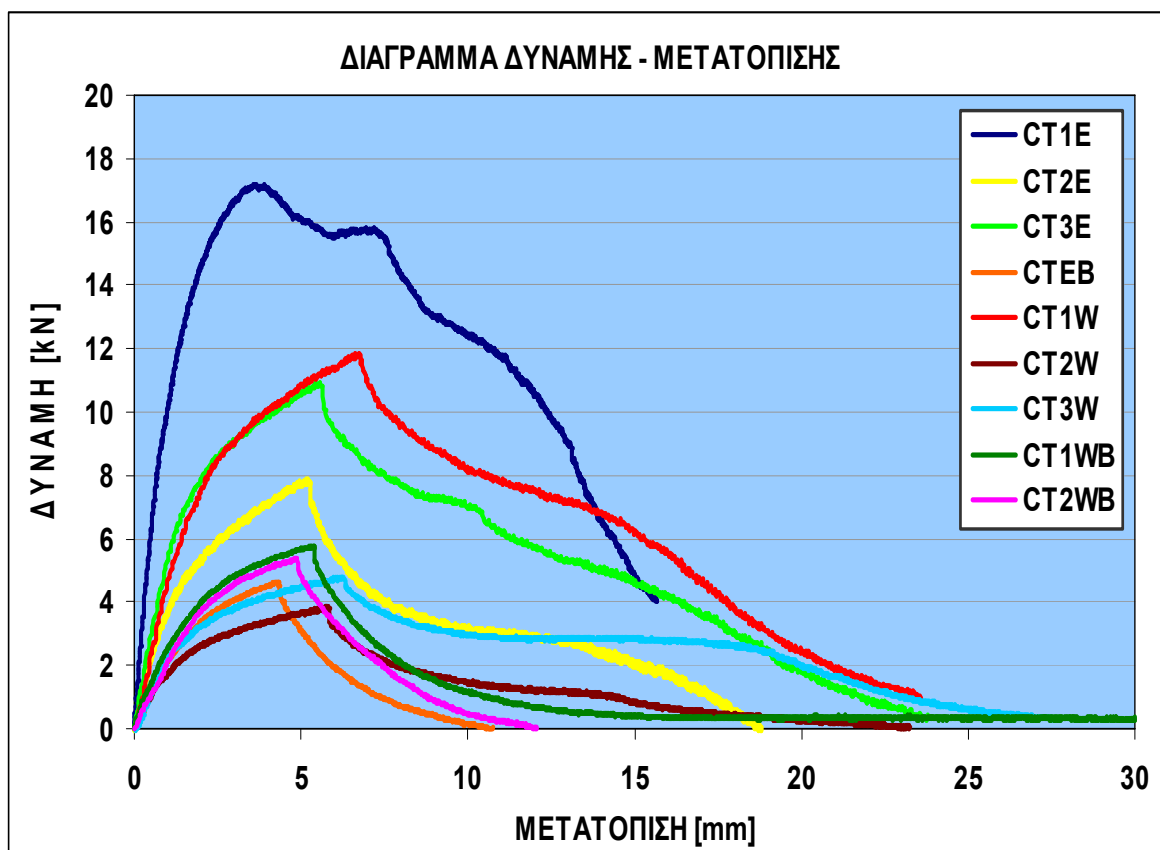
Εικόνα 4-41: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT1WB με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και μηδενική επιφάνεια ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate = 0). Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής: έναρξη και διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, φτάνει στη συγκόλληση και στο ενισχυτικό, αποτυγχάνει να τα διαπεράσει, στρίβει αλλάζει κατεύθυνση και συνεχίζει να διαδίδεται παράλληλα αλλά αντίθετα (υπό γωνία 180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης



Εικόνα 4-42: Σταδιακή απεικόνιση των διακριτών βημάτων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης της ρωγμής στο ενισχυμένο δοκίμιο CT2WB με συγκολλητό ενισχυτικό απλής λάμας και μηδενική επιφάνεια ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate = 0). Τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής: έναρξη και διάδοση της ρωγμής υπό γωνία 60° σε σχέση με τη διεύθυνση της φόρτισης, στροφή σε μια κατεύθυνση κάθετα ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, αρχικά αποτυγχάνει στην προσπάθειά της να διαδοθεί μέσω της συγκόλλησης και του ενισχυτικού, στρίβει, αλλάζει προσανατολισμό και διαδίδεται παράλληλα αλλά αντίθετα (υπό γωνία 180°) ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης, και σε κάποιο σημείο καταφέρνει να διαπεράσει τη συγκόλληση και το ενισχυτικό υπό ορισμένη γωνία και να διαδοθεί ταυτόχρονα στο ενισχυτικό αλλά και στην επιφάνεια του ελάσματος πίσω από αυτό με παρόμοιο ρυθμό προχώρησης

ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ [kN]	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΕΩΣ ΤΗ ΘΡΑΥΣΗ [mm]
CT1E	17.16	3.635
CT2E	7.88	5.159
CT3E	10.93	5.547
CTEB	4.63	4.332
CT1W	11.83	6.735
CT2W	3.85	5.822
CT3W	4.79	6.201
CT1WB	5.75	5.383
CT2WB	5.37	4.823

Πίνακας 4.10: Συγκεντρωτικός πίνακας μέγιστης δύναμης – μετατόπισης έως τη θραύση και των δύο ομάδων ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT

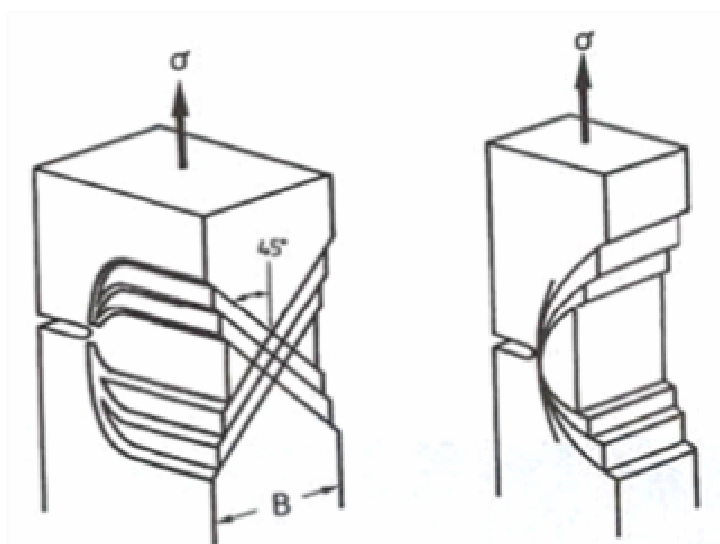


Εικόνα 4-43: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης των ενισχυμένων δοκιμίων εφελκυσμού CT, τόσο με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T CTiE ($i = 1, 2, 3$) και CTEB, όσο και με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας CTiW ($i = 1, 2, 3$) και CTiWB ($i = 1, 2$)

4.4.6 ΚΥΡΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΗΚΑΝ

4.4.7 Η ΕΝΑΡΞΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ (Crack Initiation)

Η έναρξη και ανάπτυξη των ρωγμών είναι πράγματι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συντελούν στη θραύση των ναυπηγικών κατασκευών, επειδή η επίδραση του γεγονότος αυτού έχει αρνητικές συνέπειες στη συμπεριφορά και απόκριση των κατασκευών στα επιβαλλόμενα φορτία και οδηγεί στη μείωση της αντοχής τους σε θραύση. Ο McClintock [16] μελέτησε τη σύνθετη επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας του άκρου των ρωγμών, της επιβαλλόμενης τάσης, καθώς και της ανάπτυξης και του ρυθμού διάδοσης των ρωγμών όσον αφορά την ευαισθησία των μεταλλικών υλικών και την συμπεριφορά τους σε θραύση. Οι συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης (plane stress) είναι αυτές που κυριαρχούν στα πολύ λεπτά ελάσματα όπου υποτίθεται ότι η εγκάρσια τάση σ_z κατά το πάχος του ελάσματος είναι μηδενική. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των ελασμάτων μεγάλου πάχους, επικρατούν πρωτίστως οι συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Ο τύπος της πλαστικής παραμόρφωσης που συνδέεται με αυτές τις δύο περιπτώσεις, επίπεδης εντατικής κατάστασης και επίπεδης παραμόρφωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-44 (Gdoutos [64]).



Εικόνα 4-44: Επίπεδα ολίσθησης γύρω από το άκρο μιας ρωγμής τύπου-I (opening mode) σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης (αριστερά) και επίπεδης παραμόρφωσης (δεξιά)

Στις συνθήκες της επίπεδης εντατικής κατάστασης, η ολίσθηση πραγματοποιείται σε επίπεδα υπό γωνία 45° , προκαλώντας μια σχετικά μεγάλη παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση του πάχους, ενώ στις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, η ολίσθηση συμβαίνει σε επίπεδα κάθετα (90°) σε σχέση με την επιφάνεια του ελάσματος, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα η μορφή της επιφάνειας του ελάσματος να αποκτά ένα σχέδιο παραμόρφωσης τύπου αρμών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-44. Οι Zuidema και Blaauw [73] είχαν παρατηρήσει ότι τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν συχνά περιοχές της επιφάνειας θραύσης από κόπωση οι οποίες είναι κεκλιμένες υπό γωνία 45° ως προς την επιφάνεια του ελάσματος.



Εικόνα 4-45: Η μορφή της έναρξης της ρωγμής που παρατηρήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων

Το μέγεθος της πλαστικής ζώνης σε σχέση με το πάχος του ελάσματος επηρεάζει το κατά πόσο οι συνθήκες του εντατικού πεδίου στο άκρο των ρωγμών είναι ουσιαστικά συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, επίπεδης παραμόρφωσης, ή ένας συνδυασμός αυτών των δύο. Αντιστρόφως, ο τύπος του εντατικού πεδίου που επικρατεί στο άκρο των ρωγμών υπαγορεύει το μέγεθος της πλαστικής ζώνης. Η ταξινόμηση του εντατικού πεδίου δεν είναι ένα απλό θέμα, ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι ελεύθερες τάσεων πλευρικές επιφάνειες του ελάσματος βρίσκονται σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης. Το πάχος του δοκιμίου σε σύγκριση με το μέγεθος της πλαστικής ζώνης στο άκρο των ρωγμών, επομένως επηρεάζει την εντατική κατάσταση και την παραμόρφωση μέσα στην περιοχή της πλαστικής ζώνης. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς σε θραύση των δοκιμίων, αναμένεται επίσης να εξαρτώνται από το πάχος τους. Η έναρξη των

ρωγμών ακολούθησε παρόμοιο τρόπο σχηματισμού και ανάπτυξης σχεδόν σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις των πειραμάτων, Εικόνα 4-45.

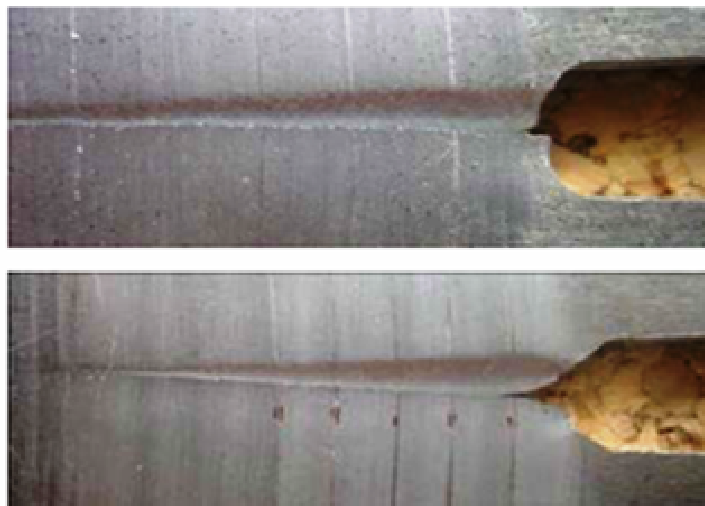
Για τα πολύ μικρά πάχη ελασμάτων, η έλλειψη τριαξονικότητας συμβάλλει σε μια φαινομενική αύξηση της ολκιμότητάς τους και ως εκ τούτου της αντίστασής τους σε θραύση. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η αστοχία θα προκύψει με διαμητική σχάση σε γωνία 45° της επιφάνειας θραύσης με το επίπεδο του ελάσματος και η ρωγμή θα είναι όλκιμη.

4.4.8 Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ (Crack Propagation)

Γενικά μια ρωγμή σε μια μεταλλική κατασκευή συνήθως διαδίδεται σε ένα επίπεδο κάθετα περίπου σε σχέση με την μέγιστη κύρια επιβαλλόμενη τάση. Εάν όμως, ο αρχικός προσανατολισμός της ρωγμής δεν συμπίπτει με ένα τέτοιο επίπεδο, εμφανίζεται μετά την αρχική συστροφή της ρωγμής μια διορθωτική ρύθμιση του προσανατολισμού της, δηλαδή μια αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσής της, η οποία είναι αιφνίδια και βίαιη της τάξης μεγέθους μικρής κλίμακας διαρροής (yielding). Η συστροφή είναι αποτέλεσμα της έναρξης της διάδοσης των ρωγμών κάτω από την επίδραση σύνθετου τύπου φόρτισης. Κάτω από τις συνθήκες μικρής κλίμακας διαρροής (yielding), οι ρωγμές στα ελάσματα εμφανίζονται να αυξάνονται με τοπικές μετατοπίσεις τύπου-I (opening mode) στο άκρο των ρωγμών συμμετρικές ως προς τα επίπεδα x-y και x-z, με εξαίρεση την περίπτωση που ο συγκεκριμένος τρόπος αύξησης των ρωγμών τύπου-I εμποδίζεται από μια αρκετά υψηλή επαγόμενη δύναμη [51].

Η χαρτογράφηση και η σωστή πρόβλεψη της διάδοσης των ρωγμών είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι η αντίσταση μιας κατασκευής σε θραύση μετά την έναρξη των ρωγμών εξαρτάται ιδιαίτερα από το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους. Η Εικόνα 4-46 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα της διάδοσης των ρωγμών σχετικά με τη γεωμετρία του άκρου τους (ημικυκλικό ή τριγωνικό). Η έκταση της προκαλούμενης ζημιάς και οι επιβαλλόμενες δυναμικές φορτίσεις σε μια ναυπηγική κατασκευή επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ευπάθεια της κατασκευής στην έναρξη και τη διάδοση των ρωγμών. Η μικρο-μηχανική του σχηματισμού και της διάδοσης των ρωγμών δεν ενδιαφέρει άμεσα τις ναυπηγικές

κατασκευαστικές αναλύσεις. Για το λόγο αυτό, η ναυπηγική χρησιμοποιεί ουσιαστικά εκείνα τα κριτήρια θραύσης που δεν παρέχουν σε βάθος πληροφορίες σχετικά με τη μικρο-μηχανική των ρωγμών. Γενικά, εάν η μακροσκοπική συμπεριφορά ολόκληρης της κατασκευής μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά με αποτελεσματικό τρόπο, τότε επιτυγχάνεται ο ορθός και πλήρης προσδιορισμός της απόκρισης της κατασκευής.

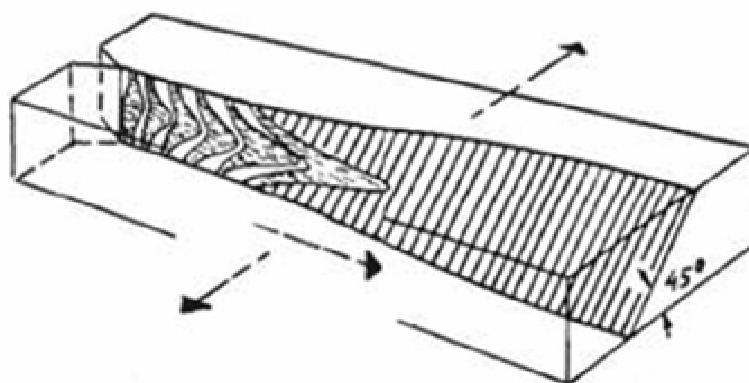


Εικόνα 4-46: Σύγκριση της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών ανάμεσα στα δύο διαφορετικά είδη γεωμετρίας του άκρου των ρωγμών που εξετάστηκαν, ημικυκλικό αμβλύ άκρο τύπου U (επάνω) και τριγωνικό οξύ άκρο τύπου V (κάτω)

Είναι σημαντικό να εξετάσουμε τη διάδοση των ρωγμών στην ομάδα των ενισχυμένων δοκιμίων CT με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T και συγκολλητά ενισχυτικά τύπου απλής λάμας καθώς και την αποτυχία ή την επιτυχία της ρωγμής στη προσπάθειά της να διαδοθεί διαμέσου του ενισχυτικού. Όσον αφορά τα δοκίμια με τα εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T, η ρωγμή απέτυχε σε κάθε περίπτωση να διαπεράσει το ενισχυτικό, ενώ αντίθετα στα δοκίμια με τα συγκολλητά ενισχυτικά σε δύο περιπτώσεις (δοκίμια CT2W και CT2WB) η ρωγμή κατάφερε να διαδοθεί μέσω της συγκόλλησης στο πέλμα του ενισχυτικού. Μια πιο προσεκτική παρατήρηση αυτού του τύπου δοκιμίων CTiW (i = 1, 2, 3) και CTiWB (i = 1, 2) αποκαλύπτει ότι η ρωγμή διαδόθηκε διαμέσου του ενισχυτικού στα δοκίμια CT2W και CT2WB όταν το ενισχυτικό παραμορφώθηκε και το χρονικό σημείο της εισόδου της ρωγμής στο ενισχυτικό ήταν τη στιγμή που αυτό παρουσίασε τη μέγιστη παραμόρφωση. Τα υπόλοιπα τρία δοκίμια CT1W, CT3W και CT1WB παρουσίασαν από ασήμαντη έως μηδενική παραμόρφωση του ενισχυτικού και η ρωγμή απέτυχε να διαδοθεί μέσω του

ενισχυτικού. Ειδικά στην περίπτωση του δοκιμίου CT1W, στην οποία το ενισχυτικό παρέμεινε εντελώς απαραμόρφωτο, η ρωγμή δεν πλησίασε καθόλου τη συγκόλληση και το ενισχυτικό και άλλαξε κατεύθυνση παρουσιάζοντας τη μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη έως τη θραύση.

Ο παρόμοιος τρόπος κεκλιμένης θραύσης (slant fracture), με διαμητική σχάση υπό γωνία 45° σε σχέση με το επίπεδο του ελασματος παρατηρήθηκε και από τον Forsyth, [65]. Η γρήγορη προχώρηση των ρωγμών στη περίπτωση της κόπωσης μπορεί να εξηγηθεί λόγω της προηγηθείσας πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού στο άκρο των ρωγμών, δηλαδή λόγω της συγκέντρωσης παραμενουσών τάσεων κατά την διαδικασία παραγωγής και διαμόρφωσης. Αυτός ο τύπος θραύσης που παρατήρησε ο Forsyth, παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 4-47, όπου η διάδοση της ρωγμής γίνεται μακροσκοπικά ευδιάκριτη με τη μεταβολή του επιπέδου διάδοσής της από την κάθετη κατεύθυνση υπό γωνία 90° ως προς τη διεύθυνση της φόρτισης (μέγιστη κύρια τάση) σε μια κεκλιμένη κατεύθυνση υπό γωνία 45° με την πάροδο του χρόνου στους τελευταίους κύκλους της φόρτισης.



Εικόνα 4-47: Μεταβολή του επιπέδου διάδοσης της ρωγμής (Forsyth [65])

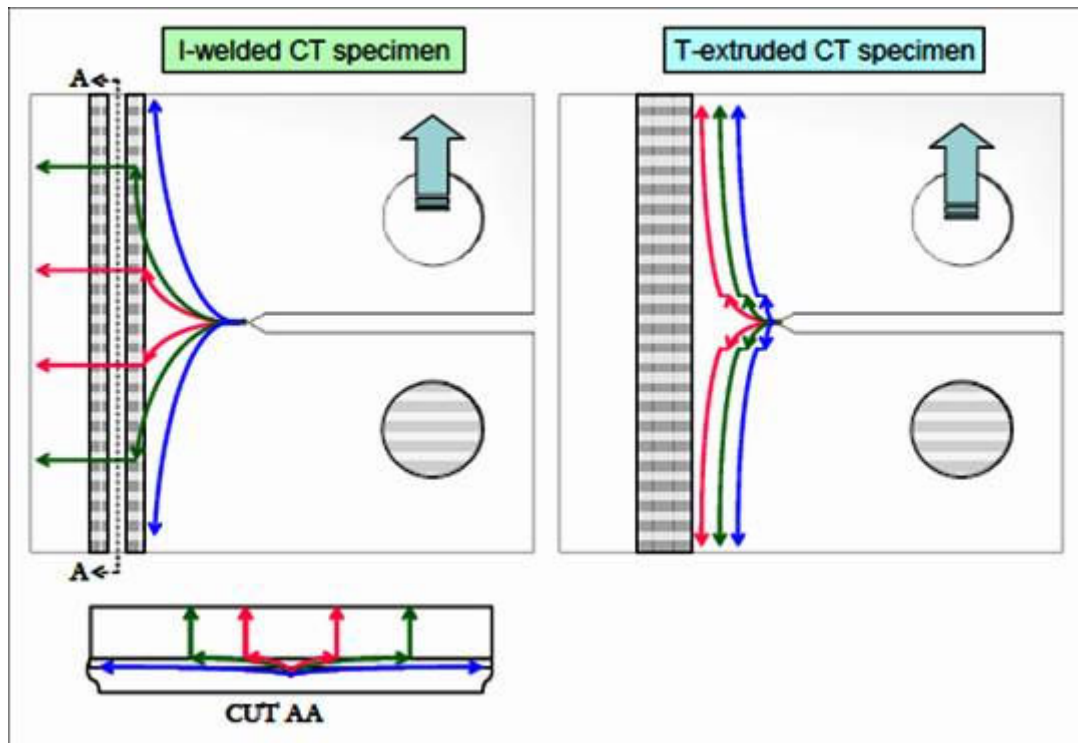
Επίσης, το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συχνά στα πειράματα σταθερής θραύσης (stable tearing) δοκιμίων λεπτών ελασμάτων τα οποία είναι κατασκευασμένα από όλκιμα υλικά, όπως είναι τα κράματα αλουμινίου. Χαρακτηριστικό των πειραμάτων αυτών είναι ότι η ρωγμή έχει την τάση να αναπτύσσεται υπό κλίση τόσο κατά την φάση της έναρξης όσο και κατά τη διάρκεια της διάδοσής της. Αυτή η συμπεριφορά αναφέρεται εκτενώς στα πειράματα κόπωσης που διενεργήθηκαν από τους Rickerby και Fenici [75], Zuidema και Blaauw [73], Zehnder et al. [76] και Richard et al. [77], καθώς και στα πειράματα σταθερής

θραύσης (stable tearing) των Meyn et al. [66], Narasimhan et al. [67], Mahmoud και Lease [62], Simonsen και Tornqvist [19].

Πειράματα εφελκυσμού σε συμπαγή δοκίμια CT με αρχικές διαγώνιες ρωγμές έχουν επίσης διεξαχθεί για αρκετά διαφορετικά όλκιμα υλικά, όπως για παράδειγμα για διάφορους χάλυβες (Kumar και Hirth [68]) και κράματα αλουμινίου (Manoharan [69]). Μια έρευνα που έχει διενεργηθεί από τον Mahgoub et al. [70] σκοπό έχει την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τον κεκλιμένο τρόπο θραύσης, χρησιμοποιώντας τις τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που προέκυψαν από δοκίμια κράματος αλουμινίου Al 2024-T3 επιλεγμένης γεωμετρίας, με αρχικές οριζόντιες και διαγώνιες ρωγμές υπό συνθήκες τοπικών μετατοπίσεων τύπου-I (opening mode). Τέλος, ο James και Newman Jr. [71] εξέτασαν πειραματικά την επίδραση του ανοίγματος των ρωγμών (crack tunneling) στη διάδοσή τους σε ελάσματα του κράματος αλουμινίου 2024-T351.

Ο Sumi et al. [72] εξέτασε πειραματικά και ανέπτυξε μια αριθμητική μέθοδο για την ανάλυση των χαρακτηριστικών της διάδοσης των κοπωτικών ρωγμών και για την αξιολόγηση της υπολειπόμενης ζωής των ναυπηγικών κατασκευών εστιάζοντας στην ακολουθούμενη καμπύλη πορεία διάδοσης των ρωγμών, εξαιτίας των επιδράσεων των συγκολλήσεων, της περίπλοκης κατανομής των τάσεων στις τρισδιάστατες κατασκευαστικές συνδέσεις και των διάφορων κατασκευαστικών περιορισμών. Τόσο στη θεωρία όσο και στα πειράματα, καθώς αυξάνεται το μήκος των ρωγμών αυτές τείνουν να σχηματιστούν και να γίνουν ασταθείς όλο και σε χαμηλότερες τιμές της τάσης, όπως παρατηρείται από τον McClintock [17].

Η Εικόνα 4-48 παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση των αναμενόμενων σχεδίων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών για τα ενισχυμένα δοκίμια CT, τόσο με εξελασμένα ενισχυτικά τύπου-T όσο και με συγκολλητά ενισχυτικά απλής λάμας, όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διενεργήθηκαν. Φαίνεται ότι το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ενισχυτικού (rear plate) και ακολουθεί συγκεκριμένες πορείες οι οποίες μπορούν να χαρτογραφηθούν, Εικόνα 4-48. Πρωταρχικής σπουδαιότητας όμως, για τη διάδοση των ρωγμών είναι ο τύπος των ενισχυτικών, η κατασκευαστική διαμόρφωση και η διάταξη της ενίσχυσης καθώς επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίδιας της ρωγμής.



Εικόνα 4-48: Σχηματικό διάγραμμα της αναμενόμενης ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών στα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων, όπως προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση του πειραματικού προγράμματος, σε συνάρτηση με το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος στο πίσω μέρος του ενισχυτικού

4.5 ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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 την ανάλυση της συμπεριφοράς σε θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών με χρήση δοκιμίων μικρής κλίμακας, συνοψίζονται στα ακόλουθα :

1. Η διάδοση των ρωγμών εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη των ενισχυτικών και από τα χαρακτηριστικά τους.

2. Η σύλληψη των ρωγμών εξαρτάται από τον τύπο των ενισχυτικών, τη διάταξη και την κατασκευαστική τους διαμόρφωση (εξελασμένα ή συγκολλητά).
3. Στα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων τα εξελασμένα ενισχυτικά συλλαμβάνουν αποτελεσματικότερα τις ρωγμές από τα αντίστοιχα συγκολλητά ενισχυτικά.
4. Η παραμόρφωση των ενισχυτικών (περιπτώσεις δοκιμίων CT2W και CT2WB) έχει αρνητική επίδραση στην αποτελεσματικότητά τους ως προς την επιτυχή σύλληψη των ρωγμών.
5. Το μήκος της επιφάνειας του ελάσματος πίσω από το ενισχυτικό επηρεάζει την ακολουθούμενη πορεία διάδοσης των ρωγμών.
6. Το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας κατά τη διάδοση των ρωγμών μπορεί να χαρτογραφηθεί γνωρίζοντας τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές παραμέτρους.
7. Η διάδοση των ρωγμών ακολουθεί ξεχωριστά ευδιάκριτα βήματα στα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων τα οποία μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν.
8. Τέσσερις φάσεις εξέλιξης χαρακτηρίζουν σε κάθε περίπτωση τη συμπεριφορά των ρωγμών στα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων : (i) έναρξη της ρωγμής, (ii) διάδοση της ρωγμής, (iii) στροφή και αλλαγή κατεύθυνσης (iv) σύλληψη της ρωγμής ή αστοχία.

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. Αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα που αποκομίσαμε, με τις κατάλληλες αναλύσεις μπορούν να καλύψουν τα σκοτεινά σημεία για τη πλήρη 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.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ

Οι τύποι των σύγχρονων πλοίων ποικίλλουν ξεκινώντας από τα συμβατικά πλοία, τα οποία κατασκευάζονται από κοινό ναυπηγικό χάλυβα και σχεδιάζονται βάσει της εμπειρίας, και καταλήγοντας στα προηγμένα ταχύπλοα πλοία με γάστρες υψηλής τεχνολογίας που κατασκευάζονται από ελαφριά ναυπηγικά υλικά όπως τα σύνθετα υλικά, τους χάλυβες υψηλής αντοχής και τα κράματα αλουμινίου. Είναι προφανές, ότι ο σχεδιασμός των ναυπηγικών κατασκευών πρέπει να καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και κατασκευαστικών υλικών, γεγονός που οδηγεί παράλληλα με τη συνεχή ανάπτυξη των ιδιαίτερα βελτιστοποιημένων σχεδίων των ταχύπλοων σκαφών, στην απαίτηση για περαιτέρω ερευνητική δραστηριότητα γύρω από το πεδίο αυτό, καθώς οι ποικίλες, τυχαίες και σύνθετες φορτίσεις και οι συνέπειες που αυτές επιφέρουν στις ναυπηγικές κατασκευές, είναι λίγο πολύ ακόμα άγνωστες, λόγω έλλειψης της απαιτούμενης εμπειρίας.

Η απαίτηση για μεγαλύτερη ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές και βελτιωμένες ναυπηγικές κατασκευές αποτελεί στις μέρες μας ένα πολύ σημαντικό ζήτημα και έναν στόχο που η ναυπηγική βιομηχανία προσπαθεί να επιτύχει. Τα ναυτικά ατυχήματα συγκεντρώνουν συνήθως το τεράστιο ενδιαφέρον όλων των διεθνών μέσων και ευαισθητοποιούν την κοινή γνώμη ιδιαίτερα μάλιστα όταν αφορούν την απώλεια ανθρώπινων ζώων ή μεγάλες περιβαλλοντικές καταστροφές, όπως στην περίπτωση του ατυχήματος του πλοίου Exxon Valdez στα ύδατα της Αλάσκας, της βύθιση του πλοίου Estonia λόγω μιας ελαττωματικής φρακτής, και πιο πρόσφατα της βύθιση του δεξαμενόπλοιου Prestige στις ακτές της Γαλλίας, λόγω κατασκευαστικής αστοχίας της γάστρας με τραγικές οικολογικές επιπτώσεις για το περιβάλλον. Τα ναυτικά ατυχήματα, η απώλεια ανθρώπινων ζώων και οι καταστροφικές συνέπειες που αυτά έχουν στο περιβάλλον ασκούν μια τεράστια πίεση

στη ναυπηγική βιομηχανία ώστε να γίνει αυστηρότερο το νομοθετικό πλαίσιο και να βελτιωθούν οι διάφοροι διεθνείς και εθνικοί κανονισμοί για την ασφάλεια των ναυπηγικών κατασκευών και των θαλασσιών μεταφορών, κάτι που δείχνει ότι αυτός ο τομέας της ναυπηγικής είναι ζωτικής σημασίας και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Η λεπτομερής γνώση και βαθιά κατανόηση της μηχανικής της θραύσης και των μηχανισμών αστοχίας είναι η απαραίτητη προϋπόθεση πριν τον καθορισμό και την ανάπτυξη των νέων κατάλληλων κανονισμών ασφάλειας των ναυπηγικών κατασκευών.

Η ναυπηγική βιομηχανία επιδιώκει να αναπτύξει καινοτόμες ιδέες και να επιτύχει αποδοτικότερες εφαρμογές και προηγμένα σχέδια για τα πλοία και τις ναυπηγικές κατασκευές γενικότερα, με μεγαλύτερη ασφάλεια και καλύτερη απόκριση και συμπεριφορά, χρησιμοποιώντας βελτιστοποιημένα κατασκευαστικά σχέδια. Για να αυξηθεί η αντοχή, η αξιοπιστία και η ικανότητα επιβίωσης ενός πλοίου, απαιτούνται η σε βάθος γνώση και το υπόβαθρο μιας τεράστιας εμπειρίας, με σκοπό τη μελέτη της μεθοδολογίας και των κανόνων που διέπουν την επίδραση των διαφόρων παραγόντων των σύνθετων μηχανισμών αστοχίας στις ναυπηγικές κατασκευές και τα συστήματα των πλοίων. Διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της αστοχίας θα πρέπει να αναπτυχθούν, ώστε να ενισχύσουν τη δυνατότητα των πλοίων να αντιστέκονται σε όλους τους τύπους των επιβαλλόμενων φορτίων που πρόκειται να συναντήσουν στο περιβάλλον λειτουργίας τους. Η μοντελοποίηση θα μπορούσε να είναι είτε αριθμητική είτε φυσική. Η δυνατότητα πρόβλεψης της αστοχίας θα είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των υπάρχοντων διαδικασιών και κριτηρίων σχεδιασμού, που μπορούν να οδηγήσουν σε βελτιστοποιημένα αποδοτικότερα σχέδια, αλλά και οικονομικά πιο προσιτά.

Τα πλοία αντιπροσωπεύουν μερικές από τις πιο σύνθετες λεπτότοιχες κατασκευές που παρατηρούνται στην μηχανική. Η κατασκευαστική αστοχία λόγω των ακραίων επιβαλλόμενων φορτίων όπως οι εκρήξεις, οι συγκρούσεις με υψηλή ταχύτητα και τα υδροδυναμικά φορτία προκαλείται πρώτιστα από τη θραύση. Είναι μια συνήθης πρακτική να σχεδιάζονται τα πλοία με επαρκή αντίσταση σε διαρροή, κάμψη, λυγισμό και κόπωση, αλλά όχι σε θραύση, αφού είναι κάτι το οποίο δεν μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά μέχρι σήμερα. Συνεπώς, κάποιες απαραίτητες επαρκείς μέθοδοι και διαδικασίες για να σχεδιάζονται τα πλοία ενάντια στη θραύση δεν έχουν αναπτυχθεί. Ακόμη πιο σημαντική είναι η έλλειψη της θεμελιώδους κατανόησης της μηχανικής των θραύσεων και των μηχανισμών που τη διέπουν υπό

την επίδραση υψηλών εντατικών πεδίων και επιβαλλόμενων φορτίων μικρής διάρκειας. Επομένως, είναι ανάγκη να αυξηθούν τα περιθώρια της επιβιωσιμότητας (survivability) όλων των τύπων πλοίων και ναυπηγικών κατασκευών μέσω μιας εμπειριστατωμένης έρευνας για τη θραύση, βασισμένη στα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, αλλά και της περαιτέρω έρευνας που απαιτείται.

5.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι να γίνει κατανοητή η μηχανική της θραύσης και οι μηχανισμοί που διέπουν την κατασκευαστική απόκριση των ναυπηγικών κατασκευών. Αυτή η εργασία στρέφεται πρώτιστα στα ταχύπλοα σκάφη νέας τεχνολογίας που κατασκευάζονται από ελαφριά κατασκευαστικά υλικά όπως το ναυπηγικό αλουμίνιο, επειδή παρατηρείται μια σημαντική αύξηση στη χρήση των κραμάτων του αλουμινίου στη ναυπηγική βιομηχανία και ιδιαίτερα στα σκάφη αυτού του τύπου. Συγκεκριμένα, σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση και παρατήρηση της συμπεριφοράς των αναπτυσσόμενων ρωγμών στις αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές με απώτερο στόχο την χαρτογράφηση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων, γεγονός που θα οδηγούσε στην αύξηση της αξιοπιστίας των ναυπηγικών κατασκευών και στον καθορισμό των ορίων ασφαλούς αστοχίας, προβλέποντας με ακρίβεια την επικινδυνότητα της κάθε ρωγμής για την κατασκευαστική ακεραιότητα. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, διενεργήθηκε ένα εκτεταμένο πειραματικό πρόγραμμα με τη χρήση δοκιμίων μικρής κλίμακας, για την μακροσκοπική εξέταση της επίδρασης των διάφορων παραμέτρων των μηχανισμών ενίσχυσης των ελασμάτων στη θραύση.

Τα πλοία υποβάλλονται σε συνεχείς εξωτερικές ή εσωτερικές δυναμικές φορτίσεις, που αναπτύσσονται στις δυσμενείς περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες και μπορούν να οδηγήσουν στην απώλεια ολόκληρης της κατασκευής καθώς και ανθρώπινων ζώων. Τα ενισχυμένα ελάσματα είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα δομικά στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής των ναυπηγικών κατασκευών, τα οποία διαμορφώνουν τη σπονδυλική στήλη των πλοίων, και εμφανίζονται στα καταστρώματα, στους πυθμένες (και εσωτερικό πυθμένα), στις φρακτές και στα πλευρικά εξωτερικά περιβλήματα. Εάν τα ενισχυμένα ελάσματα

υποστούν κάποια ζημιά ή προκύψει κατασκευαστική αστοχία, τότε αυτό πιθανώς να οδηγήσει στην κατάρρευση ολόκληρου του συστήματος της κατασκευής. Μια όλο και πιο δημοφιλής προσέγγιση για την ανάλυση της μέγιστης αντοχής που μπορεί να αναπτύξει η μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου είναι να εξετάζεται η αστοχία των μεμονωμένων κατασκευαστικών της στοιχείων, όπως των ενισχυμένων ελασμάτων, και στη συνέχεια να γίνεται σύνθεση αυτών των αποτελεσμάτων προκειμένου να καθοριστεί το φορτίο αστοχίας ολόκληρης της διατομής της κατασκευής.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων στα ενισχυμένα ελάσματα και πλαίσια αλουμινίου αποκαλύπτουν ότι τα φαινόμενα έναρξης, διάδοσης και σύλληψης των ρωγμών εξαρτώνται ιδιαίτερα από την παρουσία κάποιου συστήματος ενίσχυσης, την κατασκευαστική διαμόρφωση, τη διάταξη και τον τύπο των ενισχυτικών και τέλος της ποιότητας της εργασίας κατά τη διαδικασία κατασκευής, όπως είναι για παράδειγμα η ποιότητα της συγκόλλησης ή εξέλασης των ελασμάτων. Οι παρατηρήσεις σχετικά με το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών στα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο τύπος του ενισχυτικού και η κατασκευαστική του διαμόρφωση (συγκολλητό ή εξελασμένο) μπορεί να έχει σημαντικές επιδράσεις στην αντίσταση διάδοσης των ρωγμών και στην αντοχή σε θραύση. 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. Εντούτοις, η κατάλληλη επιλογή των ενισχυτικών πρέπει πάντα να πραγματοποιείται στα πλαίσια της συνύπαρξης με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά στοιχεία και σε άμεση συνάρτηση με τους ποικίλους τύπους φορτίσεων, για τους οποίους ένα πλοίο σχεδιάζεται να ανθίσταται.

Η μηχανική της θραύσης αφορά τη σχεδίαση και την ανάλυση των κατασκευών που περιέχουν ρωγμές ή άλλα ελαττώματα. Σε κάποιο βαθμό όλα τα υλικά περιέχουν ρωγμές, είτε μικροσκοπικά, λόγω των περιεχόμενων μικρορωγμών, κατεστραμένων ινών του υλικού, κ.ά., είτε μακροσκοπικά, λόγω της διάβρωσης, της κόπωσης, των σφαλμάτων συγκόλλησης, κ.ά. Κατά συνέπεια, η μηχανική της θραύσης εμπλέκεται σε οποιαδήποτε λεπτομερή αξιολόγηση της σχεδίασης και της ασφάλειας μιας ναυπηγικής κατασκευής. Δεδομένου ότι οι ρωγμές μπορούν να αναπτυχθούν και να διαδοθούν κατά τη διάρκεια της υπηρεσιακής λειτουργίας λόγω κόπωσης ή άλλων επιβαλλόμενων φορτίσεων, η μελέτη της μηχανικής της θραύσης

και η αξιολόγηση της αντοχής μιας ναυπηγικής κατασκευής απαιτείται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής της και όχι μόνο στην έναρξη του κύκλου ζωής ενός πλοίου.

Στις ερωτήσεις που ακολουθούν η παρούσα εργασία δίνει πλήρως ή μερικώς τις απαιτούμενες απαντήσεις. Προς ποια κατεύθυνση μια ρωγή θα διαδοθεί όταν υπάρχει κάποιο στοιχείο ενίσχυσης; Ποιος τύπος ενισχυτικού και ποια κατασκευαστική διαμόρφωση οδηγεί στην αποτελεσματικότερη σύλληψη μιας ρωγμής; Ποιες παράμετροι έχουν επιπτώσεις στην ακολουθούμενη πορεία διάδοσης των ρωγμών; Τι θα έπρεπε να γίνει από έναν σχεδιαστή ναυπηγό για να βελτιώσει την ανοχή και αντοχή μιας ναυπηγικής κατασκευής στη ζημιά, χωρίς αντίκτυπο στις υπόλοιπες υπάρχουσες κατασκευαστικές απαιτήσεις;

Επιπλέον, αυτή η πειραματική μελέτη θα οδηγήσει τελικά στην πολύ σημαντική γνώση σχετικά με την επίδραση των ενισχυτικών στοιχείων στα φαινόμενα διάδοσης και σύλληψης των ρωγμών, ειδικά λόγω της πρόσφατης ραγδαίας εξάπλωσης των κραμάτων αλουμινίου στις ναυπηγικές εφαρμογές. Αυτά τα αποτελέσματα θα ενισχύσουν την ικανότητα του ναυπηγού μηχανικού να δημιουργήσει ανθεκτικότερες και ασφαλέστερες ναυπηγικές κατασκευές με τη βελτιστοποίηση του απαιτούμενου κατασκευαστικού υλικού και του κατασκευαστικού σχεδίου. Τα επιπλέον οφέλη της καλύτερης απόδοσης και απόκρισης της κατασκευής μπορούν να αποκτηθούν μέσω της βελτιστοποίησης των ενισχυμένων κατασκευαστικών πλαισίων ελασμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα και αναλύσεις που παρέχει η εργασία αυτή μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντικές έρευνες που θα οδηγήσουν στην αύξηση της ανοχής και αντοχής των ναυπηγικών κατασκευών, στην παθητική τους προστασία έναντι ζημιάς και στον αποτελεσματικότερο έλεγχο και περιορισμό της επέκτασης της προκαλούμενης ζημιάς και των συνεπειών της.

5.3 ΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΑΝ

Οι ναυπηγικές κατασκευές, όπως είναι τα πλοία και οι διαφόρων ειδών άλλες θαλάσσιες κατασκευές, σχεδιάζονται ώστε να είναι ανεκτικές στην ζημιά. Το επίπεδο ανοχής στην περίπτωση της ανάπτυξης ρωγμών στη μεταλλική κατασκευή τίθεται με βάση την εμπειρία και απαιτεί την ακριβή πρόβλεψη της διάδοσης των ρωγμών υπό

τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου. Η χαρτογράφηση και πρόβλεψη της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών στις αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην κατασκευαστική ανάλυση και σχεδίαση ενός πλοίου. Η τάση στην ραγδαίως αναπτυσσόμενη ναυπηγική βιομηχανία είναι προς την κατασκευή μεγαλύτερων και γρηγορότερων πλοίων, γεγονός που καθιστά δύσκολη την σχεδίαση των σύγχρονων πλοίων με βάση την εμπειρία των κατασκευών του παρελθόντος. Το αποτέλεσμα είναι μια έντονη ανάγκη για ορθολογιστικές διαδικασίες στη σχεδίαση, τόσο των κύριων κατασκευαστικών τμημάτων όσο και των κατασκευαστικών λεπτομερειών, σε τέτοια πλοία υψηλών προδιαγραφών.

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

- Ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη μελέτη των μηχανισμών που διέπουν τη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών.
- Ολοκλήρωση μιας σειράς πειραματικών δοκιμών θραύσης με χρήση μικρής κλίμακας μεγέθους ενισχυμένων και μη δοκιμίων, αντιπροσωπευτικών πραγματικών κατασκευαστικών στοιχείων.
- Παρατήρηση στις πειραματικές δοκιμές των φαινομένων που σχετίζονται με την έναρξη, διάδοση και σύλληψη των ρωγμών.
- Χαρτογράφηση των σχεδίων της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών στις πειραματικές δοκιμές.
- Προσδιορισμός του βαθμού/μεγέθους της επίδρασης των ενισχυτικών στοιχείων στη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών και στη σύλληψη των ρωγμών.
- Συγκριτική ανάλυση της συμπεριφοράς και των πλεονεκτημάτων που παρέχουν οι διάφοροι τύποι ενισχυτικών, κατασκευαστικές διαμορφώσεις και διατάξεις ενίσχυσης όσον αφορά την ανοχή στη ζημιά και την αντοχή της κατασκευής σε θραύση λόγω ρηγματώσης.
- Αξιολόγηση των παραμέτρων της σχεδίασης που επιδρούν στη θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών.

Παρά τις ποικίλες εφαρμογές του αλουμινίου και των κραμάτων του στη ναυπηγική βιομηχανία, υπάρχει έλλειψη πληροφοριών όσον αφορά στη συμπεριφορά σε θραύση των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν τα κρίσιμα στοιχεία και δεδομένα, τα οποία προκύπτουν από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών θραύσης των ενισχυμένων και μη ελασμάτων και πλαισίων αλουμινίου των ναυπηγικών κατασκευών και αφορούν την έναρξη, τη διάδοση και τη σύλληψη των ρωγμών. Αυτή η έρευνα συμβάλλει στη μελέτη αυτών των στοιχείων, τα οποία θα οδηγήσουν προφανώς σε βελτιστοποιημένα κατασκευαστικά σχέδια πλοίων, στη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης και επισκευής, καθώς επίσης και στην εκτίμηση της κρισιμότητας και της επικινδυνότητας ενός υπάρχοντος κατεστραμένου κατασκευαστικού τμήματος ή στοιχείου του πλοίου και της κατάλληλης μεθόδου που θα επιλεγεί για την επισκευή του.

Η χαρτογράφηση και η σωστή πρόβλεψη της διάδοσης των ρωγμών είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι η αντίσταση μιας κατασκευής σε θραύση μετά την έναρξη των ρωγμών εξαρτάται ιδιαίτερα από το σχέδιο της ακολουθούμενης πορείας διάδοσής τους. Μακροσκοπικά, η κατεύθυνση κατά την οποία μια ρωγή διαδίδεται σε ένα ισοτροπικό υλικό επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, μερικοί από τους οποίους σχετίζονται με τα διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ελάσματος και του υλικού σε κάποια απόσταση από το άκρο των ρωγμών, όπως η υψηλή παραμόρφωση του υλικού που μπορεί να προσελκύσει τη ρωγή, η μείωση της διατομής στο άκρο των ρωγμών, η ανάπτυξη μικροκενών και ο διαχωρισμός του υλικού σε μια περιοχή που έχει υποστεί σοβαρή επεξεργασία ή τέλος μια ανισοτροπία του υλικού που δημιουργείται από τη μετάβαση στην πλαστική περιοχή. Σε άλλες περιπτώσεις, φαίνεται ότι το τοπικό εντατικό πεδίο στο άκρο των ρωγμών είναι αυτό που επιδρά καταλυτικά στην κατεύθυνση της ακολουθούμενης πορείας διάδοσης των ρωγμών.

Κάτω από τις συνθήκες μικρής κλίμακας διαρροής, η απλούστερη υπόθεση για τις ρωγμές στα ισοτροπικά υλικά είναι αυτή της συμμετρίας, η οποία σημαίνει ότι οι ρωγμές εμφανίζονται να αναπτύσσονται με τοπικές μετατοπίσεις των δύο επιφανειών (παρειών) στο άκρο των ρωγμών τύπου-I ή άνοιγμα ρωγμής (opening mode), συμμετρικές ως προς τα επίπεδα x-y και x-z, εκτός και αν αυτός ο τύπος σχετικής μετατόπισης υπόκειται σε αρκετά υψηλές θλιπτικές τάσεις. Στην περίπτωση όμως συνθηκών υψηλής πλαστικής ροής, εμφανίζονται τοπικές μετατοπίσεις στο

άκρο της ρωγμής τύπου-II ή διάτμηση ρωγμής (shear mode), όπως αποδεικνύεται από τις επιφάνειες θραύσης με διατμητική σχάση (shear lips) στις δοκιμές εφελκυσμού. Ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται συνήθως ο τρόπος κεκλιμένης θραύσης (slant fracture), με διατμητική σχάση έχει την προέλευσή του στην δομή του υλικού, καθώς και στον τύπο και στο ποσοστό των διαφόρων στοιχείων πρόσμιξης στη σύστασή του. Περαιτέρω ανάλυση απαιτείται χρησιμοποιώντας τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις.

Αν λάβουμε υπόψη μας ότι τα νέας τεχνολογίας ταχύπλοα σκάφη από αλουμίνιο κατασκευάζονται με μεγαλύτερες διαστάσεις και δεδομένου ότι αντιμετωπίζουν όλο και περισσότερους κινδύνους στο δυσμενές λειτουργικό τους περιβάλλον, η εξασφάλιση της κατασκευαστικής τους αντοχής έναντι οποιασδήποτε αστοχίας γίνεται όλο και πιο σύνθετη και επιβεβλημένη. Η σχεδίαση αυτών των προηγμένων πλοίων από αλουμίνιο έχει δημιουργήσει την ανάγκη για βελτιωμένες κατασκευαστικές μεθόδους. Η μηχανική των θραύσεων έχει εξελιχθεί σε ένα χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση των ναυπηγικών κατασκευών με ανοχές και αντοχές στις ρωγμές και για τον έλεγχο της θραύσης που επίσης είναι πολύ χρήσιμος για την ανάλυση της αστοχίας. Η παρούσα μελέτη παρέχει τις χρήσιμες ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες για εκείνες τις συνθήκες και περιστάσεις που οδηγούν σε αστοχία, και οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστούν και να τεκμηριωθούν τα προληπτικά μέτρα που θα υλοποιηθούν προκειμένου να αποφευχθεί η επανάληψη των αστοχιών αυτών σε παρόμοια κατασκευαστικά στοιχεία, ώστε να διασφαλιστεί η κατασκευαστική ακεραιότητα των ναυπηγικών κατασκευών.

Η προσέγγιση που πραγματοποιήθηκε μέσω της πειραματικής διαδικασίας σε αυτήν την μελέτη είναι πολύ γενική από την άποψη εφαρμογών αυτού του υλικού που εξετάστηκαν, και επομένως το υλικό είναι εφαρμόσιμο επίσης σε μια ευρεία ποικιλία και άλλων μεταλλικών κατασκευών. Η εκτίμηση των πιθανών πρόσθετων τύπων φορτίων και των τρόπων αστοχίας αυτών των κατασκευών, καθώς και μερικές νέες πειραματικές δοκιμές θα απαιτούνταν, ώστε να διευκρινιστούν και να διαφωτιστούν πλήρως αυτές οι νέες εφαρμογές του υλικού.

Ο Paik et al. [29], [31] έκανε μια σύγκριση μεταξύ των διάφορων μεθόδων ανάλυσης, για τα θεμελιώδη όρια που θέτουν οι εκάστοτε προβλέψεις της συμπεριφοράς των αλουμινένιων ενισχυμένων πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν σε εφαρμογές στην αεροδιαστημική, τη ναυπηγική και τις στατικές δομικές κατασκευές και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι λόγω των διαφορετικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των εφαρμογών αυτών, των διαφορετικών τύπων υλικών και του

διαφορετικού κύριου τρόπου αστοχίας, οι αναλύσεις χρησιμοποιώντας τις ίδιες θεμελιώδεις αρχές παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε μέθοδο.

5.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Για να καταστεί αυτή η έρευνα πιο ολοκληρωμένη και να επαληθευτούν και να επικυρωθούν περαιτέρω τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος, κάθε τύπος δοκιμής θα ήταν καλό να επαναληφθεί, για να εξεταστεί η συμπεριφορά του υλικού καθώς και η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του σχεδιασμού και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων στη θραύση, και να συγκριθεί με την αντίστοιχη δοκιμή, για κάθε περίπτωση, που εκτελέστηκε στη μελέτη αυτή. Επίσης, η διενέργεια κάποιου αντίστοιχου πειραματικού προγράμματος σε διαφορετικές κατασκευαστικές εφαρμογές και με χρήση διαφορετικού κατασκευαστικού υλικού θα είχε ως αποτέλεσμα την επέκταση των πειραματικών αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας και θα οδηγούσε στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά την καθολική ισχύ τους στις ναυπηγικές κατασκευές με ορισμένες αποκλίσεις ανά περίπτωση που εξετάζεται. Η μηχανική της θραύσης είναι η μαθηματική ανάλυση των μηχανικών διαδικασιών που οδηγούν στην αστοχία λόγω θραύσης. Αν και η ανάλυση της θραύσης και η μελέτη της έναρξης και διάδοσης των ρωγμών μπορεί να διενεργηθεί πρακτικά με πειραματικές διαδικασίες, τα περισσότερα προβλήματα δεν λύνονται εύκολα με αυτόν τον τρόπο. Μια υπολογιστική ανάλυση είναι συνήθως απαραίτητη. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της μηχανικής των θραύσεων συχνά έχουν περιορισμένη ακρίβεια. Αν και η μηχανική της θραύσης μπορεί βεβαίως να αναπτυχθεί και να βελτιωθεί, τα περισσότερα από τα σφάλματα και αποκλίσεις στα αποτελέσματα οφείλονται σε λανθασμένα και ανακριβή στοιχεία, όσον αφορά το εξεταζόμενο υλικό και τις επιβαλλόμενες φορτίσεις. Στόχος αυτής της μελέτης είναι να ανοίξει νέους τομείς της έρευνας για την επαλήθευση και περαιτέρω επέκταση των επιτευχθέντων αποτελεσμάτων. Αυτοί οι νέοι τομείς μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής τρεις κύριες κατηγορίες.

5.4.1 Η ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Παρά την ανάγκη της μακροσκοπικής εξέτασης μιας ναυπηγικής κατασκευής, η χρήση των νέων κατασκευαστικών υλικών σε ποικίλες εφαρμογές πρέπει να συνδεθεί με τη σε βάθος εξέταση της συμπεριφοράς τους, για την κατανόηση των χαρακτηριστικών που διέπουν τους διάφορους τρόπους αστοχίας. Η ακαδημαϊκή κοινότητα επιδιώκει να γεφυρώσει την επιστήμη των υλικών με τη μηχανική της θραύσης. Ο στόχος αυτής της προσπάθειας είναι η συσχέτιση των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών της θραύσης, με τους μικροσκοπικούς μηχανισμούς της θραύσης και τις μικροδομές των υλικών, χρησιμοποιώντας τα τοπικά κριτήρια αστοχίας. Το μέγεθος των κατασκευών αυξάνεται, δημιουργώντας έτσι ποικίλες σχεδιαστικές προκλήσεις. Οι αλουμιένιες ναυπηγικές κατασκευές είναι λιγότερο δύσκαμπτες έναντι των αντίστοιχων χαλύβδινων, προκαλώντας έτσι υψηλές παραμορφώσεις, λυγισμό και πλαστική ροή. Η εμφάνιση ελαττωμάτων σε επίπεδο μικροκλίμακας μπορεί να προκαλέσει σε συνδυασμό με την υψηλή εφαρμοζόμενη φόρτιση τη διάδοση των ρωγμών από γειτονικά κατασκευαστικά στοιχεία και τη γρήγορη διάδοση μιας υπάρχουσας ρωγμής ή σφάλματος, λόγω των σταδιακά μεταβαλλόμενων καταστάσεων φόρτισης.

Οι μελλοντικοί στόχοι της έρευνας πρέπει να περιλαμβάνουν την ανάπτυξη των πειραματικών και αριθμητικών εργαλείων και μοντέλων σε ποικίλες κλίμακες μεγέθους, για την ανάλυση και το σχεδιασμό των πλοίων και των ναυπηγικών κατασκευών. Η βασική γνώση σε επίπεδο συμπεριφοράς των υλικών και των κατασκευαστικών στοιχείων πρέπει να χρησιμοποιηθεί, ώστε να αποτυπωθεί η συνολική απόκριση ενός πλοίου νέας τεχνολογίας το οποίο κατασκευάζεται από βελτιστοποιημένα ενισχυμένα πλαίσια ελασμάτων με ανοχές στη ζημιά, σε ένα ρεαλιστικό κατασκευαστικό σχέδιο των πλοίων.

5.4.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ΠΟΙΚΙΛΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΥΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Η μελέτη της θραύσης και η αξιολόγηση της αντοχής μιας ναυπηγικής κατασκευής πρέπει να διενεργηθεί για ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων φόρτισης και τύπων αστοχίας. Στην εργασία αυτή εξετάστηκε ο τύπος-I θραύσης (mode I) των

ενισχυμένων και μη ελασμάτων των ναυπηγικών κατασκευών, στο ημιστατικό πεδίο φόρτισης. Τα πλοία εκτίθενται γενικά σε μια μεγάλη ποικιλία εύρους τιμών και ειδών φόρτισης κατά σύνθετο τρόπο. Για να αποκτήσουμε μια σαφή και γενική αντίληψη αυτών των φορτίων και της επίδρασής τους στην κατασκευή των πλοίων, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τρόποι ταξινόμησης των φορτίων αυτών. Ένας τρόπος είναι να ταξινομηθούν τα φορτία σύμφωνα με τις πηγές από τις οποίες προέρχονται. Έτσι, οι βασικές αιτίες είναι το βάρος, η άντωση, οι κυματισμοί, ο αέρας, η φορτοεκφόρτωση στους λιμένες, και οι θερμοκρασιακές διαφορές. Αυτά τα φορτία είναι τα συνήθως αναμενόμενα και λίγο έως πολύ προβλέψιμα. Εντούτοις, τα πλοία μπορούν επίσης να υποβληθούν και σε απροσδόκητα ή τυχαία φορτία που προκύπτουν από τις συγκρούσεις, τις προσaráξεις, τις εκρήξεις, τις πυρκαγιές, την κατάκλυση με νερό, κ.ά. Επίσης, ο ρυθμός φόρτισης συχνά επηρεάζει την κατεύθυνση της διάδοσης των ρωγμών. Η επιφάνεια θραύσης που προκαλείται με διατμητική σχάση λόγω της έναρξης και διάδοσης των ρωμών με τοπικές μετατοπίσεις των παρειών στο άκρο της ρωγμής τύπου-II (shear mode), εμφανίζεται μόνο σε περιπτώσεις που ο ρυθμός φόρτισης είναι αρκετά υψηλός, ειδάλως πραγματοποιείται η ανάπτυξη μιας ρωγμής με τοπικές μετατοπίσεις τύπου-I (opening mode). Κάποιες άλλες παράμετροι, όπως το ποσοστό παραμόρφωσης και το διαφορετικό είδος φόρτισης (μονοαξονική, στατική, δυναμική ή σύνθετη φόρτιση), πρέπει να εξεταστούν και να αξιολογηθούν. Η επίδραση του πάχους των ελασμάτων, οι διάφοροι τύποι σύνθετων κατασκευαστικών διαμορφώσεων καθώς και η διαδικασία και τα χαρακτηριστικά της κατασκευής (συγκόλληση) ίσως να οδηγήσουν σε πολύ σημαντικές παρατηρήσεις.

5.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Ένα παρόμοιο πειραματικό πρόγραμμα με αυτό που διενεργήθηκε για τα κατασκευαστικά στοιχεία, ενισχυμένα και μη, των αλουμινένιων ναυπηγικών κατασκευών πρέπει να εφαρμοστεί και για διάφορες άλλες κατασκευαστικές εφαρμογές και υλικά, με έμφαση κυρίως στο χάλυβα. Επίσης, η τελική έγκριση και επικύρωση των εξαγόμενων πειραματικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που προέκυψαν από την περαιτέρω ανάλυση, πρέπει να επικυρωθούν με τις πραγματικής

κλίμακας μεγέθους πειραματικές δοκιμές των σχετικών κατασκευαστικών εφαρμογών, ώστε να ελεγχθεί και να ελαχιστοποιηθεί τυχόν επίδραση της κλίμακας μεγέθους στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Τα αποτελέσματα της αλλαγής κλίμακας πρέπει πάντα να εξετάζονται κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης των πειραματικών αναλύσεων για ένα σύνολο δοκιμών, ώστε να είναι όσο το δυνατόν πληρέστερες. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μικρής, μεσαίας και πραγματικής κλίμακας μεγέθους δοκιμών θα δείξει αν η πορεία διάδοσης των ρωγμών ακολούθησε παρόμοια διακριτά βήματα διάδοσης, κάτι που αποδεικνύει ότι η επίδραση της αλλαγής του μεγέθους της κλίμακας των δοκιμών δεν είχε επιπτώσεις στην ακολουθούμενη πορεία διάδοσης των ρωγμών.

Οι πειραματικές δοκιμές με χρήση μικρής κλίμακας μεγέθους δοκιμών είναι αναπόφευκτη για τον προσδιορισμό και τη κατανόηση της συμπεριφοράς ενός σύνθετου κατασκευαστικού συστήματος, όπως είναι οι ναυπηγικές κατασκευές που είναι δύσκολο να αναλυθούν θεωρητικά ή αριθμητικά και να μελετηθούν πειραματικά. Είναι προφανές, ότι η μόνη οικονομικά αποδοτική λύση για να προβλέψει κανείς επακριβώς τη συμπεριφορά των πραγματικού μεγέθους κατασκευαστικών στοιχείων των ναυπηγικών κατασκευών είναι μέσα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις. Η επίδραση της κλίμακας μεγέθους (scaling effect) είναι ένα σημαντικό ζήτημα, είτε λόγω του διαφορετικού μεγέθους των εξεταζόμενων δοκιμών, είτε σε μερικές εφαρμογές λόγω των διαφορετικών τύπων χρησιμοποιούμενων υλικών, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις στα επιτευχθέντα πειραματικά αποτελέσματα. Επομένως, μερικές φορές οι πραγματικού μεγέθους δοκιμές δεν μπορούν να αποφευχθούν, ειδικά στις κρίσιμες κατασκευαστικές εφαρμογές. Οι μικρής κλίμακας δοκιμές είναι σαφώς πολύ οικονομικότερες σε σχέση με τις πραγματικού μεγέθους δοκιμές. Εντούτοις, για μια πλήρη επαλήθευση των εργαλείων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ενισχυμένων και μη ελασμάτων και πλαισίων των ναυπηγικών κατασκευών, απαιτούνται πραγματικού μεγέθους δοκιμές.

Αφ' ετέρου, απαιτείται η σύνδεση της μεταλλουργικής εξέτασης ενός υλικού σε μικροκλίμακα με τα δοκίμια μικρής και μεσαίας κλίμακας, προκειμένου να κατανοήσουμε τα χαρακτηριστικά της θραύσης ενός υλικού ή ενός κατασκευαστικού στοιχείου. Η Bouchaud [78], χρησιμοποίησε νανοτεχνολογικές προσεγγίσεις στην έρευνά της που αφορούσε τις ιδιότητες των ρωγμών σε σχέση με την επίδραση της κλίμακας μεγέθους, βασιζόμενη στη όψη και τη μορφολογία της επιφάνειας θραύσης

και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ετερογένειες της μικροδομής του υλικού, ελέγχουν τη ικανότητα του υλικού να ανθίσταται στην έναρξη και διάδοση των ρωγμών, εξετάζοντας αρκετές διαφορετικές ακολουθούμενες πορείες διάδοσης των ρωγμών.

Τα μελλοντικά πλοία και ναυπηγικές κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι ασφαλή και να επιβιώνουν σε περίπτωση έκθεσης σε ακραίες συνθήκες φόρτισης λόγω συγκρούσεων, εκρήξεων, κ.ά. Οι διάφοροι τύποι κατασκευαστικής αστοχίας συμβάλλουν στην απώλεια της ακεραιότητας των ναυπηγικών κατασκευών και πλοίων που υποβάλλονται σε φορτίσεις, κατά τις οποίες παίζει μεγάλο ρόλο η επιλογή του κατάλληλου κατασκευαστικού υλικού και της αποδοτικότερης κατασκευαστικής διαμόρφωσης. Η πρόοδος στον τομέα αυτό και η αναβάθμιση και ενσωμάτωση αυτών των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών παραμέτρων είναι απαραίτητες, προκειμένου να παρασχεθεί ένα σχεδιαστικό πλαίσιο για την ανάπτυξη των βελτιστοποιημένων κατασκευαστικών διαμορφώσεων και υλικών για τις ναυπηγικές κατασκευές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Η επεξήγηση των χρησιμοποιούμενων συμβολισμών του συστήματος χαρακτηρισμού κατεργασιών των κραμάτων αλουμινίου, δίνεται στον Πίνακα Α.1.

Η χημική σύσταση μερικών κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγική χρήση φαίνεται στον Πίνακα Α.2.

Στον Πίνακα Α.3 και Α.4, αναγράφονται οι μηχανικές ιδιότητες των ίδιων κραμάτων αλουμινίου για διάφορες θερμικές κατεργασίες.

Σημειώνεται ότι οι ιδιότητες που αναγράφονται στους Πίνακες Α.3 και Α.4 αναφέρονται στις περιοχές του βασικού μετάλλου μακριά από την συγκόλληση. Στην περιοχή της συγκόλλησης, οι ιδιότητες αυτές χειροτερεύουν.

Στον Πίνακα Α.5 παρουσιάζεται σύγκριση της μηχανικής αντοχής και του βάρους διαφόρων ναυπηγικών υλικών.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.1

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης
H1X	Μόνον ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης): H 11 : Κράμα ελάχιστης σκληρότητας H 12 : Κράμα σκληρυμένο κατά 25 % H 14 : Κράμα σκληρυμένο κατά 50 % H 16 : Κράμα σκληρυμένο κατά 75 % H 18 : Κράμα σκληρυμένο κατά 100 % H 19 : Υπέρσκληρο κράμα
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά την ανόπτηση.
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
T5	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
T9	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα, που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.2

ΚΡΑΜΑ (ALLOY)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Άλλα Στοιχεία	Al
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2 - 2.8	0.15 - 0.35	0.10	-	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
5083	0.40	0.40	0.10	0.4 - 1.0	4.0 - 4.9	0.05 - 0.25	0.25	0.15	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
5086	0.40	0.50	0.10	0.2 - 0.7	3.5 - 4.5	0.05 - 0.25	0.25	0.15	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
5383	0.25	0.25	0.20	0.7 - 1.0	4.0 - 5.2	0.25	0.40	0.15	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
5454	0.25	0.40	0.10	0.5 - 1.0	2.4 - 3.0	0.05 - 0.20	0.25	0.20	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
5456	0.25	0.40	0.10	0.5 - 1.0	4.7 - 5.5	0.05 - 0.20	0.25	0.20	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
5754	0.40	0.40	0.10	0.50	2.6 - 3.6	0.30	0.20	0.15	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
6060	0.3 - 0.6	0.1 - 0.3	0.10	0.10	0.35 - 0.6	0.05	0.05	0.10	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
6061	0.4 - 0.8	0.70	0.15 - 0.40	0.15	0.8 - 1.2	0.04 - 0.35	0.25	0.15	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
6063	0.2 - 0.6	0.35	0.10	0.10	0.45 - 0.90	0.10	0.10	0.10	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
6082	0.7 - 1.3	0.50	0.10	0.4 - 1.0	0.6 - 1.2	0.25	0.20	0.10	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
6351	0.7 - 1.3	0.50	0.10	0.4 - 0.8	0.40 - 0.80	-	0.20	0.20	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
356.0	6.5 - 7.5	0.60	0.25	0.35	0.20 - 0.40	-	0.35	0.25	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
A356.0	6.5 - 7.5	0.20	0.20	0.10	0.20 - 0.40	-	0.10	0.20	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
514.0	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5 - 4.5	-	0.15	0.25	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
520.0	0.25	0.30	0.25	0.15	9.5 - 10.6	-	0.15	0.25	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο
535.0	0.15	0.15	0.05	0.10 - 0.25	6.2 - 7.5	-	-	0.10 - 0.25	0.05 - 0.15	Υπόλοιπο

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.3

ΟΡΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΜΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

ΚΡΑΜΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΠΑΧΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ [MPa]		ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ [MPa]		ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ σε 50 mm (2 in)
		Milimeters	Min	Max	Min	Max
5052-0	3.0 – 6.5	172	214	66	-	20
	6.6 – 75.0	172	21	66	-	13
5052-H32	3.0 – 6.5	214	262	159	-	9
	6.6 – 12.5	214	262	159	-	11
	12.6 – 51.0	214	262	159	-	12
5052-H34	3.0 – 6.5	234	283	179	-	7
	6.6 – 25.0	234	283	179	-	10
5052-H112	6.5 – 12.5	193	-	110	-	7
	12.6 – 51.0	172	-	66	-	12
	51.1 – 75.0	172	-	66	-	16
5083-0	1.5 – 38.0	276	352	124	200	16
	38.1 – 76.5	269	345	117	200	16
5083-H112	6.5 – 38.0	276	-	124	-	12
	38.1 – 76.5	269	-	117	-	12
5083-H116	4.5 – 38.0	303	386	214	296	12
5083-H117	38.1 – 76.5	283	386	200	296	12
5083-H323	1.5 – 3.0	310	372	234	303	8
	3.1 – 6.5	310	372	234	303	10
5083-H343	1.5 – 3.0	345	407	269	338	6
	3.1 – 6.5	345	407	269	338	8
5086-0	1.5 – 6.5	241	303	97	-	18
	6.6 – 51.0	241	303	97	-	16
5086-H112	4.5 – 12.5	248	-	124	-	8
	12.6 – 25.5	241	-	110	-	10
	25.6 – 51.0	241	-	9	-	14
	51.1 – 76.5	234	-	97	-	14
5086- H 116 και H117	1.5 – 6.5	276	324	193	-	8
	6.6 – 51.0	276	324	193	-	12

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.4

ΟΡΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΜΗ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

ΚΡΑΜΑ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΠΑΧΟΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ [MPa]		ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ [MPa]		ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ σε 50 mm (2 in)
		Milimeters	Min	Max	Min	Max
5454-0	3.0 – 76.5	214	283	83	-	18
5454-H32	1.5 – 6.5	248	303	179	-	8
	6.6 – 51.0	248	303	179	-	12
5454-H34	4.0 - 6.5	269	324	200	-	7
	6.6 – 25.5	269	324	200	-	10
5454-H112	6.5 – 12.5	221	-	124	-	8
	12.6 – 51.0	214	-	83	-	11
	51.1 – 76.5	214	-	83	-	15
5456-0	1.5 – 38.0	290	365	131	207	16
	38.1 – 76.5	283	359	124	207	16
5456-H112	6.5 – 38.0	290	-	131	-	12
	38.1 – 76.5	283	-	124	-	12
5456-H116 και H117	4.5 – 15.5	317	407	228	317	12
	15.6 – 32.0	317	386	228	310	12
	32.1 – 38.0	303	386	214	296	12
	38.1 – 76.5	283	386	200	296	12
5456-H323	1.5 – 3.0	331	400	248	317	6
	3.1 – 6.5	331	400	248	317	8
5456-H343	1.5 – 1.0	365	434	283	352	6
	3.1 – 6.5	365	434	283	352	8

ΠΙΝΑΚΑΣ Α.5

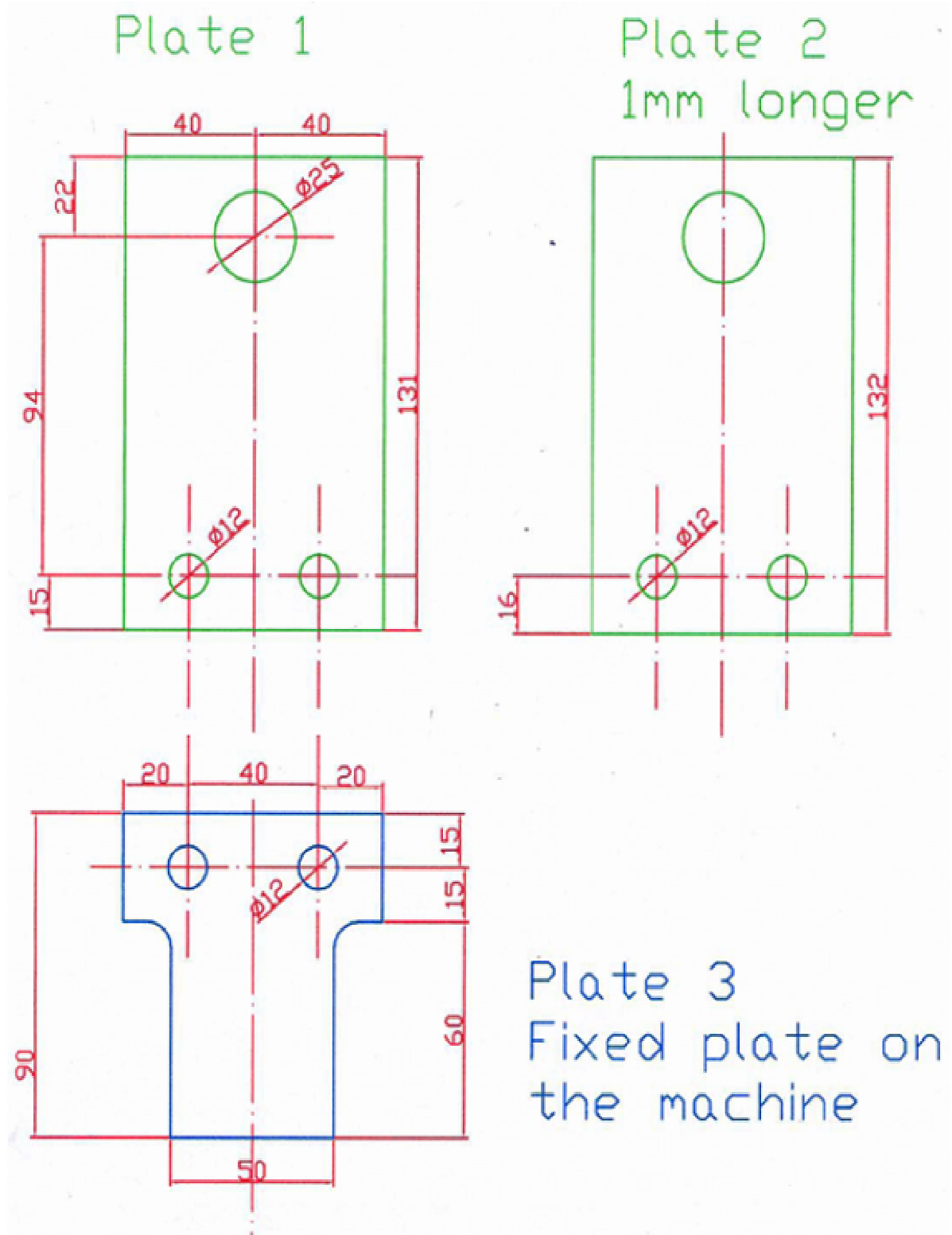
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΡΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ						
ΥΛΙΚΟ	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ [kN/m³]	ΤΥΠΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ [MPa]			ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ [GPa]	ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΡΟΣ ΒΑΡΟΣ (ΟΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ/ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ) x 1000m
		ΟΡΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	ΟΡΙΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ		
ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ :						
5083 – H113	26.1	317	228	186	71.0	12.1
5086 – H34	26.1	324	255	186	71.0	12.4
6061 – T6	26.6	310	276	207	68.9	11.6
Ναυπηγικός χάλυβας ASTM- A131	78.7	455	228	-	200.0	5.8
Κοινός χάλυβας ASTM - A100	76.0	386	207	290	200.0	5.1
Χαλκός σε φύλλα	86.9	317	276	-	117.2	3.6
Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες :						
- κατά μήκος των ινών	16.8	220	-	90	9.7	13.1
- εγκάρσια στις ίνες	16.8	145	-	97	7.6	8.6

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

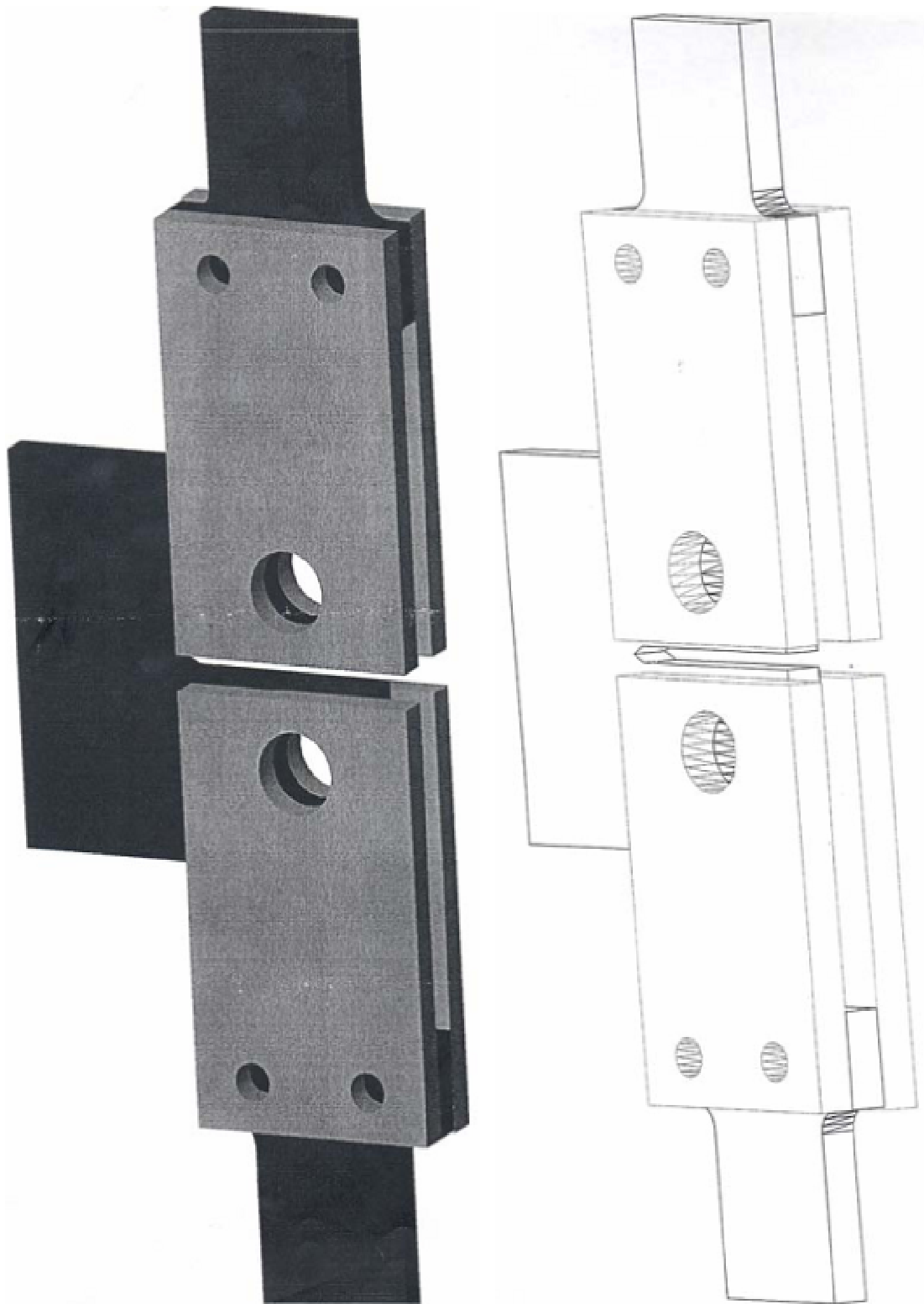
Β. ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ MTS ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

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

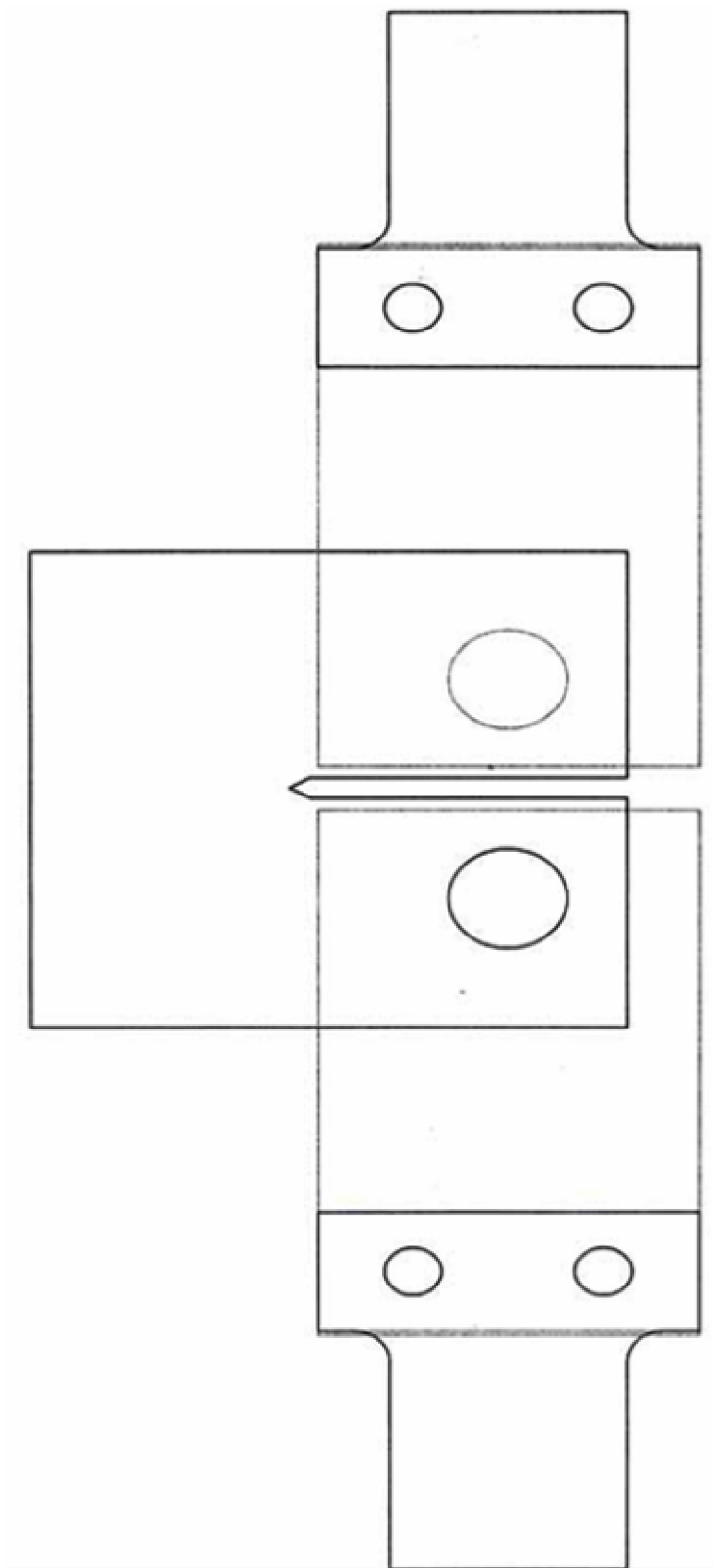
Η μηχανή εφελκυσμού MTS του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας διαθέτει μια ποικιλία διαφορετικών εξαρτημάτων συγκράτησης των πειραματικών δοκιμίων. Ανάλογα με το είδος του πειράματος που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε (είδος φόρτισης) και με το μέγεθος και τη μορφή των δοκιμίων που εξετάζονται κάθε φορά, χρησιμοποιούνται και τα αντίστοιχα εξαρτήματα, τα οποία προσαρμόζονται κατάλληλα στις αρπάγες της πειραματικής μηχανής. Έτσι, τα ειδικά διαμορφωμένα προσαρτήματα που σχεδιάστηκαν για αυτήν την συγκεκριμένη ομάδα πειραμάτων εφελκυσμού σε συμπαγή δοκίμια CT μικρής κλίμακας, παρουσιάζονται αναλυτικά στις Εικόνες B1, B2 και B3 που ακολουθούν.



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



Εικόνα B-2: Σχηματική απεικόνιση της τελικής μορφής της πειραματικής διάταξης των εξαρτημάτων συγκράτησης και των μικρής κλίμακας δοκιμών εφελκυσμού CT λίγο πριν τοποθετηθούν στις αρπάγες της μηχανής



Εικόνα Β-3: Εγκατάσταση και στήριξη των δοκιμίων εφελκυσμού CT στα κατάλληλα διαμορφωμένα εξαρτήματα συγκράτησης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «**Ναυπηγική Τεχνολογία**», Βασίλης Ι. Παπάζογλου, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995.
- [2] «**Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου, Θέματα Τοπικής Αντοχής**», Πέτρος Α. Καρύδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000.
- [3] «**Επιθεώρηση, Συντήρηση και Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου**», Πέτρος Α. Καρύδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [4] «**Βασική Θεωρία Πλοίου, 1^{ος} Τόμος**», Κ. J. Rawson & E. C. Tupper, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [5] «**Βασική Θεωρία Πλοίου, 2^{ος} Τόμος**», Κ. J. Rawson & E. C. Tupper, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [6] «**Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών**», Δ. Ι. Παντελής, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
- [7] «**Πειραματική Αντοχή των Υλικών**», Ν. Π. Ανδριανόπουλος, Ε. Γ. Κυριαζή, Κ. Μ. Λιακόπουλος, Εκδόσεις Σιμεών, Αθήνα 1991.
- [8] «**Αντοχή Πλοίου Ι**», **Σημειώσεις**, Μ. Σαμουηλίδης, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995.
- [9] Bishop, R. E. D. and Price, W. G. Hydroelasticity of Ships, Cambridge U. P., 1979.
- [10] Hellenic Navy classified documentation with respect to the marine aluminum alloy for naval vessels.

- [11] Herrington, P. D. and Latorre, R. G., Development of an aluminum hull panel for highspeed craft, *Marine Structures* 11 (1 - 2): 47 - 71, 1998.
- [12] Xiao, Y. and Menzemer, C., Ultimate compressive strength of aluminium plate elements, *Journal of Structural Engineering* 129 (11): 1441 - 1447, 2003.
- [13] Tryland, T., Larsen, P. and Langseth, M., Design of I beams and deck profiles under concentrated loading, *Journal of Structural Engineering* 129 (11): 1433 - 1440, 2003.
- [14] Ramberg, W. and Osgood, W. R., Description of stress – strain curves by three parameters, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Technical Note No 902, 1943.
- [15] Mazzolani, F. M., *Aluminum Alloy Structures*, E & FN Spon, 1995.
- [16] McClintock, F. A., Effects of root radius, stress, crack growth and rate on fracture instability, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 285 : 58 - 72, No. 1400, A Discussion on Damage and Failure Mechanisms of Heavy – Section Steel, 1965.
- [17] McClintock, F. A., Ductile fracture instability in shear, *Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME* 25: 582 - 588, 1958.
- [18] Simonsen, B. C. and Ocakli, H., Experiments and theory on deck and girder crushing, *Thin – Walled Structures* 34 (3): 195 - 216, 1999.
- [19] Simonsen, B. C. and Törnqvist, R., Experimental and numerical modeling of ductile crack propagation in large-scale shell structures, *Marine Structures* 17 (1): 1 - 27, 2004.
- [20] Hughes, O. F. and Society of Naval Architects and Marine Engineers (U.S.), *Ship Structural Design : a rationally – base, computer – aided optimization approach*, SNAME edition, Jersey City, N.J. : Society of Naval Architects and Marine Engineers, xv, 566 p., 1998.

- [21] Sielski, R. A., Stopping cracks in aluminum plate, *U.S. Navy Deckplate*, NAVSEA 7, 1986.
- [22] Fang, C. and Das, P. K., Survivability and reliability of damaged ships after collision and grounding, *Ocean Engineering* 32 (3 - 4): 293 -307, 2005.
- [23] International Association of Classification Societies (IACS), Guidelines for assessment of the fatigue design of ship structures, Paris La Defence, November 30, 1998.
- [24] International Maritime Organization (IMO) website <http://www.imo.org/>.
- [25] Irwin, G. R., *Fracture Mechanics*, Report of Naval Research Laboratory Progress, Washington, D.C., 36 p., 1973.
- [26] International Standard ISO 12135 : 2002 (E), Metallic materials – unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, 2002.
- [27] International Standard ISO 209 – 1 : 1989, Wrought aluminum and aluminium alloys – Chemical composition and forms of products – Part 1: Chemical composition, 1989.
- [28] Standard Specification for High Magnesium Aluminum Alloy Sheet and Plate for Marine Service, ASTM B928 – 03, ASTM International, 2003.
- [29] Paik, J. K., van der Veen, S., Duran, A. and Collette, M., Considering aluminum welded panel structures for aerospace, marine and land-based applications : a comparison of ultimate compressive strength design methods, *9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Luebeck – Travemuende, Germany, 2: 727 - 735, 2004.
- [30] Paik, J. K., Kumar, Y. V. S. and Lee, J. M., Ultimate strength of cracked plate elements under axial compression or tension, *Thin – Walled Structures* 43 (2): 237 - 272, 2005.

- [31] Paik, J. K., van der Veen, S., Duran, A. and Collette, M., Ultimate compressive strength design methods of aluminum welded stiffened panel structures for aerospace, marine and land-based applications: A benchmark study, *Thin-Walled Structures* 43 (10): 1550 - 1566, 2005.
- [32] Paik, J. K. and Duran, A., Ultimate strength of aluminum plates and stiffened panels for marine applications, *Marine Technology and SNAME News* 41 (3): 108 - 121, 2004.
- [33] Paik, J. K. and Kumar, Y. V. S., Ultimate strength of stiffened panels with cracking damage under axial compression or tension, *Journal of Ship Research* 50 (3): 231 - 238, 2006.
- [34] 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.
- [35] Burch, I. A., Ritter, J. C., Saunders, D. S. and Underwood, J. H., Crack arrest fracture toughness testing of naval construction steels, *Journal of Testing and Evaluation* 26 (3): 269 - 276, 1998.
- [36] Chao, R. - M., Chen, Y. R. and Kuo, J. - C, Crack propagation in high tensile steel, *Ship Technology Research* 47: 95 - 101, 2000.
- [37] Pussegoda, L. N., Malik, L. and Tyson, W. R., Effects of plastic deformation on fracture toughness of ship plate steels, *Canadian Metallurgical Quarterly* 36 (1): 39 - 47, 1997.
- [38] 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.
- [39] 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.

- [40] Priest, A. H., An energy balance in crack propagation and arrest, *Engineering Fracture Mechanics* 61 (2): 231 - 251, 1998.
- [41] Priest, A. H., The influence of structural dimensions on crack arrest, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (17): 2421 - 2437, 2003.
- [42] Rigo, P., Sarghiuta, R., Estefen, S., Lehmann, E., Otelea, S. C., Pasqualino, I., Simonsen, B. C., Wan, Z. and Yao, T., Sensitivity analysis on ultimate strength of aluminium stiffened panels, *Marine Structures* 16: 437 - 468, 2003.
- [43] Rigo, P., Sarghiuta, R., Otelea, S. C., Pasqualino, I., Wan, Z., Yao, T., Toderan, C. and Richir, T., Ultimate strength of aluminium stiffened panels : Sensitivity analysis, *Proceedings of Practical Design of Ships and other Floating Structures* 1 : 156 - 162, 2004.
- [44] Richir, T., Toderan, C., Paik, J. K. and Rigo, P., Effect of welding on ultimate compressive strength of aluminium stiffened panels, *High Performances Marine Vehicles (HIPER' 2004)*, Rome, 129 - 139, 2004.
- [45] 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.
- [46] Lan, W., Deng, X., Sutton, M. A. and Cheng, C. - S., Study of slant fracture in ductile materials, *International Journal of Fracture* 141 (3 - 4): 469 - 496, 2006.
- [47] America Bureau of Shipping, Rules for building and classing aluminum vessels, 1975.
- [48] America Bureau of Shipping, Rule requirements for materials and welding, Part 2, Supplementary requirements for naval vessels, May 2000.
- [49] America Bureau of Shipping, Guide for building and classing high - speed naval craft, 2007.

- [50] British Standard BS EN 13195 – 1: 2002 Aluminium and aluminium alloys – Wrought and cast products for marine applications (shipbuilding, marine and offshore), 2002.
- [51] Broberg, K. B., Cracks and fracture, San Diego : Academic Press. xvi, 752 p, 1999.
- [52] British Standard BS 8118, Structural use of aluminum, Part I : Code of practice for design, 1991.
- [53] Dexter, R. J. and Pilarski, P. J., Effect of welded stiffeners on crack growth rate, Ship Structure Committee, Report No SSC - 413, 2000.
- [54] Dexter, R. J. and Pilarski, P. J., Crack propagation in welded stiffened panels, *Journal of Constructional Steel Research* 58 (5 - 8): 1081 - 1102, 2002.
- [55] 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.
- [56] Dinovitzer, A. S. and Pussegoda, N., Fracture toughness of a ship structure, Ship Structure Committee, Report No SSC - 430, 2003.
- [57] Garwood, S. J., Investigation of the MV Kurdistan casualty, *Engineering Failure Analysis* 4 (1): 3 - 24, 1997.
- [58] Ghfiri, R, Shi, H. - J., Guo, R. and Mesmacque, G., Effects of expanded and non – expanded hole on the delay of arresting crack propagation for aluminum alloys, *Materials Science and Engineering* 286 (2): 244 - 249, 2000.
- [59] Ghose, D. J., Nappi, N. S. and Wiernicki, C. J., Residual strength of damaged marine structures, Ship Structure Committee, Report No SSC - 381, 1994.
- [60] Glen, I. F., Dinovitzer, A., Malik, L. and Yee, R., Guide to damage tolerance analysis of marine structures, Ship Structure Committee, Report No SSC - 409, 1999.

- [61] Mahmoud, H. N. and Dexter, R. J., Propagation rate of large cracks in stiffened panels under tension loading, *Marine Structures* 18 (3): 265 - 288, 2005.
- [62] Mahmoud, S. and Lease, K., The effect of specimen thickness on the experimental characterization of critical crack-tip-opening angle in 2024-T 351 aluminum alloy, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (3 - 4): 443 - 456, 2003.
- [63] Timoshenko, S. P., *History of Strength of Materials*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.
- [64] Gdoutos, E. E., *Fracture mechanics : an introduction*, 2nd Ed. Solid mechanics and its applications; v. 123, Dordrecht, Norwell, MA : Springer; Distributed in North, Central and South America by Springer. xv, 369 p, 2005.
- [65] Forsyth, P. J. E., *The Physical Basis of Metal Fatigue*, New York; American Elsevier Pub. Co. vii, 200 p., 1969.
- [66] Meyn, D. A., Webb, T. W. and Aifantis, E. C., Hydrogen – assisted cracking studies of 4340 steel by using the optical method of caustics, *Engineering Fracture Mechanics* 33 (6): 913 - 925, 1989.
- [67] Narasimhan, R., Rosakis, A. J. and Moran, B., A three – dimensional numerical investigation of fracture initiation by ductile failure mechanisms in a 4340 steel, *International Journal of Fracture* 56 (1) : 1 - 24, 1992.
- [68] Kumar, A. M. and Hirth, J. P., Mixed – mode I/III fracture testing, *Scripta Metallurgica et Materialia* 25 (5): 985 - 990, 1991.
- [69] Manoharan, M., Development of a mixed – mode fracture mechanism map and its extension to mixed – mode fracture, In Proceedings : Recent advances in fracture, *Metals and Materials Society*, pp. 373 - 384, 1997.
- [70] Mahgoub, E., Deng, X. and Sutton, M. A., Three – dimensional stress and deformation fields around flat and slant cracks under remote Mode I loading conditions, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (18): 2527 - 2542, 2003.

- [71] James, M. A. and Newman Jr., J. C., The effect of crack tunneling on crack growth : experiments and CTOA analyses, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (3 - 4): 457 - 468, 2003.
- [72] Sumi, Y., Mohri, M. and Kawamura, W., Computational prediction of fatigue crack paths in ship structural details, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 28 (1 - 2): 107 - 115, 2005.
- [73] Zuidema, J. and Blaauw, H. S., Slant fatigue crack growth in Al 2024 sheet material, *Engineering Fracture Mechanics* 29 (4): 401 - 413, 1988.
- [74] Zuidema, J., van Kranenburg, C., Riemsdag, A. C., Veer, F. and Boljanovic, S., Anomalous fatigue crack growth behaviour in AA 2024 and AA 5083, In : *Proceedings of 3rd International Conference on Materials Structures and Micromechanics of Fracture*, Brno, 579 - 594, 2001.
- [75] Rickerby, D. G. and Fenici, P., Fatigue crack growth in thin section type 316 stainless steel, *Engineering Fracture Mechanics* 19 (4): 585 - 599, 1984.
- [76] Zehnder, A. T., Viz, M. J. and Potdar, Y., Fatigue fracture in plates in tension and out-of-plane shear, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 23 (5): 401 - 413, 2000.
- [77] Richard, H. A., Fulland, M. and Sander, M., Theoretical crack path prediction, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 28 (1 - 2): 3 - 12, 2005.
- [78] Bouchaud, E., Scaling properties of cracks, *Journal of Physics* 9 (21): 4319 - 4344, 1997.