



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΠΜΣ: ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΚΑΥΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΛΩΛΑΚΟΣ Θ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΠΜΣ: ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΚΑΥΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ΛΩΛΑΚΟΣ Θ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΒΑΔΑΛΟΥΚΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΠΜΣ: ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΚΑΥΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΚΡΑΜΑΤΑ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΛΩΛΑΚΟΣ Θ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Βαδαλούκα Βασιλική, Επ. Καθηγήτρια Σχολής
Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Τομέας Μηχανικής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/...../.....

1^ο Μέλος:.....,.....,.....

2^ο Μέλος:.....,.....,.....

3^ο Μέλος:.....,.....,.....

(Ονοματεπώνυμο Μέλους, Ιδιότητα, Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

Ευχαριστίες

Για την περάτωση της διπλωματικής εργασίας, πέραν της προσωπικής προσπάθειας που κατεβλήθη καθ'όλη τη διάρκεια της ακόλουθης μελέτης, βασικό ρόλο στη διαμόρφωση της τελικής εργασίας διαδραμάτισαν διάφοροι άνθρωποι, οι οποίοι με την προσφορά και τη βοήθειά τους διευκόλυναν και υποστήριξαν σημαντικά το έργο μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του ΔΠΜΣ «Εφαρμοσμένη Μηχανική», και κυρίως την επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Βαδαλούκα Βασιλική για την εμπιστοσύνη της και την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν στον ομότιμο καθηγητή κ. Παπαδόπουλο Γεώργιο, ο οποίος με συνέπεια ήταν πάντα παρών προκειμένου με τις συμβολές και την πολύτιμη εμπειρία του να διευκολύνει στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συνεργείο ελασματουργών του Κρατικού Εργοστασίου Αεροπορίας (ΚΕΑ). Πρόκειται για άτομα με πλήρη επαγγελματική συνείδηση και βαθιά γνώση του αντικειμένου τους την οποία δεν δίστασαν να μοιραστούν μαζί μου. Δίχως την υποστήριξη και την αφιέρωση προσωπικού τους χρόνου, η κατασκευή των δοκιμών της παρούσας εργασίας θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Υπσγό (ΜΕ) Γκενεράλη Ιωάννη για τις πληροφορίες και συμβουλές που μου παρείχε κατά την ανάπτυξη της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει εξ αρχής, καθώς και όσους στάθηκαν δίπλα μου κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Σε όλους αυτούς, καθώς και σε όσους παρέλειψα να αναφέρω αφιερώνεται αυτή η εργασία.

Περίληψη

Οι ρωγμές αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την ακεραιότητα μιας κατασκευής και γι αυτό το λόγο έχουν απασχολήσει τους μηχανικούς. Ο υπολογισμός του εντατικού πεδίου γύρω από τέτοιες περιοχές είναι ιδιαίτερα δύσκολος και επιτυγχάνεται είτε με θεωρητικές μεθόδους είτε πειραματικά. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η εφαρμογή της Μεθόδου των Καυστικών για τον υπολογισμό του Συντελεστής Έντασης Τάσεων σε κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές κατασκευές.

Τονίζεται ότι η Μέθοδος των Καυστικών κρίνεται ως η μόνη ενδεδειγμένη μέθοδος για την ικανοποιητική παρακολούθηση των απότομων μεταβολών του εντατικού πεδίου και διανομής των τάσεων σε μια περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής. Η εργασία διαμορφώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μια αναδρομή σε κατασκευές, όπως πλοία, διαστημόπλοια και αεροπλάνα, των οποίων η αστοχία προήλθε από κάποιου είδους ρωγμή. Στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρεται ο αντικειμενικός σκοπός της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται βασικές έννοιες της Μηχανικής των Θραύσεων. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να αποκτήσει ο αναγνώστης μια σφαιρική εικόνα σχετικά με τους τύπους των ρωγμών, τους μηχανισμούς διάδοσής τους και τις αρχές που διέπουν την Θραυστομηχανική.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται οι Οπτικές Μέθοδοι Ανάλυσης των τάσεων δίνοντας έμφαση στην Μέθοδο των Καυστικών. Ακολουθώντας, παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης μεθόδου καθώς και μιας παραλλαγής της Μεθόδου των Παράλληλων Ελατηρίων η οποία εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την θεωρητική και πειραματική επίλυση τους πειράματος. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται μια ανακεφαλαίωση της εργασίας και γίνονται προτάσεις για τον μελλοντικό ερευνητή.

Αναφέρεται ότι, για την διευκόλυνση του αναγνώστη, μετά το τελευταίο κεφάλαιο ακολουθούν κάποια χρήσιμα παραρτήματα, σχετικά με τις βασικές εξισώσεις που διέπουν την Μηχανική του Παραμορφώσιμου Σώματος και τα χαρακτηριστικά των υλικών που επιλέχθηκαν, τα οποία κρίθηκε σκόπιμο να τοποθετηθούν στο τέλος προκειμένου να μην χαλάσουν την συνοχή της εργασίας.

Abstract

The cracks play decisive role for the integrity of a structure. This is the reason, why engineers study the field of stress round the corner of crack. The purpose of this diploma thesis, is to compute the Stress Intensity Factor, using the Method of Caustics for alloys of aluminum which are used in aeronautical structures.

It is emphasized that the Method of Caustics is the only one experiment method which compute adequately the field of stress round the corner of a crack. The thesis consists of five chapters:

The 1st Chapter, refers some famous structures, such as planes, space crafts and airplanes which collapsed due to cracks. Furthermore, it is introduced the purpose of this thesis.

The 2nd Chapter, introduces the basic theories and concepts which rule the Mechanic of Fractures.

The 3rd Chapter, includes the most important Optical Methods which are used to determine the Stress Intensity Factor. Most emphasis is given to Method of Caustics. For this reason, there are introduced the equations which describe this method. Furthermore, it is described a new experimental method, which will allow us to determine the Stress Intensity Factor for the aluminum alloys.

The 4th Chapter, includes the results of the theoretical and the experimental methods. At the end, there are introduced some useful conclusions.

The 5th Chapter, consists of a quick review of this thesis and some of the author's suggestions for the future researcher.

Finally, there are some helpful Annexes, which include the basic ideas of Material Mechanics and the properties of chosen materials, so that they do not interfere with the flow of thesis and spoil the consistency.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος Εικόνων	xv
Κατάλογος Πινάκων	xviii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή	1
1.2 Διάσημες Αστοχίες Κατασκευών	1
1.2.1 Τα πλοία LIBERTY	1
1.2.2 Aloha Airlines Flight 243	2
1.2.3 Διαστημόπλοιο Challenger	5
1.3 Σκοπός Διπλωματικής.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Αρχές της Δημιουργίας και Διάδοσης των Ρωγμών	9
2.2.1 Τύποι ρωγμών.....	10
2.2.2 Μηχανισμοί Διάδοσης Ρωγμής	10
2.3 Η Έννοια της Θραύσης και οι Κατηγορίες της	13
2.3.1 Όλκιμη Θραύση	14
2.3.2 Ψαθυρή Θραύση	16

2.4	Αρχές Θραυστομηχανικής.....	17
2.4.1	Συντελεστής Συγκέντρωσης Τάσεων (Stress Concentration Factor).....	17
2.4.2	Η θεωρία του Griffith για την Ψαθυρή Θραύση.....	20
2.4.3	Ανάλυση Τάσεων στις Ρωγμές.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ.....		33
3.1	Εισαγωγή.....	33
3.2	Η Οπτική Μέθοδος της Φωτοελαστικότητας.....	34
3.3	Η Οπτική Μέθοδος των Ισοπαχών.....	37
3.4	Η Συμβολομετρία (Moire).....	38
3.5	Η Ολογραφία.....	39
3.5.1	Περιγραφή Μεθόδου.....	39
3.5.2	Διάταξη Ολογραφίας.....	40
3.6	Η Μέθοδος των Καυστικών.....	41
3.6.1	Εισαγωγή.....	41
3.6.2	Θεωρία Μεθόδου των Καυστικών.....	42
3.6.3	Η Μέθοδος των Παράλληλων Ελατηρίων.....	64
4.1	Εισαγωγή.....	69
4.2	Κατασκευή Δοκιμίων.....	69
4.3	Πειραματική Διάταξη.....	72

4.4	Πειραματικά Αποτελέσματα.....	74
4.5	Θεωρητική Επίλυση	77
4.6	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	78
4.6.1	Δοκίμιο Aluminum 2024-T3 (πάχους 0.75 mm) –Plexiglas.....	79
4.6.2	Δοκίμιο Aluminum 2024-T3 (πάχους 1 mm) –Plexiglas.....	82
4.6.3	Δοκίμιο Aluminum 2024-O (πάχους 1 mm) –Plexiglas	85
4.6.4	Δοκίμιο Aluminum 7075-T6 (πάχους 0.6 mm) –Plexiglas.....	88
4.6.5	Δοκίμιο Aluminum 7075-T6 (πάχους 1.5 mm) –Plexiglas.....	91
4.6.6	Aluminum 7075-T6 (πάχους 1.75 mm) -Plexiglas	94
4.6.7	Δοκίμιο Aluminum 7075-O (πάχους 1.25 mm) -Plexiglas.....	97
4.7	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο ΕΠΙΛΟΓΟΣ		103
Παραρτήματα		105
Παράρτημα Α		105
A.1	Εισαγωγή	105
A.2	Διαφορικές Εξισώσεις Ισορροπίας	105
A.3	Εξισώσεις Συμβιβαστού των Παραμορφώσεων	106
A.4	Ο φυσικός Νόμος (Νόμος Hooke)	106
A.5	Τασική Συνάρτηση Airy	107

Παράρτημα Β	109
Β.1 Αλουμίνιο και τα Κράματα του	109
Β.2 Κράματα Διαμόρφωσης (Wrought Alloys)	110
Β.3 Κράματα Χύτευσης (Casting Alloys)	117
Βιβλιογραφία	123

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Το πλοίο Schenectady T2 στο λιμάνι του Portland	2
Εικόνα 2 Το Boeing 737	3
Εικόνα 3 Το Α/Φ Boeing 737 της πτήσης 243	4
Εικόνα 4 Η δομική διάταξη του σημείου που αποκολλήθηκε	5
Εικόνα 5 Το διαστημόπλοιο Τσάλεντζερ κατά την απογείωση	5
Εικόνα 6 Η έκρηξη του διαστημόπλοιου Τσάλεντζερ 73" μετά την απογείωση.....	6
Εικόνα 7 Μηχανισμοί διάδοσης ρωγμής.....	12
Εικόνα 8 Όλκιμη (Ισχυρά – Μέτρια) και Ψαθυρή Θραύση	14
Εικόνα 9 Στάδια της Μέτρια Όλκιμης Θραύσης	15
Εικόνα 10 Θραύση τύπου κυπέλλου - κώνου σε Αλουμίνιο	16
Εικόνα 11 Ψαθυρή θραύση σε Χάλυβα μέτριας περιεκτικότητας σε άνθρακα	16
Εικόνα 12 Κατανομή τάσης σε ελλειπτική ρωγμή.....	18
Εικόνα 13 Τύποι παραμόρφωσης ρωγμής.....	22
Εικόνα 14 Μεταφορά του συστήματος αξόνων στο άκρο της ρωγμής.....	28
Εικόνα 15 Τασικό πεδίο γύρω από το άκρο της ρωγμής.....	29
Εικόνα 16 Μεταβολή του K_{IC} συναρτήσει του πάχους.....	32
Εικόνα 17 Το φαινόμενο της διάθλασης	35
Εικόνα 18 Το φαινόμενο της διπλοδιάθλασης	35
Εικόνα 19 Σχηματική απεικόνιση της διπλοδιάθλασης	36
Εικόνα 20 Το φαινόμενο της φωτοελαστικότητας κατά τον εφελκυσμό	37

Εικόνα 21 Πειραματική διάταξη του πειράματος της φωτοελαστικότητας	37
Εικόνα 22 Κάθετα πλέγματα κατά τον εφελκυσμό	39
Εικόνα 23 Ίσα πλέγματα υπό κλίση.....	39
Εικόνα 24 Πειραματική Διάταξη για δημιουργία ολογράμματος.....	41
Εικόνα 25 Απεικόνιση Ολογράμματος.....	41
Εικόνα 26 Διαδοχικές Ανακλάσεις - Διαθλάσεις.....	43
Εικόνα 27 Οπτικός Δρόμος φωτεινής ακτίνας	44
Εικόνα 28 Διάταξη πλάκας με ρωγμή και πετάσματος αναφοράς	50
Εικόνα 29 Γεωμετρική Σχεδία Καυστικής.....	63
Εικόνα 30 Γεωμετρικά Στοιχεία Καυστικών	63
Εικόνα 31 Διάταξη Παράλληλων Ελατηρίων	64
Εικόνα 32 Αντικατάσταση Ελατηρίων με Δοκίμια	65
Εικόνα 33 Δοκίμια Αλουμινίου και Plexiglas	70
Εικόνα 34 Τρίψιμο Περιοχής Κόλλησης Με Υαλόχαρτο	70
Εικόνα 35 Καθαρισμός Περιοχής και Τοποθέτηση Κόλλας	71
Εικόνα 36 Πιστόλι Αέρος για τη Δημιουργία Οπών	71
Εικόνα 37 Δημιουργία Οπών για τοποθέτηση Ήλων.....	72
Εικόνα 38 Διάταξη για Λήψη Καυστικών	72
Εικόνα 39 (α) Συγκλίνων οπτικός φακός (β) Πηγή Φωτός-Laser με Ειδικό Φίλτρο (γ) Πέτασμα Αναφοράς	73
Εικόνα 40 Δοκίμιο σε Εφελκυστική Καταπόνηση	75
Εικόνα 41 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 0.75 mm)....	81

Εικόνα 42 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 1 mm).....	84
Εικόνα 43 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 2024-O (πάχους 1 mm).....	87
Εικόνα 44 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 0.6 mm).....	90
Εικόνα 45 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.5 mm).....	93
Εικόνα 46 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.75 mm)....	96
Εικόνα 47 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-O (πάχους 1.25 mm).....	99
Εικόνα 47 Πειραματικές Καμπύλες Κραμάτων Αλουμινίου 2024.....	100
Εικόνα 48 Πειραματικές Καμπύλες Κραμάτων Αλουμινίου 7075.....	101
Εικόνα 49 Πειραματικές Καμπύλες Κραμάτων Αλουμινίου 2024 και 7075	102
Εικόνα 50 Λήψη Καυστικής Επηρεασμένη από Σκέδαση.....	103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τασεοπτικές Σταθερές του πλαστικού Plexiglas	74
Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 0.75 mm)	79
Πίνακας 3 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 0.75 mm)	80
Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 1 mm)	82
Πίνακας 5 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 1 mm)	83
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 2024-O (πάχους 1 mm)	85
Πίνακας 7 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 2024-O (πάχους 1 mm)	86
Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 0.6 mm)	88
Πίνακας 9 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 0.6 mm)	89
Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.5 mm)	91
Πίνακας 11 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.5 mm)	92
Πίνακας 12 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.75 mm)	94
Πίνακας 13 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.75 mm)	95
Πίνακας 14 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 7075-O (πάχους 1.25 mm)	97
Πίνακας 15 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-O (πάχους 1.25 mm)	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η δημιουργία κατασκευών οι οποίες προκαλούν το δέος των ανθρώπων εντοπίζεται από την εποχή του Ηροδότου. Στα έργα του, εκθειάζει τα έργα των Αιγυπτίων που τα θεωρεί πολύ μεγαλύτερα σε μέγεθος από όλα τα έργα των Ελλήνων μαζί, όπως για παράδειγμα την πυραμίδα του Χέοπα, την πυραμίδα του Χεφρήνου και την πυραμίδα του Μυκερίνου. Στη Λυδία αναφέρει τον τάφο του Αλυάτη. Στη Βαβυλώνα αναφέρει τα τείχη και την γενικότερη διάταξή της, το ιερό του Βήλου (Μαρδούκ), το φράγμα στον Ευφράτη της βασίλισσας Σεμιραμίδος, τη γέφυρα στη Βαβυλώνα που έχτισε η βασίλισσα Νίτωκρης.

Όπως είναι προφανές, οι τελευταίοι αιώνες είναι αδύνατο να μην έχουν να παρουσιάσουν αντίστοιχα κατασκευές οι οποίες προκαλούν θαυμασμό στον άνθρωπο. Η ανάπτυξη σε διάφορους τομείς της επιστήμης οδήγησε στην δημιουργία αεροπλάνων, διαστημόπλοιων, μεγαλύτερων πλοίων. Ωστόσο, ορισμένες κατασκευές δεν είναι διάσημες για την άμεση προσφορά τους στον άνθρωπο.

1.2 Διάσημες Αστοχίες Κατασκευών

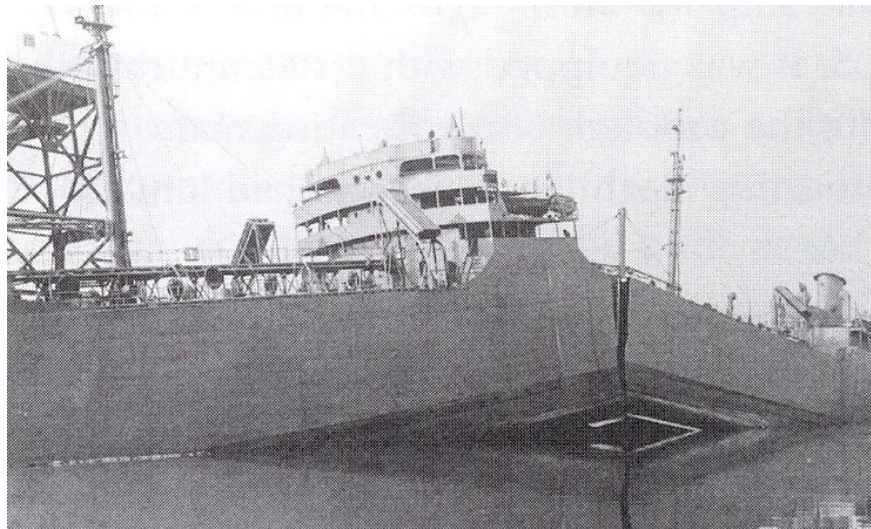
1.2.1 Τα πλοία LIBERTY

Στη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, και συγκεκριμένα μεταξύ των ετών 1941-1945, κατασκευάστηκαν σε 18 ναυπηγεία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής σε χρόνο-ρεκόρ 2.711 φορτηγά πλοία μεταφορικής ικανότητας 10.000 τόνων περίπου το καθένα. Τα πλοία αυτά έγιναν γνωστά με την κωδική ονομασία Liberty. Η κατασκευή κάθε πλοίου κόστισε από 1.550.000 έως 2.100.000 δολάρια, ανάλογα με το ναυπηγείο που το κατασκεύασε.

Η πρωτοβουλία για την κατασκευή τους οφείλεται στις συνεχείς απώλειες πλοίων των Συμμαχικών Δυνάμεων που συμμετείχαν στις νηοπομπές του Ατλαντικού, μεταφέροντας πολύτιμα εφόδια απαραίτητα για την επιτυχή έκβαση του Πολέμου. Η ανάγκη για ταχεία

αντικατάσταση των απολεσθέντων πλοίων οδήγησε στην υιοθέτηση της ναυπήγησης με τη μέθοδο της ηλεκτροσυγκόλλησης. Επρόκειτο για μια μέθοδο που χρησιμοποιούνταν ελάχιστα την εποχή εκείνη, όπου σχεδόν όλα τα πλοία κατασκευάζονταν με τον παραδοσιακό τρόπο του καρφώματος.

Αναφέρεται ότι, από τα 2.711 πλοία που κατασκευάστηκαν, περίπου 400 υπέστησαν θραύση, 20 καταστράφηκαν ολοσχερώς και 10 κόπηκαν στην μέση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Schenectady T2 Tanker το οποίο βυθίστηκε στις 16 Ιανουαρίου 1943 στο λιμάνι του Portland.



Εικόνα 1 Το πλοίο Schenectady T2 στο λιμάνι του Portland

1.2.2 Aloha Airlines Flight 243

Το Boeing 737, είναι επιβατηγό αεροσκάφος στενής ατράκτου. Το αεροσκάφος αυτό κατασκευάζεται χωρίς διακοπή από το 1967 στα εργοστάσια της εταιρείας Boeing Commercial Airplanes. Συνολικά υπάρχουν 10.444 τέτοια αεροσκάφη, τα οποία εκτελούν διάφορα δρομολόγια σε τοπικές και διεθνείς πτήσεις. Ακόμη, το αεροσκάφος αυτό, είναι το δημοφιλέστερο επιβατικό αεροσκάφος μέσων αποστάσεων - στενής ατράκτου στον κόσμο. Με περίπου 4.478 αεροσκάφη να έχουν παραγγελθεί και 9.486 να έχουν παραδοθεί σε αεροπορικές εταιρείες, αποτελεί το πιο διαδεδομένο αεροσκάφος τζετ που έχει βγει ποτέ στην παραγωγή. Κάθε στιγμή υπάρχουν περίπου 1.250 αεροσκάφη 737 κάθε τύπου στον

αέρα παγκοσμίως. Κατά μέσο όρο, ένα Boeing 737 απογειώνεται κάθε πέντε δευτερόλεπτα.



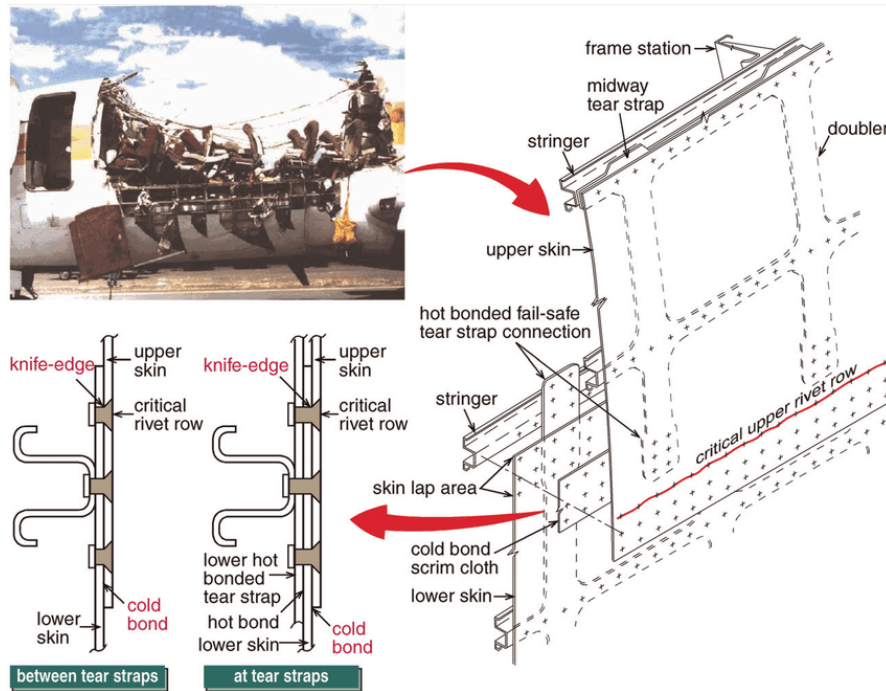
Εικόνα 2 Το Boeing 737

Ωστόσο, το συγκεκριμένο αεροσκάφος είναι γνωστό και για ακόμα ένα λόγο, την πτήση 243 των αερογραμμών Aloha. Έχοντας εκτελέσει ήδη τρεις πτήσεις εκείνη την ημέρα, το αεροσκάφος προετοιμαζόταν για την πτήση με προορισμό το Μαούι. Κατά την διαδικασία της προ πτήσεως επιθεώρησης δεν παρατηρήθηκε τίποτα ασυνήθιστο. Εντούτοις, μετά την απογείωση, την διαδικασία ανόδου και ενώ το αεροσκάφος βρισκόταν σε σταθερό ύψος πορείας, διαπιστώθηκε αποσυμπίεση της καμπίνας καθώς ένα τμήμα της ατράκτου αποκολλήθηκε. Ευτυχές είναι το γεγονός ότι οι πιλότοι κατάφεραν να προσγειώσουν το αεροσκάφος ενώ υπήρξε μια ανθρώπινη απώλεια και αρκετοί τραυματισμοί επιβατών.



Εικόνα 3 Το Α/Φ Boeing 737 της πτήσης 243

Φυσικά, το τμήμα που αποκολλήθηκε δεν ήταν τυχαίο. Επρόκειτο για ένα τμήμα του οποίο η μια πλευρά αποτελούσε σημείο ένωσης της ατράκτου. Η εταιρεία Boeing Commercial Airplanes είχε εφαρμόσει την μέθοδο, στα σημεία ένωσης της ατράκτου (lap joints) να τοποθετεί τρεις σειρές ήλων καθώς και προεμπτισμένο με ρητίνη ύφασμα. Σκοπός ήταν το μεγαλύτερο μέρος των φορτίσεων να παραλαμβάνεται από το προεμπτισμένο ύφασμα και συνεπώς να περιοριστεί το πάχος της επικάλυψης κάτι το οποίο θα μείωνε το κόστος παραγωγής.



Εικόνα 4 Η δομική διάταξη του σημείου που αποκολλήθηκε

1.2.3 Διαστημόπλοιο Challenger

Η τραγωδία του Τσάλεντζερ συνέβη στις 28 Ιανουαρίου 1986, όταν το διαστημικό λεωφορείο διαλύθηκε 73 δευτερόλεπτα μετά την εκτόξευσή του, με συνέπεια το θάνατο του επταμελούς πληρώματός του. Η καταστροφή του διαστημόπλοιου έγινε πάνω από το Ακρωτήριο Κανάβερал της Φλόριντα.



Εικόνα 5 Το διαστημόπλοιο Τσάλεντζερ κατά την απογείωση



Εικόνα 6 Η έκρηξη του διαστημόπλοιου Τσάλεντζερ 73" μετά την απογείωση

Η αιτία που διαλύθηκε το Τσάλεντζερ εξακριβώθηκε όταν περισυλήχθηκαν τα συντρίμμια του. Για την ακρίβεια, όταν το Λεωφορείο ήταν σε ύψος 15 χιλιομέτρων / 48.000 ποδιών, σημειώθηκε αποκόλληση σε δακτύλιο σφραγίσματος (O-ring) στους αγωγούς στερεών καυσίμων, η οποία προκάλεσε ρήγμα στον δεξιό πύραυλο καυσίμων, επιτρέποντας θερμό αέριο υπό πίεση από το εσωτερικό του κινητήρα του πυραύλου να διαρρεύσει έξω. Η διαρροή έσπασε την πρόσδεση που συνέδεε τον πύραυλο με την Εξωτερική Δεξαμενή Καυσίμων, με αποτέλεσμα την αποκόλλησή τους. Μετά από μία ανεξέλεγκτη τροχιά λίγων δευτερολέπτων, το Λεωφορείο καταστράφηκε από δυνάμεις αεροδυναμικής αντίστασης που αρχικά έφτασαν στα 12 έως 20 g, ενώ το όριο αντοχής του ήταν τα 5 g.

1.3 Σκοπός Διπλωματικής

Τα ατυχήματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Εντούτοις, σχετίζονται καθώς παρουσιάζουν κοινή αιτία όσον αφορά την αστοχία τους. Η ύπαρξη ρωγμών σε διάφορες κατασκευές αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους λόγους που μπορεί να αστοχήσει μια κατασκευή. Η μελέτη αυτής

της ιδιόμορφης περιοχής αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για πολλούς μηχανικούς καθώς και την αφετηρία της Μηχανικής των Θραύσεων.

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός του εντατικού πεδίου σε μια μικρή περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής για υλικά που χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθούν τα κράματα αλουμινίου 2024 και 7075 (Al 2024 και Al 7075) σε συνάρτηση με τη θερμική κατεργασία που έχουν υποστεί και το πάχος τους. Για το σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθεί η Οπτική Μέθοδος των Καυστικών, η οποία κρίνεται ως η μόνη ενδεδειγμένη για τον αντικειμενικό σκοπό που προαναφέρθηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά στις βασικές έννοιες της Μηχανικής των Θραύσεων. Η θραυστομηχανική προσέγγιση απαιτείται όταν ένα υλικό ή δομή περιέχει ένα ρωγμοειδές ελάττωμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, προσεγγίσεις οι οποίες βασίζονται μόνο σε κρίσιμη τάση ή πίεση δεν είναι επαρκείς.

Οι έννοιες της θραυστομηχανικής ασχολούνται με τις μεθόδους εκείνες οι οποίες προβλέπουν την δυνατότητα μεταφοράς φορτίου κατασκευών και εξαρτημάτων που περιέχουν ρωγμές. Η προσέγγιση της θραυστομηχανικής βασίζεται σε έναν μαθηματικό χαρακτηρισμό του πεδίου τάσης που περιβάλλει οποιαδήποτε ρωγμή σε ένα σώμα που φέρει φορτίο.

Αντικειμενικός σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να αποκτηθεί μια σφαιρική εικόνα σχετικά με:

- A) Τους τύπους των ρωγμών
- B) Τους Μηχανισμούς Διάδοσης των ρωγμών
- Γ) Την έννοια της θραύσης και οι τύποι της
- Δ) Αρχές της Θραυστομηχανικής

2.2 Αρχές της Δημιουργίας και Διάδοσης των Ρωγμών

Ως θραύση ορίζεται η πλήρης αποκοπή ενός υλικού, η οποία προκύπτει όταν η ύπαρξη μιας ρωγμής φτάνει ένα κρίσιμο μέγεθος και υποβαθμίζει την δύναμη του υλικού κάτω από το λειτουργικό του φορτίο. Η τελική θραύση είναι συνήθως αιφνίδια αλλά γενικά προηγείται μια διαδικασία ραγίσματος που λαμβάνει χώρα με αργό ρυθμό κατά τη διάρκεια χρήσης του υλικού λόγω διαφόρων μηχανισμών όπως είναι η κόπωση, η διάβρωση και ο

ερπυσμός. Αναφέρεται ότι, κάθε μηχανισμός θραύσης έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση αστοχίας ώστε να προσδιοριστεί η δημιουργία και η ανάπτυξη των ρωγμών.

2.2.1 Τύποι ρωγμών.

Οι ρωγμές με κριτήριο το χρόνο και το μηχανισμό δημιουργίας τους διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

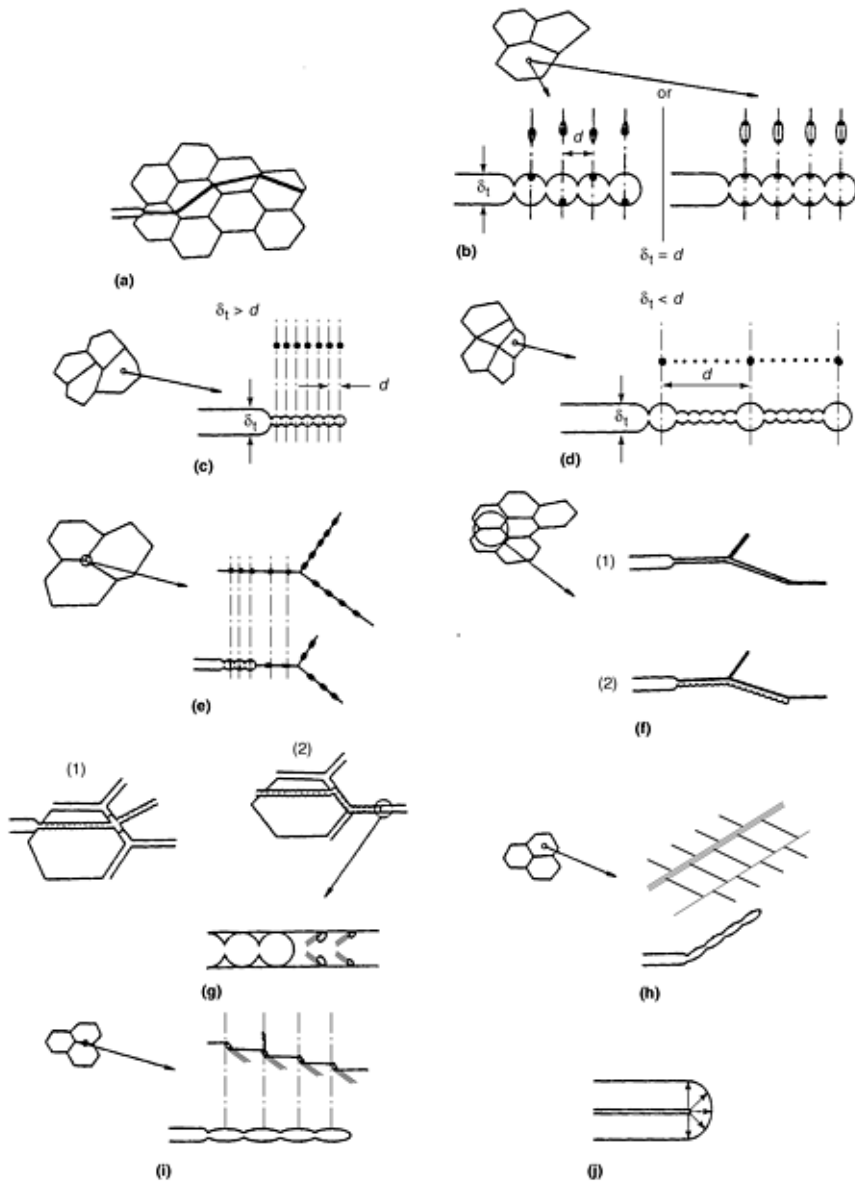
- Όλκιμη υπερφόρτωση
- Ψαθυρή υπερφόρτωση
- Κόπωση
- Διάβρωση
- Φθορά
- Ερπυσμός

2.2.2 Μηχανισμοί Διάδοσης Ρωγμής

Προσεγγίζοντας μικροσκοπικά μια ρωγμή, οι Μηχανισμοί Διάδοσης της (Εικόνα 7) είναι οι ακόλουθοι:

- Διάδοση ρωγμών διάσπασης
- Κοίλη ρωγμή λόγω τραχειών σωματιδίων
- Κοίλη ρωγμή λόγω λεπτών σωματιδίων
- Κοίλη ρωγμή λόγω τραχειών και λεπτών σωματιδίων
- Διακρυσταλλική διάδοση ρωγμής

- Διακρυσταλλική διάδοση ρωγμής
- Διάδοση παρουσία συνοριακού φιλμ μαλακής φάσης
- Διάδοση ρωγμής επιφανειών ολίσθησης/διασταύρωσης επιφανειών ολίσθησης
- Διάδοση ρωγμής επιφανειών ολίσθησης/διασταύρωσης συνόρων κόκκων
- Διάδοση ρωγμής μόνο με πλαστική άμβλυνση



Εικόνα 7 Μηχανισμοί διάδοσης ρωγμής

(α) Διάδοση ρωγμών διάσπασης (β) Κοίλη ρωγμή λόγω τραχειών σωματιδίων (γ) Κοίλη ρωγμή λόγω λεπτών σωματιδίων (δ) Κοίλη ρωγμή λόγω τραχειών και λεπτών σωματιδίων (ε) Διακρυσταλλική διάδοση ρωγμής (φ) Διακρυσταλλική διάδοση ρωγμής (γ) Διάδοση παρουσία συνοριακού φιλμ μαλακής φάσης (η) Διάδοση ρωγμής επιφανειών ολίσθησης/διασταύρωσης επιφανειών ολίσθησης (ι) Διάδοση ρωγμής επιφανειών ολίσθησης/διασταύρωσης συνόρων κόκκων (j) Διάδοση ρωγμής μόνο με πλαστική άμβλυση

2.3 Η Έννοια της Θραύσης και οι Κατηγορίες της

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ως απλή θραύση αναφέρεται ο διαχωρισμός ενός σώματος σε δύο ή περισσότερα τμήματα, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα μιας επιβαλλόμενης στατικής τάσης (σταθερής ή πολύ αργά μεταβαλλόμενης με τον χρόνο) σε θερμοκρασίες χαμηλές σε σχέση με την θερμοκρασία τήξης του υλικού. Η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να είναι εφελκυστική, θλιπτική, διατμητική ή στρεπτική. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα περιορισθεί σε θραύσεις που προκύπτουν από μονοαξονικά εφελκυστικά φορτία.

Οι τύποι θραύσης που συναντά ο μηχανικός είναι δυο: ο όλκιμος και ο ψαθυρός. Η ειδοποιός διαφορά εντοπίζεται στην ικανότητα του υλικού να εμφανίσει πλαστική παραμόρφωση. Τα όλκιμα υλικά επιδεικνύουν σημαντική πλαστική παραμόρφωση με μεγάλη απορρόφηση ενέργειας πριν από την θραύση. Αντιθέτως, η ψαθυρή θραύση συνοδεύεται συνήθως από ελάχιστη ή μηδενική πλαστική παραμόρφωση, με μικρή απορρόφηση ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, χαρακτηριστικό γνώρισμα της όλκιμης θραύσης, η οποία εμφανίζει εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της αναπτυσσόμενης ρωγμής, είναι ότι η διαδικασία εξέλιξης της είναι σχετικά αργή όσο το μήκος της ρωγμής είναι εκτενές. Αυτού του είδους η ρωγμή αναφέρεται συχνά ως σταθερή. Δηλαδή, ανθίσταται στην περαιτέρω διάδοση εκτός αν λάβει χώρα αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Από την άλλη μεριά, στην ψαθυρή θραύση, οι ρωγμές διαδίδονται υπερβολικά γρήγορα, ενώ συνοδεύονται από πολύ μικρή πλαστική παραμόρφωση. Αυτού του είδους οι ρωγμές αναφέρονται ως ασταθείς, και η διάδοση της ρωγμής, από τη στιγμή που ξεκινήσει, συνεχίζεται αυθόρμητα χωρίς αύξηση του μεγέθους της εφαρμοζόμενης τάσης.

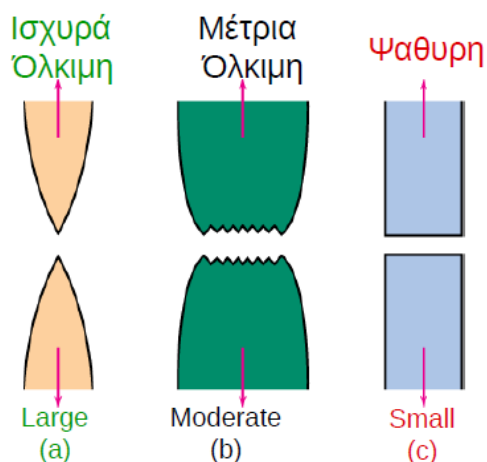
Συνεπώς, καθίσταται προφανές γιατί η όλκιμη θραύση προτιμάται σχεδόν σε όλες τις κατασκευές, όπως τις αεροπορικές. Πρώτον, διότι η ψαθυρή θραύση εμφανίζεται ξαφνικά και καταστροφικά χωρίς καμία προειδοποίηση σε αντίθεση με την όλκιμη, η οποία εμφανίζοντας πλαστική παραμόρφωση προειδοποιεί ότι επίκειται θραύση, επιτρέποντας τον χρήστη να λάβει αποτρεπτικά μέτρα. Δεύτερον, για το λόγο ότι απαιτείται περισσότερη ενέργεια παραμόρφωσης προκειμένου να προκληθεί όλκιμη θραύση, καθόσον τα όλκιμα

υλικά είναι εν γένει περισσότερο δύσθραυστα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, κάτω από την επίδραση μιας εφαρμοζόμενης εφελκυστικής τάσης, τα περισσότερα μεταλλικά κράματα είναι όλκιμα, τα κεραμικά ιδιαίτερα ψαθυρά ενώ τα πολυμερή μπορούν να ενταχθούν και στους δυο τύπους θραύσης.

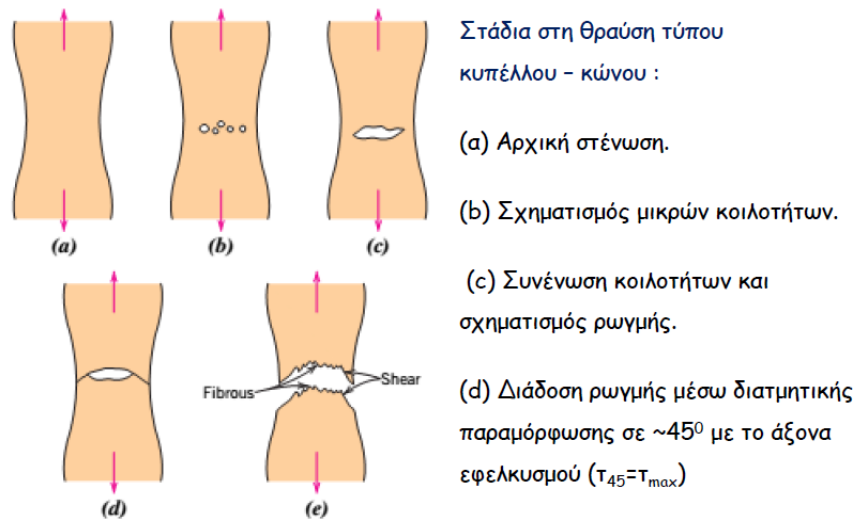
2.3.1 Όλκιμη Θραύση

Οι επιφάνειες όλκιμης θραύσης παρουσιάζουν τα δικά τους χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Η Εικόνα 8 δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση δύο χαρακτηριστικών μακροσκοπικών μετώπων θραύσης. Η διαμόρφωση που απεικονίζεται στο σχήμα 8(α) απαντάται στα ιδιαίτερα μαλακά μέταλλα, όπως ο καθαρός χρυσός σε θερμοκρασία δωματίου, και σε άλλα μέταλλα, πολυμερή και ανόργανους υάλους σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτά τα πολύ όλκιμα σχηματίζουν «λαιμό» (στένωση) που φθάνει ως την δημιουργία σημείου θραύσης, επιδεικνύοντας ουσιαστικά 100% μείωση εμβαδού επιφανείας.

Εντούτοις, η πιο συνηθισμένη μορφή μετώπων θραύσης από εφελκυσμό σε όλκιμα υλικά είναι αυτή που αναπαρίσταται στο σχήμα 8(β), της θραύσης όπου έχει προηγηθεί της θραύσης με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μετρίου μεγέθους «λαιμού».



Εικόνα 8 Όλκιμη (Ισχυρά – Μέτρια) και Ψαθυρή Θραύση



Εικόνα 9 Στάδια της Μέτρια Όλκιμης Θραύσης

Η διαδικασία της μέτρια όλκιμης θραύσης, εμφανίζεται κατά κανόνα σε διάφορα στάδια όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 9. Αναλυτικότερα,

- Πρώτον, μετά την έναρξη της δημιουργίας «λαιμού» 9(a), μικρές κοιλοότητες ή μικροκενά, σχηματίζονται στο εσωτερικό 9(b).
- Εν συνεχεία, καθώς η παραμόρφωση συνεχίζεται, αυτά τα μικροκενά μεγεθύνονται, πλησιάζουν και συνενώνονται σχηματίζοντας μια ελλειπτική ρωγμή, η οποία έχει τον μεγάλο άξονά της κάθετο στην διεύθυνση της τάσης 9(c).
- Η ρωγμή συνεχίζει να μεγαλώνει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον μεγάλο άξονά της μέσω της διαδικασίας συνένωσης των μικροκενών 9(d).
- Τελικά, η θραύση επέρχεται λόγω της γρήγορης διάδοσης μιας ρωγμής γύρω από την εξωτερική περίμετρο του «λαιμού», μέσω διατμητικής παραμόρφωσης σε γωνία περίπου 45° με τον άξονα εφελκυσμού 9(e)- αυτή είναι η γωνία κατά την οποία η διατμητική τάση γίνεται μέγιστη.

Η θραύση αυτού του τύπου συχνά αποκαλείται θραύση τύπου κυπέλλου – κώνου (Εικόνα 10), καθώς η μια από τις επιφάνειες σύζευξης έχει την μορφή κυπέλλου και η άλλη ομοιάζει με κώνο. Χαρακτηριστικό στοιχείο σε ένα θραυσμένο δοκίμιο αυτού του είδους,

είναι ότι το κεντρικό εσωτερικό τμήμα της επιφάνειας έχει ακανόνιστη και ινώδη όψη, που είναι ενδεικτική της πλαστικής παραμόρφωσης.



Εικόνα 10 Θραύση τύπου κυπέλλου - κώνου σε Αλουμίνιο



Εικόνα 11 Ψαθυρή θραύση σε Χάλυβα μέτριας περιεκτικότητας σε άνθρακα

2.3.2 Ψαθυρή Θραύση

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ψαθυρής θραύσης είναι η ελάχιστη πλαστική παραμόρφωση καθώς και η γρήγορη διάδοση της ρωγμής. Η διεύθυνση κίνησης της ρωγμής είναι σχεδόν κάθετη στην διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης δημιουργώντας μία σχετικά επίπεδη επιφάνεια θραύσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.

Οι επιφάνειες θραύσης υλικών που αστόχησαν με ψαθυρό τρόπο παρουσιάζουν τα δικά τους χαρακτηριστικά γνωρ. Αναφέρεται ότι, στα πολύ σκληρά και λεπτό-κοκκα μέταλλα, δεν παρουσιάζονται ευδιάκριτα σχέδια στις επιφάνειες θραύσης. Αντίθετα, στα

άμορφα υλικά, όπως και οι κεραμικοί ύαλοι, παρατηρούνται σχετικά γυαλιστερές και λείες επιφάνειες.

Τέλος, μελετώντας μικροσκοπικά ψαθυρά κρυσταλλικά υλικά, παρατηρείται ότι η διάδοση των ρωγμών πραγματοποιείται με διαδοχικό και επαναλαμβανόμενο σπάσιμο ατομικών δεσμών κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων (σχισμός) και γι αυτό ο τύπος θραύσης αποκαλείται ενδοκοκκώδης (ή ενδοκρυσταλλικός).

2.4 Αρχές Θραυστομηχανικής

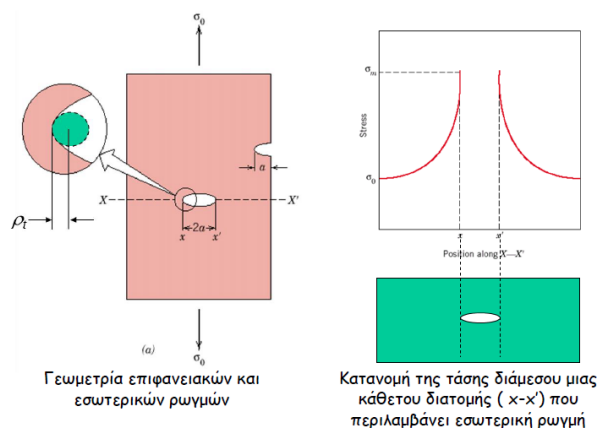
2.4.1 Συντελεστής Συγκέντρωσης Τάσεων (Stress Concentration Factor)

Η αντοχή σε θραύση ενός στερεού υλικού είναι συνάρτηση των συνεκτικών δυνάμεων που υφίστανται μεταξύ των ατόμων. Σε αυτή την βάση, η θεωρητική συνεκτική αντοχή ενός ψαθυρού ελαστικού στερεού έχει υπολογισθεί ότι είναι περίπου ίση με $E/10$, όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Οι πειραματικές τιμές της αντοχής σε θραύση των περισσότερων υλικών του μηχανικού κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10 και 1000 φορές κάτω από την θεωρητική τιμή.

Την δεκαετία του 1920 ο A. A. Griffith πρότεινε πως η ασυμφωνία μεταξύ της θεωρητικής και της παρατηρούμενης αντοχής σε θραύση οφείλεται στην παρουσία πολύ μικρών, μικροσκοπικών ατελειών ή ρωγμών, που εντοπίζονται είτε στην επιφάνεια είτε στο εσωτερικό του σώματος των υλικών. Για τις ατέλειες αυτές, ο Griffith χρησιμοποίησε την θεώρηση ότι τα άκρα της ρωγμής είναι στρογγυλά με ακτία καμπυλότητας της τάξεως της μοριακής απόστασης, γεγονός το οποίο αφενός τον οδήγησε σε απειρισμό των τάσεων παρά τα άκρα της ρωγμής ωστόσο είναι μη αποδεκτό στη Μηχανική των Συνεχών Μέσων.

Συνεπώς, όπως γίνεται αντιληπτό, οι ατέλειες αυτές έχοντας την ιδιότητα να ενισχύουν ή να συγκεντρώνουν στο άκρο τους μια εφαρμοζόμενη τάση, μπορούν να αποτελέσουν καθοριστικό ρόλο για την ακεραιότητας του υλικού. Ο προσανατολισμός και η γεωμετρία της ατέλειας είναι αυτές που καθορίζουν το μέγεθος της ενίσχυσης.

Στην Εικόνα 12, παρουσιάζεται η κατανομή της τάσης διαμέσου μιας διατομής που περιλαμβάνει εσωτερική ρωγμή. Όπως παρατηρείται, σε πολύ απομακρυσμένα σημεία επί του άξονα $x-x'$, η τάση ισούται με την ονομαστική τάση σ_0 , ή το εφαρμοζόμενο φορτίο διαιρούμενο με το εμβαδόν της διατομής (κάθετα στο φορτίο) του δοκιμίου. Πλησιάζοντας το άκρο της ατέλειας, η τάση αυξάνεται. Λόγω της ικανότητας τους να ενισχύουν μία εφαρμοζόμενη τάση στην περιοχή τους, οι ατέλειες αυτές αποκαλούνται μερικές φορές και ανυψωτές τάσεων.



Εικόνα 12 Κατανομή τάσης σε ελλειπτική ρωγμή

Με βάση τα ανωτέρω, ας υποθέσουμε ότι η ανωτέρα ρωγμή έχει ελλειπτικό σχήμα (ή είναι κυκλική). Τότε, η μέγιστη τάση στο άκρο της ρωγμής, σ_m είναι ίση με

$$\sigma_m = \sigma_0 \left[1 + 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2} \right] \quad (2.1)$$

Όπου,

- σ_0 είναι το μέγεθος της ονομαστικής εφελκυστικής τάσης,
- ρ_t είναι η ακτίνα καμπυλότητας της αιχμής της ρωγμής και

- α ποσότητα που αναπαριστά το μήκος επιφανειακής ρωγμής, ή το ήμισυ του μήκους μιας εσωτερικής ρωγμής.

Σε μια σχετικά μεγάλη σε μήκος μικρορωγμή, που έχει μικρή ακτίνα καμπυλότητας στο άκρο της, ο όρος $(a/\rho_t)^{1/2}$ είναι δυνατόν να πάρει πολύ μεγάλες τιμές. Τότε, η ανωτέρω εξίσωση αποκτά τη μορφή,

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{\alpha}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

Επιπροσθέτως, η τάση σ_m θα είναι πολλές φορές πολλαπλάσια της τιμής της σ_0 . Ο λόγος σ_m/σ_0 αναφέρεται ως συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων (Stress Concentration Factor) K_t :

$$K_t = \sigma_m / \sigma_0 = 2\left(\frac{\alpha}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

Συνεπώς, ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_t αποτελεί το βαθμό ενίσχυσης της ονομαστικής τάσης στο άκρο της ρωγμής. Επισημαίνεται ότι, η ενίσχυση τάσεων δεν εντοπίζεται μόνο σε μικροσκοπικές ατέλειες, αλλά και σε μακροσκοπικές όπως οπές.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, το φαινόμενο ανύψωσης τάσεων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στα ψαθυρά υλικά. Στα όλκιμα υλικά, η πλαστική παραμόρφωση επέρχεται όταν η μέγιστη τάση υπερβεί την τάση διαρροής. Αυτό οδηγεί σε μια περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή της τάσης στην περιοχή του ανυψωτή τάσης και στην ανάπτυξη ενός μέγιστου συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων μικρότερου από την θεωρητική τιμή. Στα ψαθυρά υλικά, ωστόσο δεν εμφανίζεται αυτού του είδους η διαρροή και συνεπώς, η θεωρητική συγκέντρωση τάσεων επαληθεύεται.

2.4.2 Η θεωρία του Griffith για την Ψαθυρή Θραύση

Κατά την διάδοση της ρωγμής, υφίσταται απελευθέρωση ενέργειας που ονομάζεται ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης και αποτελεί μέρος της ενέργειας που αποθηκεύτηκε στο υλικό κατά την ελαστική παραμόρφωση. Επιπλέον, κατά την διαδικασία επέκτασης της ρωγμής, δημιουργούνται νέες ελεύθερες επιφάνειες στις πλευρές της ρωγμής, γεγονός που αυξάνει την επιφανειακή ενέργεια του συστήματος.

Ο Griffith ανέπτυξε ένα κριτήριο για την διάδοση ρωγμών ελλειπτικού σχήματος εκπληρώνοντας μια συνθήκη ισορροπίας μεταξύ των δυο αυτών ενεργειών. Απέδειξε ότι η κρίσιμη τάση σ_c που απαιτείται για την διάδοση ρωγμής σε ψαθυρό υλικό δίνεται από την σχέση

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{1/2} \quad (2.2)$$

Όπου,

- E = το μέτρο ελαστικότητας
- γ_s = ειδική επιφανειακή ενέργεια
- a = το ήμισυ του μήκους εσωτερικής ρωγμής

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προηγούμενη έκφραση δεν εμπλέκει την ακτίνα ρ_t του άκρου της ρωγμής, όπως συμβαίνει με την εξίσωση συγκέντρωσης τάσεων. Παρόλα αυτά θεωρείται ότι η ακτίνα είναι αρκετά αιχμηρή (της τάξης των διατομικών αποστάσεων) έτσι ώστε να ανυψώνει την τοπική τάση στην αιχμή (της ρωγμής) πάνω από την συνεκτική αντοχή του υλικού.

Η προηγούμενη ανάπτυξη εφαρμόζεται μόνο σε πλήρως ψαθυρά υλικά, στα οποία δεν εμφανίζεται καθόλου πλαστική παραμόρφωση. Τα περισσότερα μέταλλα και πολλά πολυμερή υφίστανται κάποια πλαστική παραμόρφωση κατά την διάρκεια της θραύσης, έτσι η επέκταση της ρωγμής δεν παράγει μόνο αύξηση της επιφανειακής ενέργειας

περιπλέκοντας περισσότερο την κατάσταση. Η περιπλοκή αυτή διευθετείται με αντικατάσταση του όρου γ_s από τον όρο $\gamma_s + \gamma_p$, όπου γ_p αναπαριστά την ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης που σχετίζεται με την επέκταση της ρωγμής. Έτσι, είναι

$$\sigma_c = \left[\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi\alpha} \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

Στα ιδιαίτερα όλκιμα υλικά, μπορεί να ισχύει $\gamma_p \gg \gamma_s$ έτσι ώστε

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_p}{\pi\alpha} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

Την δεκαετία του 1950 ο G. G. Irwin επέλεξε να ενσωματώσει τους δυο όρους γ_s και γ_p σε ένα και μόνο όρο G_c ως εξής

$$G_c = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (2.5)$$

Ο όρος G_c είναι γνωστός ως κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης. Ενσωματώνοντας την εξίσωση αυτή στην εξίσωση (2.3) και μετά από κάποια επαναδιευθέτηση οδηγούμαστε σε άλλη έκφραση του κριτηρίου διάδοσης των ρωγμών του Griffith,

$$G_c = \frac{\pi\sigma^2\alpha}{E} \quad (2.6)$$

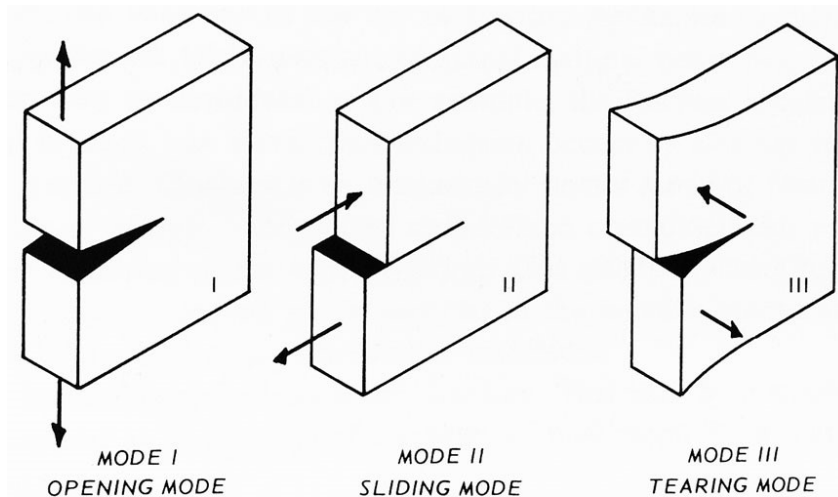
Έτσι η επέκταση της ρωγμής εμφανίζεται όταν ο όρος $\frac{\pi\sigma^2\alpha}{E}$ υπερβαίνει την τιμή G_c για το συγκεκριμένο υπό μελέτη υλικό.

2.4.3 Ανάλυση Τάσεων στις Ρωγμές

2.4.3.1 Τύποι Παραμόρφωσης της Ρωγμής

Συνεχίζοντας τη διερεύνηση της ανάπτυξης της θραυστομηχανικής, θα εξετάσουμε την κατανομή των τάσεων στην περιοχή της αιχμής μιας εξελισσόμενης ρωγμής. Πρώτος ο Irwin με την παραδοχή ότι οι ρωγμές που βρίσκονται σε ένα στερεό μπορούν να θεωρηθούν ως επιφάνειες ασυνέχειας του διανύσματος μετατόπισης, παρατήρησε ότι υπάρχουν τρεις ανεξάρτητοι τρόποι με τους οποίους μια ρωγμή μπορεί να διαδοθεί και να παραμορφωθεί μέσα σε ένα υλικό, σε σχέση με τις τάσεις που προσπαθούν να «ανοίξουν» τις πλευρικές της επιφάνειες, δηλαδή τις επιφάνειες θραύσης.

Συγκεκριμένα, οι τρόποι αυτοί έχουν κατηγοριοποιηθεί σε τρεις βασικούς τύπους, που ονομάζονται mode I, mode II και mode III και φαίνονται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13 Τύποι παραμόρφωσης ρωγμής

Συνεπώς, οποιοσδήποτε τρόπος παραμόρφωσης και εν γένει φόρτισης μιας ρωγμής μπορεί να προκύψει με επαλληλία των τριών αυτών ανεξάρτητων τύπων. Αναλυτικότερα, αναφέρεται:

Mode I: Άνοιγμα ή Εφελκυστική Φόρτιση. Στο Mode I οι πλευρικές επιφάνειες της ρωγμής τείνουν να διαχωριστούν συμμετρικά η μια από την άλλη κάτω από την επίδραση εφελκυστικής ορθής τάσης κάθετης στις επιφάνειες αυτές. Ο τρόπος I συναντάται στην

πλειοψηφία των περιπτώσεων και γι αυτό έχει λάβει πολύ μεγάλη προσοχή σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο.

Mode II: Ολίσθηση. Ο τρόπος II είναι ο λιγότερο συχνός και άρα ο λιγότερο σημαντικός από θεωρητικής και πειραματικής άποψης. Παρόλα αυτά δεν μπορεί να υποτιμηθεί και να αγνοηθεί διότι συνήθως εμφανίζεται συνδυαστικά με τον I και III. Στο mode II η διάδοση της ρωγμής γίνεται με την επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης στις πλευρικές της επιφάνειες. Ουσιαστικά, οι πλευρικές επιφάνειες της ρωγμής τείνουν να ολισθήσουν, η μια σχετικά προς την άλλη, προς αντίθετες κατευθύνσεις αλλά εντός του ίδιου επιπέδου.

Mode III: Ψαλιδισμός. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε και πάλι διατμητική τάση παράλληλη στις πλευρικές επιφάνειες, αλλά με φορά κάθετη σε σχέση με το mode II. Εδώ, οι πλευρικές επιφάνειες της ρωγμής τείνουν να διαχωριστούν προς αντίθετες εγκάρσιες κατευθύνσεις υπό την επίδραση ίσων και αντίθετων δυνάμεων, κάθετων προς το επίπεδο του σώματος. Ο τρόπος III εμφανίζεται συχνά κατά την στρέψη μιας ράβδου που φέρει ρωγμή.

2.4.3.2 Συντελεστής Έντασης Τάσης (Stress Intensity Factor)

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε μια πολύ σημαντική έννοια της Μηχανικής των Θραύσεων, τον Συντελεστή Έντασης Τάσεων (Stress Intensity Factor) K . Ο ρόλος του συντελεστή αυτού, είναι θεμελιώδης σημασίας καθώς επιτρέπει τον υπολογισμό της στατικής και δυναμικής αντοχής μιας κατασκευής η οποία φέρει μια ρωγμή.

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, αντικειμενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός του Συντελεστή Έντασης των τάσεων K μέσω της Θεωρίας των Καυστικών για κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο Συντελεστής Έντασης Τάσεων και ο Συντελεστής Συγκέντρωσης Τάσεων αν και παρόμοιοι δεν είναι ισοδύναμοι. Η ύπαρξη μιας γεωμετρικής ασυνέχειας, όπως για παράδειγμα μία οπή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιόμορφης κατανομής της τάσης κοντά στην περιοχή της ασυνέχειας. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην ασυνέχεια οι τάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερη τιμή, από ότι σε

σημεία του υλικού που βρίσκονται μακριά από την ασυνέχεια. Επομένως, στις περιοχές ασυνέχειας του υλικού εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων (stress concentration). Ο συντελεστής μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο της μέγιστης τάσης στην περιοχή της ασυνέχειας προς την επιβαλλόμενη τάση.

Από την άλλη πλευρά, κατά την περίπτωση ρωγμών χρησιμοποιείται ο συντελεστής έντασης τάσεων (stress intensity factor) προκειμένου να περιγραφεί η εντατική κατάσταση στην γύρω περιοχή.

Αρχικά, θα γίνει υπολογισμός του εντατικού πεδίου γύρω από το χείλος μιας ρωγμής και στη συνέχεια θα υπολογισθεί ο Συντελεστής Έντασης των Τάσεων για τους τρεις τύπους φόρτισης μιας ρωγμής, που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Τα διδιάστατα προβλήματα των ρωγμών μπορεί να επιλυθούν κατά τον Westergaard εφόσον η τασική συνάρτηση Airy οριστεί μέσω της σχέσης

$$F = \operatorname{Re} \bar{Z} + y \operatorname{Im} \bar{Z} \quad (2.7)$$

Όπου Z αναλυτική συνάρτηση της μιγαδικής μεταβλητής $z=x+iy$, και

$$\bar{Z} = \frac{d\bar{Z}}{dz} \quad (2.8)$$

Οι σχέσεις Cauchy-Riemann δίνουν,

$$\frac{\partial}{\partial x}(\operatorname{Re} \bar{Z}) = \frac{\partial}{\partial y}(\operatorname{Im} \bar{Z}) = \operatorname{Re} \bar{Z} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\operatorname{Im} \bar{Z}) = -\frac{\partial}{\partial y}(\operatorname{Re} \bar{Z}) = \operatorname{Im} \bar{Z} \quad (2.10)$$

$$\nabla^2(\operatorname{Re} \bar{Z}) = \nabla^2(\operatorname{Im} \bar{Z}) = 0 \quad (2.11)$$

Όπου,

$$Z = \frac{d\bar{Z}}{dz} \quad (2.12)$$

Από τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτουν οι εξής σχέσεις,

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \operatorname{Re} \bar{Z} + y \operatorname{Im} Z, \quad \frac{\partial F}{\partial y} = y \operatorname{Re} Z \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \operatorname{Re} Z + y \operatorname{Im} Z', \quad \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \operatorname{Re} Z - y \operatorname{Im} Z' \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} = y \operatorname{Re} Z' \quad (2.15)$$

Όπου,

$$Z' = \frac{dZ}{dz} \quad (2.16)$$

Από τις σχέσεις

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad \text{και} \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x}$$

Προκύπτουν οι τάσεις,

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \operatorname{Re} Z - y \operatorname{Im} Z' \quad (2.17)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \operatorname{Re} Z + y \operatorname{Im} Z' \quad (2.18)$$

$$\sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -y \operatorname{Re} Z' \quad (2.19)$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις των τάσεων ικανοποιούν τις εξισώσεις ισορροπίας και την εξίσωση συμβιβαστού. Πληροφορίες σχετικά με τις εξισώσεις ισορροπίας και την εξίσωση συμβιβαστού παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Συνεπώς, προκύπτει,

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} = \operatorname{Re} Z' - y \operatorname{Im} Z'', \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \operatorname{Re} Z' + y \operatorname{Im} Z'' \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = -y \operatorname{Re} Z'', \quad \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = y \operatorname{Re} Z'' \quad (2.21)$$

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} = 2 \operatorname{Re} Z \quad (2.22)$$

Συνεπώς, καταλήγουμε ότι

$$\nabla^2(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = 2\nabla^2(\operatorname{Re} Z) \quad (2.23)$$

Η ίδια λύση προκύπτει αν χρησιμοποιηθεί η μιγαδική λύση, αρκεί να οριστούν οι αναλυτικές συναρτήσεις $\Phi(z)$ και $\Psi(z)$ μέσω των σχέσεων

$$\Phi(z) = \varphi'(z) = \frac{Z}{2}, \quad \Psi(z) = \psi'(z) = \frac{zZ}{2} \quad (2.24)$$

Από τη θεωρία για την επίλυση του επίπεδου εντατικού προβλήματος και τον προσδιορισμό της μιγαδικής τασικής συνάρτησης έχουμε ότι,

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} = 2[\varphi'(z) + \overline{\varphi'(z)}] = 4 \operatorname{Re} \varphi'(z) = 4 \operatorname{Re} \Phi(z) = 2[\Phi(z) + \overline{\Phi(z)}] \quad (2.25)$$

$$\sigma_{yy} - \sigma_{xx} + \tau_{xy}i = 2[\overline{z\varphi''(z)} + \psi'(z)] = 2[\overline{\Phi'(z)} + \Psi(z)] \quad (2.26)$$

Αντικαθιστώντας τις συναρτήσεις (2.24) στις (2.25) και (2.26) προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις,

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} = Z + \overline{Z} \quad (2.27)$$

$$\sigma_{yy} - \sigma_{xx} + \tau_{xy}i = \bar{z}Z' - zZ' = -2iyZ' = -2iy(\text{Re } Z' + i \text{Im } Z') \quad (2.28)$$

Οπότε παίρνουμε,

$$\sigma_{yy} - \sigma_{xx} = 2y \text{Im } Z' \quad (2.29)$$

$$\tau_{xy} = -y \text{Re } Z' \quad (2.30)$$

Συνεπώς, οι τάσεις γράφονται,

$$\sigma_{xx} = \text{Re } Z - y \text{Im } Z' \quad (2.31)$$

$$\sigma_{yy} = \text{Re } Z + y \text{Im } Z' \quad (2.32)$$

Οι τάσεις (2.30), (2.31) και (2.32) είναι ίδιες με αυτές που προέκυψαν με τη συνάρτηση Z του Westergaard. Συνεπώς, η μέθοδος του Westergaard ανάγεται στην εύρεση μιας αναλυτικής συνάρτησης Z , με εξαίρεση το υπό της ρωγμής οριζόμενο διάστημα, που ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες. Διακρίνουμε, λοιπόν, τις εξής περιπτώσεις:

Mode I: Άνοιγμα ή Εφελκυστική Φόρτιση

Η τασική συνάρτηση Westergaard δίνεται από τον τύπο:

$$Z = \frac{\sigma z}{\sqrt{z^2 - a^2}} \quad (2.33)$$

Η ανωτέρω συνάρτηση αναφέρεται σε ρωγμή $-a < x < a$, $y=0$ εντός άπειρου σώματος υπό διαξονική φόρτιση σ στο άπειρο με μήκος ρωγμής $2a$. Αναφέροντας τη συνάρτηση αυτή σε σύστημα αξόνων τοποθετημένο στο άκρο της ρωγμής, και όχι στο μέσο αυτής, και επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό $\zeta=z-a$, παίρνουμε την συνάρτηση,

$$Z_1 = \frac{\sigma(\zeta + a)}{\sqrt{\zeta} \sqrt{z^2 - a^2}} \quad (2.34)$$

Η ποσότητα $\frac{1}{\sqrt{\zeta + 2\alpha}}$ αναπτύσσεται σε δυναμοσειρά Taylor κατά ζ ,

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta + 2\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{2\alpha}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\zeta}{2\alpha} \right) + \frac{1}{2} \frac{3}{4} \left(\frac{\zeta}{2\alpha} \right)^2 - \dots \right] \quad (2.35)$$

Οπότε παίρνουμε,

$$Z_1 = \frac{\sigma(\zeta + \alpha)}{\sqrt{\zeta}} \frac{1}{\sqrt{2\alpha}} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\zeta}{2\alpha} \right) + \frac{1}{2} \frac{3}{4} \left(\frac{\zeta}{2\alpha} \right)^2 - \dots \right] \quad (2.36)$$

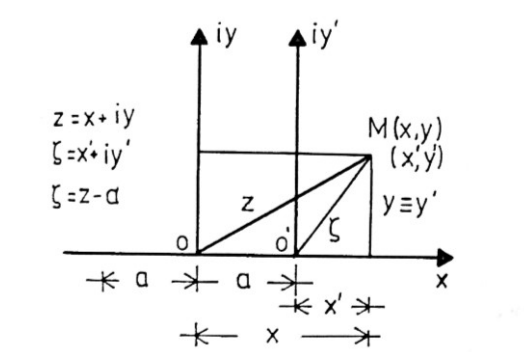
Επειδή το ζ είναι πολύ μικρό σε σχέση με το α , παραλείπονται οι δυνάμεις του ζ/α , οπότε και καταλήγουμε στη συνάρτηση

$$Z_1 = \frac{\sigma\sqrt{\pi\alpha}}{\sqrt{2\pi\zeta}} \quad (2.37)$$

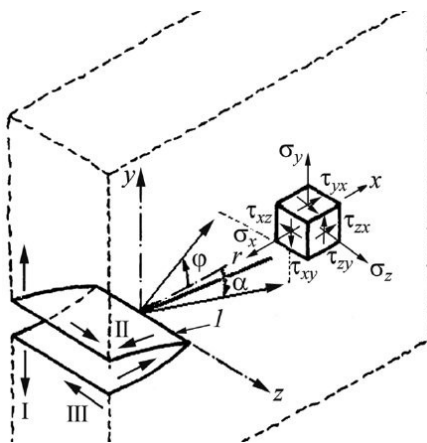
Θέτοντας,

$$K_1 = \sigma\sqrt{\pi\alpha} \quad (2.38)$$

Καταλήγουμε στη σταθερά την οποία καλούμε Εφελκυστικό Συντελεστή Έντασης Τάσεων. Αυτή είναι και η πλέον γνωστή μορφή του συντελεστή K , και αφορά την ιδανική περίπτωση που μελετήθηκε.



Εικόνα 14 Μεταφορά του συστήματος αξόνων στο άκρο της ρωγμής



Εικόνα 15 Τασικό πεδίο γύρω από το άκρο της ρωγμής

Θέτοντας $\zeta = re^{i\theta}$ και αντικαθιστώντας στις σχέσεις (2.17), (2.18) και (2.19) προκύπτουν οι τάσεις σε πολικές συντεταγμένες (r, θ) :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad (2.39)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad (2.40)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \quad (2.41)$$

Οι εξισώσεις αυτές μας δείχνουν ότι όλες οι τάσεις θα τείνουν στο άπειρο καθώς η απόσταση από το χείλος της ρωγμής θα τείνει στο μηδέν ($r \rightarrow 0$). Βέβαια στην πράξη αυτό δεν ισχύει, γιατί η πραγματικότητα είναι πολύ πιο πολύπλοκη ώστε να περιγραφεί με τα απλοϊκά μοντέλα που χρησιμοποιούμε. Παρόλα αυτά οι παραπάνω σχέσεις οδηγούν σε πολύ χρήσιμα αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις έχουν ένα μέρος που εξαρτάται από τη θέση (r, θ) του σημείου (οι τριγωνομετρικοί όροι και ο παρανομαστής) και έναν όρο (τον συντελεστή K_I) ο οποίος εξαρτάται από τις υπόλοιπες παραμέτρους ή συνθήκες (φορτίο, μήκος ρωγμής, γεωμετρία κλπ).

Mode II: Ολίσθηση

Η τασική συνάρτηση Westergaard, για την περίπτωση αυτή, δίνεται από τη σχέση

$$Z_2 = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi\zeta}} \quad (2.42)$$

Όπου, η σταθερά K_{II} δίνεται από τη σχέση,

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (2.43)$$

Τη σταθερά K_{II} τη καλούμε Συνεπίπεδο Διατμητικό Συντελεστή Έντασης των Τάσεων.

Στο δεύτερο τύπο (mode II) αποδεικνύεται με ανάλογο τρόπο ότι οι εξισώσεις των τάσεων περιγράφονται από τις σχέσεις,

$$\sigma_{xx} = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(2 + \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}\right) \quad (2.44)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \quad (2.45)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \quad (2.46)$$

Mode III: Ψαλιδισμός

Σε αυτή την περίπτωση η τασική συνάρτηση Airy είναι,

$$F = -\operatorname{Re} Z \quad (2.47)$$

η οποία μας οδηγεί στις τάσεις που εκφράζονται μέσω των σχέσεων,

$$\tau_{xz} = \frac{\partial F}{\partial y} = \text{Im} Z' \quad (2.48)$$

$$\tau_{yz} = -\frac{\partial F}{\partial x} = \text{Re} Z' \quad (2.49)$$

Γνωρίζουμε ακόμη, ότι η τασική συνάρτηση Westergaard δίνεται από τη σχέση,

$$Z_3 = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi\zeta}} \quad (2.50)$$

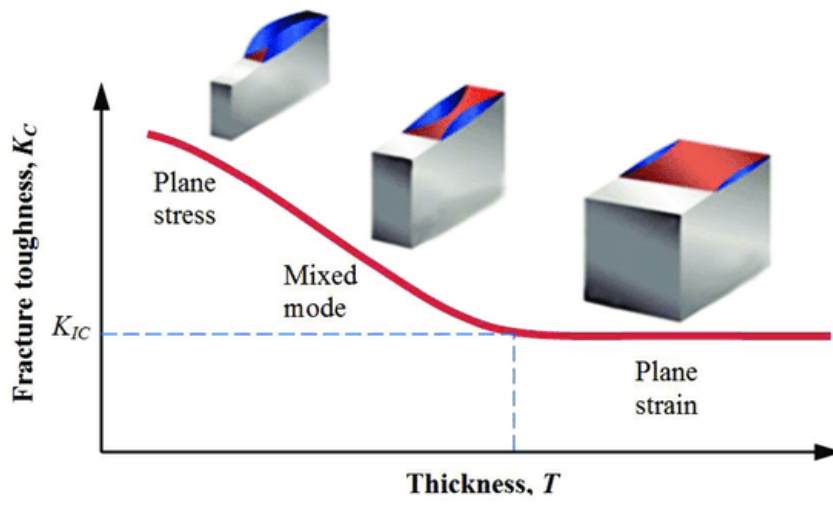
Όπου, η σταθερά K_{III} είναι η χαρακτηριστική του τύπου III και ονομάζεται Μη Συνεπίπεδος Διατμητικός Συντελεστής Έντασης Τάσεων. Από τις σχέσεις (2.48), (2.49) και (2.50) προκύπτουν οι τάσεις σε πολικές συντεταγμένες.

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.51)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2.52)$$

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε φόρτιση δοκιμίου εμφανίζει μια κρίσιμη η τιμή του Συντελεστή Έντασης των Τάσεων K_C η οποία εφόσον ξεπεραστεί η ρωγμή επεκτείνεται. Η κρίσιμη αυτή τιμή του συντελεστή καλείται Αντοχή Θραύσης ή Σκληρότητα Θραύσης ή Κρίσιμος Συντελεστής Έντασης Τάσεων (Fracture Toughness).

Η τιμή του Κρίσιμου Συντελεστή Έντασης K εξαρτάται όχι μόνο από το υλικό που εξετάζεται αλλά και από το πάχος του δοκιμίου που βρίσκεται η ρωγμή. Αυτό μπορεί να κατανοηθεί, εάν αναλογιστούμε ότι κατά την επίπεδη ένταση (plane stress) σημειώνεται πλαστική παραμόρφωση και στις τρεις κατευθύνσεις. Συνεπώς, εντός του δοκιμίου και πλησίον του άκρου της ρωγμής εμφανίζεται μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση η οποία απαιτεί μεγαλύτερη τάση για να επεκταθεί. Αντιθέτως, κατά την επίπεδη παραμόρφωση (plane strain), όπου το πάχος του δοκιμίου είναι μεγαλύτερο, παρατηρούνται τάσεις και στις τρεις κατευθύνσεις οι οποίες οδηγούν ευκολότερα σε επέκταση της ρωγμής.



Εικόνα 16 Μεταβολή του K_{IC} συναρτήσει του πάχους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΕΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι πλέον γνωστό ότι στο άκρο της ρωγμής συγκεντρώνονται τάσεις οι οποίες θεωρητικά έχουν άπειρη τιμή. Τέτοιου είδους σημεία, καλούνται ιδιόμορφα σημεία (singular points). Επισημαίνεται ότι, τα ιδιόμορφα σημεία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από τους μηχανικούς, καθώς αποτελούν κύριο παράγοντα για την αστοχία μιας κατασκευής.

Ο υπολογισμός των τάσεων σε ιδιόμορφα σημεία μπορεί να επιτευχθεί με δυο τρόπους:

- Με θεωρητικές μεθόδους
- Πειραματικά ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με τις γνωστές οπτικές μεθόδους.

Στις θεωρητικές μεθόδους υπολογισμού του εντατικού πεδίου, συγκαταλέγονται διάφορες ολοκληρωτικές εξισώσεις, αναλυτικές συναρτήσεις και υπολογιστικές μέθοδοι με πεπερασμένα στοιχεία. Ωστόσο, οι παραδοχές που συχνά λαμβάνονται στις θεωρητικές μεθόδους, οδηγούν σε αποτελέσματα τα οποία απέχουν των πραγματικών καταστάσεων μιας κατασκευής.

Αναφερόμενοι στις πειραματικές μεθόδους, ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται με τις γνωστές οπτικές μεθόδους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή κάθε μεθόδου απαιτεί ιδιαίτερα πολύπλοκο και κοστοβόρο εξοπλισμό καθώς και έμπειρο προσωπικό. Ωστόσο, με τις πειραματικές μεθόδους ο μηχανικός έχει την ευελιξία να μελετήσει απευθείας την κατασκευή υπό ορισμένες εξωτερικές φορτίσεις ή να μελετήσει δοκίμια τα οποία κατασκευάζονται από υλικά της κατασκευής. Οι μέχρι σήμερα πειραματικές μέθοδοι έχουν σκοπό να υπολογίσουν τις τάσεις σε κάθε ιδιόμορφο σημείο του σώματος υπολογίζοντας

πειραματικά είτε τους συντελεστές εντάσεως των τάσεων K_I, K_{II}, K_{III} είτε τις μετατοπίσεις και εξ αυτών τις παραμορφώσεις και τις τάσεις.

Οι πειραματικές μέθοδοι δια των οποίων υπολογίζονται οι συντελεστές εντάσεως των τάσεων είναι:

- Η πειραματική Μέθοδος της Φωτοελαστικότητας
- Η πειραματική Μέθοδος των Ισοπαχών
- Η πειραματική μέθοδος των Καυστικών

Οι πειραματικές μέθοδοι δια των οποίων υπολογίζονται οι μετατοπίσεις είναι:

- Η πειραματική μέθοδος της Οπτικής και Μηχανικής Συμβολομετρίας (Moire)
- Η πειραματική μέθοδος της Τρισδιάστατης Συμβολομετρίας ή Ολογραφίας.

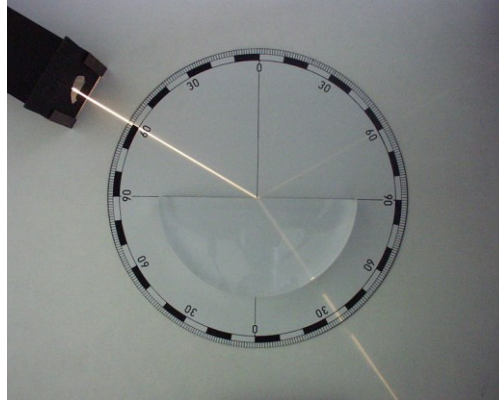
Με τις πειραματικές αυτές μεθόδους μπορεί να επιλυθούν πολύπλοκα προβλήματα όπως στατικά και δυναμικά προβλήματα ρωγμών και επαφών σε υλικά ισότροπα και ομογενή καθώς και σε ανισότροπα και σύνθετα υλικά. Επισημαίνεται ότι, η επιλογή της πειραματικής μεθόδου εξαρτάται από την φύση του εκάστοτε προβλήματος προκειμένου τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι ακριβή.

Οι ανωτέρω μέθοδοι θα αναλυθούν ξεχωριστά στις επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου. Σημειώνεται ότι, η πειραματική μέθοδος των Καυστικών θα αναλυθεί τελευταία, καθώς θα αποτελέσει αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.

3.2 Η Οπτική Μέθοδος της Φωτοελαστικότητας

Η οπτική μέθοδος της Φωτοελαστικότητας βασίζεται στο φαινόμενο της διπλοδιάθλασης που παρουσιάζεται σε ορισμένα υλικά. Άλλα υλικά παρουσιάζουν φυσική διπλοδιάθλαση (χαλαζίας) και άλλα αποκτούν διπλοδιάθλαση όταν επιβληθούν πάνω σε αυτά εξωτερικές δυνάμεις (φορτία).

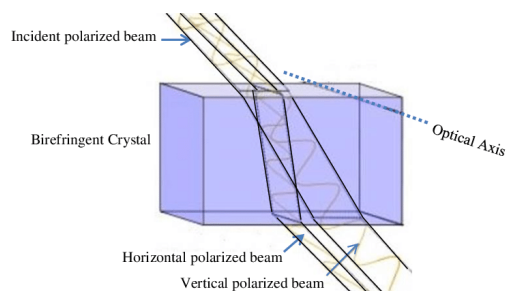
Γενικά, διάθλαση (refraction) ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης που υφίστανται φωτεινά ή άλλα κύματα όταν διέρχονται από ένα διαπερατό από αυτά μέσο σε ένα άλλο. Διπλή διάθλαση (birefringence), ονομάζεται το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο μια φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει σε ένα διαθλαστικό σώμα διασπάται σε δύο διαθλώμενες ακτίνες. Η μία εκ των δύο αυτών ακτίνων ονομάζεται τακτική και η άλλη έκτακτη. Τέτοια διαθλαστικά διαπερατά σώματα, ονομαζόμενα και "διπλοθλαστικά".



Εικόνα 17 Το φαινόμενο της διάθλασης



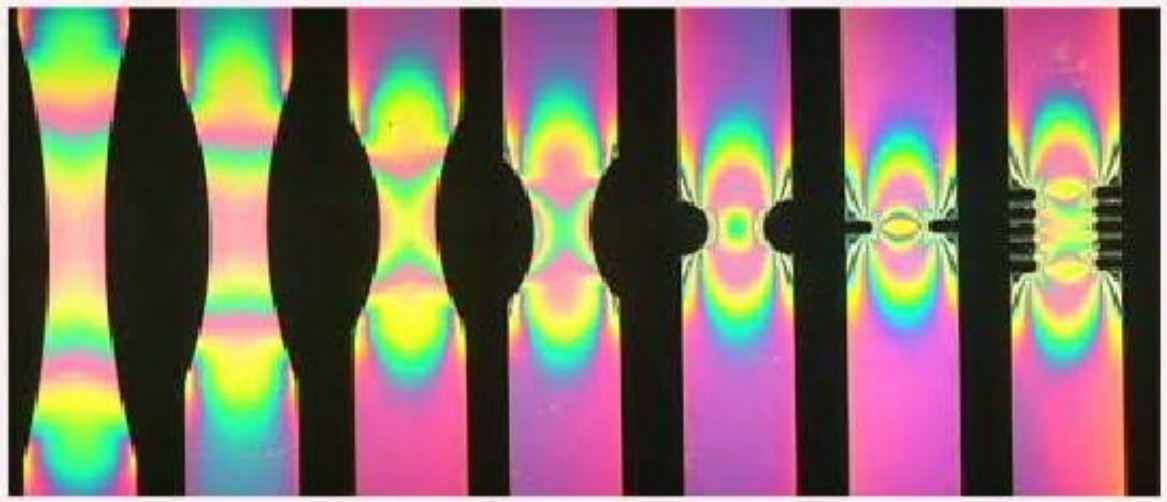
Εικόνα 18 Το φαινόμενο της διπλοδιάθλασης



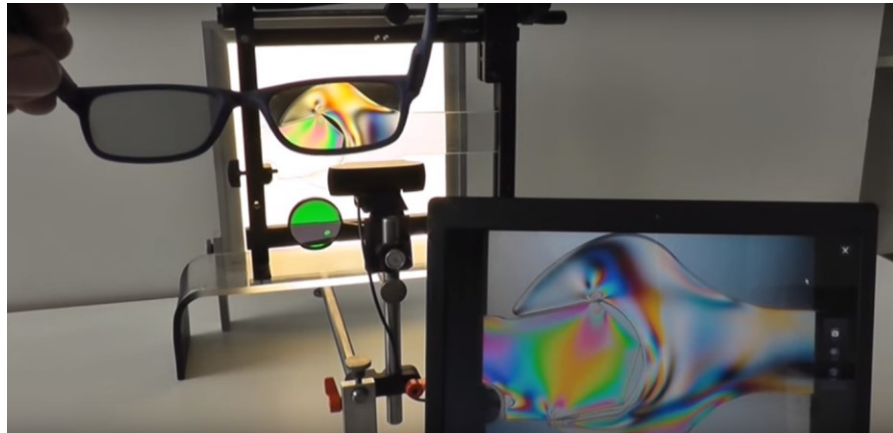
Εικόνα 19 Σχηματική απεικόνιση της διπλοδιάθλασης

Η διπλοδιάθλαση εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης του υλικού ο οποίος μεταβάλλεται καθώς αναπτύσσονται κύριες τάσεις στο εσωτερικό του υλικού κατά τη φόρτιση. Συνεπώς, ένα οπτικώς ισότροπο υλικό (γυαλί, πλαστικό Lexan, ρητίνες κλπ) όταν φορτιστεί εμφανίζει διπλοδιάθλαση.

Εάν τα υλικά αυτά παρατηρηθούν με πολωμένο φως, εμφανίζονται σκοτεινοί κροσσοί (ισόχρωμες και ισοκλινείς καμπύλες). Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με την κυματική θεωρία του φωτός, το κοινό φως αποτελείται από εγκάρσια κύματα διαφόρων συχνοτήτων και διευθύνσεων. Εάν το κοινό φως προσπέσει πάνω σε υάλινη πλάκα με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης τότε το ανακλώμενο φως αποτελείται από εγκάρσια κύματα με επίπεδα ταλάντωσης παράλληλα μεταξύ τους κάθετα στη διάδοση του κύματος. Στην περίπτωση αυτή το φως καλείται πολωμένο. Οι κροσσοί αυτοί είναι οι γεωμετρικοί τόποι σημείων όπου η διαφορά των κύριων τάσεων και η κλίση αυτών είναι σταθερή. Από τα δίκτυα των κροσσών αυτών υπολογίζονται οι κύριες τάσεις πλησίον και μακράν της θέσης των ιδιόμορφων σημείων. Επίσης, δια της μεθόδου αυτής είναι δυνατόν να ελεγχθεί σε ένα μοντέλο μιας κατασκευής εάν και που υπάρχουν ιδιόμορφα σημεία συγκέντρωσης τάσεων.



Εικόνα 20 Το φαινόμενο της φωτοελαστικότητας κατά τον εφελκυσμό



Εικόνα 21 Πειραματική διάταξη του πειράματος της φωτοελαστικότητας

3.3 Η Οπτική Μέθοδος των Ισοπαχών

Η οπτική μέθοδος των ισοπαχών παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού με μεγάλη ακρίβεια του αθροίσματος των κύριων τάσεων $\sigma_1 + \sigma_2$ σε κάθε σημείο της επιφάνειας του δοκιμίου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι με τη μέθοδο της Φωτοελαστικότητας είναι δυνατόν να υπολογιστεί η διαφορά των κυρίων τάσεων $\sigma_1 - \sigma_2$ επίσης σε οποιοδήποτε σημείο του δοκιμίου, καθίσταται σαφές ότι είναι εφικτός ο ακριβής υπολογισμός των τάσεων σ_1 και σ_2 .

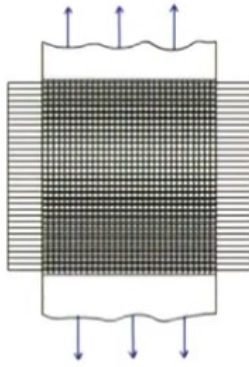
Ο υπολογισμός του αθροίσματος των κυρίων τάσεων επιτυγχάνεται πειραματικά από τη μεταβολή του πάχους του δοκιμίου κατά την φόρτιση. Οι καμπύλες των οποίων το πάχος μεταβάλλεται το ίδιο καλούνται ισοπαχείς. Το δίκτυο των ισοπαχών καμπύλων λαμβάνεται δια της οπτικής συμβολής του φωτός. Το δίκτυο των ισοπαχών λαμβάνεται από την υπέρθεση των δικτύων κροσσών συμβολής του φωτός που λαμβάνονται από το αφόρτιστο και το φορτισμένο δοκίμιο.

3.4 Η Συμβολομετρία (Moire)

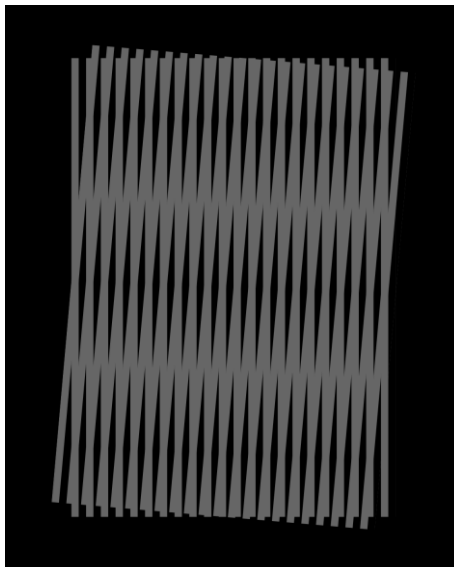
Η μέτρηση της μεταβολής ενός μικρού μήκους (μετατόπιση) είναι δυνατόν να γίνει με το φως το οποίο έχει την ιδιότητα να πολλαπλασιάζει τη μεταβολή του μήκους και έτσι να μετρηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια σχετικά με μηχανικά όργανα μέτρησης όπως τα μηκυσιόμετρα. Μια τέτοια οπτική μέθοδος παρέχει τις μεταβολές του μήκους από τους σχηματιζόμενους κροσσούς συμβολής. Η δημιουργία τέτοιων κροσσών συμβολής επιτυγχάνεται δια της χρήσεως ειδικών πλεγμάτων. Τα πλέγματα αποτελούνται από υάλινη πλάκα πάνω στην οποία έχουν χαραχθεί αδιαφανείς γραμμές ίσου πάχους και σε αποστάσεις ώστε το διαφανές μεταξύ τους κενό να είναι του ίδιου πάχους, δηλαδή δημιουργείται ένα πλέγμα σκοτεινών και διαφανών γραμμών. Ο αριθμός των γραμμών ανά χιλιοστό μήκους εκφράζει την πυκνότητα του πλέγματος.

Εάν δύο πλέγματα της ίδιας σχεδόν σταθεράς υπερτεθούν, έτσι ώστε οι γραμμές τους να είναι παράλληλες και παρατηρηθούν σε διάχυτο φως, τότε θα εμφανισθούν ευκρινείς κροσσοί οι οποίοι καλούνται κροσσοί Moire. Εάν τα βήματα των πλεγμάτων είναι ίσα, τότε δεν παρατηρούνται κροσσοί Moire. Εάν τα βήματα διαφέρουν, τότε σχηματίζονται κροσσοί Moire η απόσταση των οποίων ισούται με την διαφορά των βημάτων. Οι κροσσοί Moire οφείλονται στη μεταβολή της εντάσεως του φωτός το οποίο διέρχεται διαδοχικά δια των δύο πλεγμάτων.

Πρακτικά, το ένα πλέγμα επικολλάται πάνω στο δοκίμιο οπότε καλείται πλέγμα δοκιμίου και το δεύτερο υπερτίθεται οπότε καλείται πλέγμα αναφοράς. Έτσι λαμβάνονται δύο δίκτυα κροσσών τα οποία δίδουν τις μετατοπίσεις $u(x)$ και $v(y)$. Δια παραγωγίσης των μετατοπίσεων λαμβάνονται οι παραμορφώσεις $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ και γ_{xy} .



Εικόνα 22 Κάθετα πλέγματα κατά τον εφελκυσμό



Εικόνα 23 Ίσα πλέγματα υπό κλίση

3.5 Η Ολογραφία

3.5.1 Περιγραφή Μεθόδου

Η Ολογραφία είναι μια οπτική μέθοδος παραγωγής εικόνας από ανασύνθεση μετώπου κύματος. Η τεχνική αυτή ονομάστηκε ανακατασκευή μετώπου κύματος από τον Cabor το 1958. Με την τεχνική αυτή αποτυπώνονται σε φωτογραφική πλάκα δεδομένα σχετικά με

τρισδιάστατο αντικείμενο, τα οποία εν συνεχεία ανασυνθέτουν το τρισδιάστατο είδωλο του αντικειμένου. Δηλαδή, αντί της αποτύπωσης του ειδώλου του αντικειμένου σε φωτογραφική πλάκα με φωτογραφική μηχανή, αποτυπώνονται τα φωτεινά κύματα τα οποία προέρχονται από το φωτιζόμενο αντικείμενο. Η αποτύπωση αυτή της απεικόνισης των φωτεινών κυμάτων ανασυνθέτουν το τρισδιάστατο είδωλο του αντικειμένου. Η αποτυπωμένη απεικόνιση των φωτεινών κυμάτων των διαχεομένων από το αντικείμενο καλείται ολογράφημα. Η Ολογραφία εκτός από την ανασύνθεση τρισδιάστατων ειδώλων εφαρμόζεται στη Μηχανική για τη μέτρηση των μετατοπίσεων και παραμορφώσεων από την απεικόνιση κροσσών Moiré.

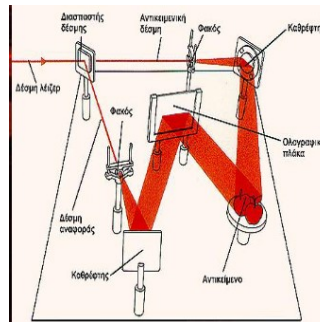
Αξίζει να σημειωθεί ότι, εν αντιθέσει με μια φωτογραφία, όπου οι αυξομειώσεις της έντασης του φωτός αποτυπώνονται πάνω στο φιλμ (ενώ το είδωλο σχηματίζεται από συνηθισμένα φωτεινά κύματα και είναι "δυσδιάστατο"), στο ολογράφημα χρειάζονται ακτίνες laser, καθώς επίσης δύο ομάδες ακτινών και όχι μία. Η μια ομάδα ακτινών ανακλάται από το αντικείμενο και πέφτει πάνω στο φιλμ ενώ η δεύτερη ομάδα φτάνει στο φιλμ χωρίς να περάσει από το αντικείμενο. Στην περιοχή συνάντησης των δύο ομάδων δημιουργούνται κροσσοί συμβολής, που αποτυπώνονται πάνω στο φιλμ. Όταν κοιτάζουμε το ολόγραμμα, αυτοί οι κροσσοί δημιουργούν το τρισδιάστατο είδωλο.

Η Ολογραφία μπορεί να περιγραφεί σαν ένας συγκεκριμένος τρόπος για να αποθηκευτούν και να αναπαραχθούν ένα σύνολο οπτικών κυμάτων που προήλθαν από ένα τρισδιάστατο αντικείμενο τα οποία όπως αναφέρθηκε αποθηκεύονται σε ένα φωτοευαίσθητό (από laser) υλικό. Μετά την επεξεργασία του υλικού αυτού, το ολόγραμμα είναι έτοιμο για απεικόνιση. Όταν μια ακτίνα φωτός ακτινοβολεί το ολόγραμμα, κάποιος που κοιτάζει από μπροστά θα δει μια τρισδιάστατη ολογραφική εικόνα του αρχικού αντικειμένου.

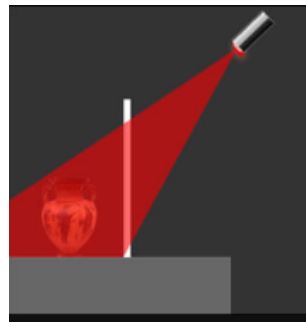
3.5.2 Διάταξη Ολογραφίας

Για την παραγωγή ολογραμμάτων είναι απαραίτητη μια διάταξη ολογραφίας. Το βασικό της στοιχείο είναι η πηγή φωτός laser. Αρχικά στην ολογραφία η δέσμη του laser διχοτομείται. Η "αντικειμενική" δέσμη, αφού περάσει από ένα φακό, ανακλάται προς το αντικείμενο και πέφτει στην ολογραφική πλάκα. Από την άλλη πλευρά, η δέσμη

"αναφοράς" περνάει από ένα φακό και ανακλάται προς την πλάκα, όπου συναντά την αντικειμενική δέσμη και δημιουργούνται κροσσοί συμβολής.



Εικόνα 24 Πειραματική Διάταξη για δημιουργία ολογράμματος



Εικόνα 25 Απεικόνιση Ολογράμματος

Η αναπαραγωγή του ειδώλου γίνεται φωτίζοντας το ολόγραμμα με κατάλληλη φωτεινή πηγή. Η δομή, που έχει δημιουργηθεί στο υλικό της φωτοευπαθούς πλάκας από την αλληλεπίδραση της με τις φωτεινές δέσμες κατά το στάδιο της ολογράφησης, επανεκπέμπει το προσπίπτον φως σε ακτίνες, που είναι πιστά αντίγραφα των αρχικών.

3.6 Η Μέθοδος των Καυστικών

3.6.1 Εισαγωγή

Κατά τη δεκαετία του 1960 αναπτύχθηκε η πειραματική μέθοδος των καυστικών από τους Manogg και Π. Θεοχάρη, η οποία κρίνεται ως η μόνη ενδεδειγμένη για την ικανοποιητική παρακολούθηση των απότομων μεταβολών του εντατικού πεδίου και της

διανομής των τάσεων εντός της μικρής περιοχής γύρω από το άκρο της ρωγμής ιδιόμορφης (singular) περιοχής.

Η πειραματική μέθοδος των καυστικών στηρίζεται στις αρχές της γεωμετρικής οπτικής. Έτσι, με τη χρήση αυστηρών μαθηματικών κανόνων, η επικρατούσα ιδιομορφία (singularity) των τάσεων, η οποία εμφανίζεται παρά το άκρο της ρωγμής, μετατρέπεται πλέον σε οπτική ιδιομορφία. Η οπτική ιδιομορφία, εφόσον μετράται με μεγάλη ακρίβεια, παρέχει σημαντικά στοιχεία για την κατανομή των τάσεων στο ιδιόμορφο σημείο.

Αναλύοντας περισσότερο την οπτική ιδιομορφία, αυτή προέρχεται από τη συγκέντρωση των ακτινών φωτός που αποκλίνουν από την ισχυρώς καταπνοούμενη παρά το άκρο της ρωγμής περιοχή επί ιδιόμορφης στο χώρο καμπύλης, η οποία καλείται καυστική. Η καυστική αυτή λαμβάνεται πάνω σε πέτασμα και αφού βρίσκεται σε πλήρη αντιστοιχία προς την παρά το άκρο της ρωγμής περιοχή επιτρέπει τη μελέτη αυτής.

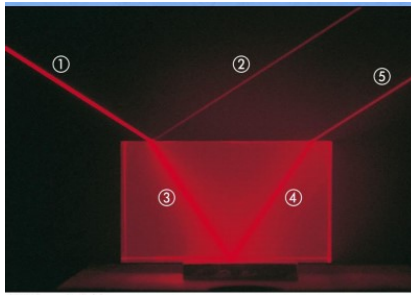
Η οπτική μέθοδος των καυστικών μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφανή υλικά (μέθοδος των διερχομένων καυστικών) καθώς και σε μη διαφανή υλικά (μέθοδος των ανακλώμενων καυστικών) και αποτελεί απλή και υψηλής ακρίβειας μέθοδος για τη μελέτη των ρωγμών.

Στην παρούσα παράγραφο, θα αναλυθεί η θεωρία που αφορά την Μέθοδο των καυστικών η οποία θα αποτελέσει την βάση για την πειραματική διαδικασία του επόμενου κεφαλαίου.

3.6.2 Θεωρία Μεθόδου των Καυστικών

3.6.2.1 Μεταβολή της Έντασης Φωτεινής Ακτίνας Διερχόμενης δια Διαφανούς Μέσου

Έστω επίπεδη πλάκα, πάχους d , από διαφανές υλικό και ακτίνα μονοχρωματικού φωτός προσπίπτουσα επί της πλευράς σε τυχόν σημείο P . Η ακτίνα κατά την πρόσπτωση της επί της πλάκας υφίσταται το φαινόμενο της ανάκλασης καθώς και της διάθλασης. Η διαθλώμενη ακτίνα, καθώς εισέρχεται στο εσωτερικό της πλάκας ανακλάται από την πίσω επιφάνεια και στη συνέχεια διαθλάται και εξέρχεται από την εμπρός επιφάνεια της πλάκας (Εικόνα 26). Οι διαδοχικές αυτές ανακλάσεις και διαθλάσεις εξακολουθούν επ' άπειρον.



Εικόνα 26 Διαδοχικές Ανακλάσεις - Διαθλάσεις

Η ένταση I της φωτεινής ακτίνας μειώνεται συνεχώς κατά τις διαδοχικές αυτές ανακλάσεις και διαθλάσεις. Μάλιστα, εάν με $r_{m,l}$ συμβολίζονται οι εξερχόμενες ακτίνες από την εμπρός επιφάνεια της πλάκας και με $t_{m,l}$ συμβολίζονται οι εξερχόμενες ακτίνες από την πίσω επιφάνεια, όπου m ο δείκτης που παριστάνει τον αριθμό των ανακλάσεων και l ο δείκτης που εκφράζει τον αριθμό των διαθλάσεων, τότε οι εντάσεις των ακτινών αυτών δίνονται από τις σχέσεις:

$$I_{r_{m,l},t_{m,l}} = \beta^m (1 - \beta)^l I$$

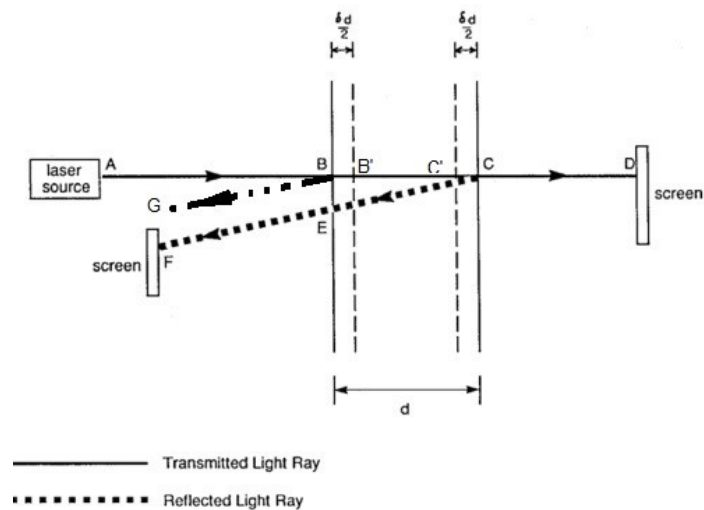
Όπου β ο λόγος μείωσης της έντασης ο οποίο δίνεται από τη σχέση

$$\beta = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

Αναφέρεται ότι n είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού της πλάκας.

3.6.2.2 Επίδραση της Φόρτισης επί του Οπτικού Δρόμου των Ανακλώμενων και Διερχόμενων Ακτινών

Θεωρούμε φωτεινή ακτίνα ABCD πολωμένη κατά τη διεύθυνση είτε της κύριας τάσης σ_1 είτε της κύριας τάσης σ_2 , η οποία προσπίπτει κάθετα στην πλευρικής επιφάνειας πλάκας που βρίσκεται σε επίπεδη εντατική κατάσταση (plane stress).



Εικόνα 27 Οπτικός Δρόμος φωτεινής ακτίνας

Για την περίπτωση της ανακλάσης της φωτεινής ακτίνας από την πίσω επιφάνεια της πλάκας, ο οπτικός δρόμος μεταξύ δυο σημείων αναφοράς A και F της φωτεινής ακτίνας ABCF ($AB=BF$), όταν η πλάκα είναι αφόρτιστη, είναι:

$$s_A = 2(AB)n_0 + 2dn \quad (3.1)$$

Όπου,

- d το πάχος της πλάκας,
- n_0 ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος,
- n ο δείκτης διαθλάσεως του υλικού της αφόρτιστης πλάκας.

Όταν η πλάκα φορτιστεί, ο οπτικός δρόμος μεταξύ των αυτών σημείων, A και F είναι

$$s_{L_{1,2}} = 2\left[(AB) - \frac{\delta d}{2}\right]n_0 + 2(d + \delta d)n_{1,2} \quad (3.2)$$

Όπου,

- δd είναι η μεταβολή του πάχους της πλάκας που οφείλεται στη φόρτιση

- $n_{1,2}$ είναι ο δείκτης διαθλάσεως του υλικού, της φορτισμένης πλάκας, κατά τις διευθύνσεις των κύριων τάσεων $\sigma_{1,2}$, αντίστοιχα.

Θέτοντας,

$$n_{1,2} = n + \Delta n_{1,2} \quad (3.3)$$

Όπου $\Delta n_{1,2}$ είναι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης, η μεταβολή του οπτικού δρόμου της ακτίνας ABCF, που οφείλεται στην φόρτιση, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta s_{r_{1,2}} = s_{L_{1,2}} - s_A = 2[(n_{1,2} - n)d + (n - \frac{n_0}{2})\delta d] \quad (3.3)$$

Ομοίως, για την οπτική ακτίνα ABCD, η οποία διέρχεται μέσα από την πλάκα, η μεταβολή του οπτικού δρόμου λόγω της φόρτισης είναι:

$$\Delta s_t = (n_{1,2} - n)d + (n - n_0)\delta d \quad (3.4)$$

Επίσης, για την ανακλώμενη από την εμπρός επιφάνεια της πλάκας οπτική ακτίνα ABG η μεταβολή του οπτικού δρόμου είναι:

$$\Delta s_f = -n_0\delta d \quad (3.5)$$

Οι οπτικές ακτίνες C'F και B'G, δηλαδή οι ανακλώμενες ακτίνες από την πίσω και την εμπρός επιφάνεια της πλάκας αντίστοιχα, σχηματίζουν συμβολόγραμμα του οποίου αριθμός των κροσσών $N_{1,2}$ σχετίζεται με τη διαφορά των οπτικών δρόμων τους, $\delta_{1,2}$:

$$\delta_{1,2} = \Delta s_{r_{1,2}} - \Delta s_f = 2[(n_{1,2} - n)d + n\delta d] \quad (3.6)$$

Μέσω της σχέσης,

$$N_{1,2} = \delta_{1,2} / \lambda \quad (3.7)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος του χρησιμοποιημένου μονοχρωματικού φωτός.

Οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης n κατά τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων σ_1, σ_2 , στο επίπεδο τασικό πρόβλημα, δίνονται από τον φωτοτασεοπτικό νόμο Neumann-Maxwell μέσω της σχέσης:

$$\Delta n_{1,2} = n_{1,2} - n = b_1 \varepsilon_{1,2} + b_2 (\varepsilon_{2,1} + \varepsilon_3) \quad (3.8)$$

Όπου,

- b_1, b_2 σταθερές
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ οι κύριες παραμορφώσεις.

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.8) στις (3.6) και (3.7) και λαμβάνοντας υπόψη το νόμο Hooke, προκύπτει για τον αριθμό των κροσσών:

$$N_{1,2} = 2d(a^* \sigma_{1,2} + b^* \sigma_{2,1}) \quad (3.9)$$

Όπου οι σταθερές a^* και b^* δίνονται από τις σχέσεις

$$a^* = \frac{1}{E\lambda} (b_1 - 2\nu b_2 - \nu n) \quad (3.10)$$

$$b^* = \frac{1}{E\lambda} [b_2 - \nu(b_1 + b_2) - \nu n] \quad (3.11)$$

Ομοίως, η μεταβολή των οπτικών δρόμων των φωτεινών ακτινών $AB'C'F$ και $AB'C'D$ που οφείλονται στη φόρτιση δίνονται από τις συνθήκες Favre:

$$\Delta s_{r,2} = 2c_r [(\sigma_1 + \sigma_2) \pm \xi_r (\sigma_1 - \sigma_2)] d \quad (3.12)$$

$$\Delta s_{t,2} = c_t [(\sigma_1 + \sigma_2) \pm \xi_t (\sigma_1 - \sigma_2)] d \quad (3.13)$$

Όπου,

- $\xi_{r,t}$ είναι ο συντελεστής της οπτικής ανισοτροπίας του υλικού
- $c_{r,t}$ είναι τασεοπτικές σταθερές οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις:

$$\xi_{r,t} = \frac{\alpha_{r,t} - \beta_{r,t}}{\alpha_{r,t} + \beta_{r,t}} \quad (3.14)$$

$$c_{r,t} = \frac{\alpha_{r,t} + \beta_{r,t}}{2} \quad (3.15)$$

Και,

$$\alpha_r = \frac{1}{E} [b_1 - 2\nu b_2 - \nu(n - \frac{n_0}{2})] \quad (3.16)$$

$$\beta_r = \frac{1}{E} [b_2 - \nu(b_1 + b_2) - \nu(n - \frac{n_0}{2})] \quad (3.17)$$

$$\alpha_t = \frac{1}{E} [b_1 - 2\nu b_2 - \nu(n - n_0)] \quad (3.18)$$

$$\beta_t = \frac{1}{E} [b_2 - \nu(b_1 + b_2) - \nu(n - n_0)] \quad (3.19)$$

Παρατηρούμε ότι, οι σχέσεις (3.12) (3.13), οι οποίες εκφράζουν τη μεταβολή του οπτικού δρόμου κατά τη φόρτιση ενός διπλοθλαστικού υλικού, αποτελούνται από δυο μέρη. Το πρώτο είναι το ισότροπο, το οποίο εξαρτάται από το άθροισμα των κυρίων τάσεων, ενώ το δεύτερο είναι το ανισότροπο, το οποίο εξαρτάται από τη διαφορά των κυρίων τάσεων. Για την περίπτωση των οπτικώς ισότροπων υλικών ισχύουν οι σχέσεις:

$$b_1 = b_2 = b \quad (3.20)$$

$$\Delta s_{r_1} = \Delta s_{r_2} = 2c_r(\sigma_1 + \sigma_2)d \quad (3.21)$$

$$\Delta s_{i_1} = \Delta s_{i_2} = c_i(\sigma_1 + \sigma_2)d \quad (3.22)$$

$$\alpha_r = \beta_r = c_r = \frac{1}{E}[(1-2\nu)b - \nu(n - \frac{n_0}{2})] \quad (3.23)$$

$$\alpha_i = \beta_i = c_i = \frac{1}{E}[(1-2\nu)b - \nu(n - n_0)] \quad (3.24)$$

Από τις σχέσεις (3.23) και (3.24) προκύπτει ότι:

$$c_r = c_i - \frac{\nu n_0}{2E} \quad (3.25)$$

Οι τασεοπτικές σταθερές c_r, c_i υπολογίζονται πειραματικά με τη Συμβλομετρική Μέθοδο.

3.6.2.3 Βασική Θεωρία της Οπτικής Μεθόδου των Καυστικών

Οι φωτεινές ακτίνες $r_{1,2}$ της Εικόνας 28, οι οποίες είναι οι ανακλώμενες από την πίσω επιφάνεια της πλάκας σχηματίζουν μέτωπα:

$$S(x, y, z) = \text{σταθ}. \quad (3.26)$$

Εάν $s(x, y)$ εκφράζει την οπτική πορεία της αντιστοίχου φωτεινής ακτίνας μεταξύ δυο επιπέδων παραλλήλων προς το μέσο επίπεδο της φορτιζόμενης πλάκας και κειμένων επί των παραπλευρών επιφανειών της πλάκας, τότε ισχύει η σχέση:

$$S(x, y, z) = z - s(x, y) = \text{σταθ}. \quad (3.27)$$

Και από αυτή προκύπτει,

$$\text{grad}S(x, y, z) = k - \frac{\partial s}{\partial x} i - \frac{\partial s}{\partial y} j \quad (3.28)$$

Όπου

- i, j, k τα μοναδιαία διανύσματα του τρισσορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων $Oxyz$ του οποίου,

- η αρχή O συμπίπτει με το άκρο της ρωγμής
- ο άξονας Ox συμπίπτει με τον άξονα της ρωγμής
- ο άξονας Oz είναι κάθετος επί της πλάκας

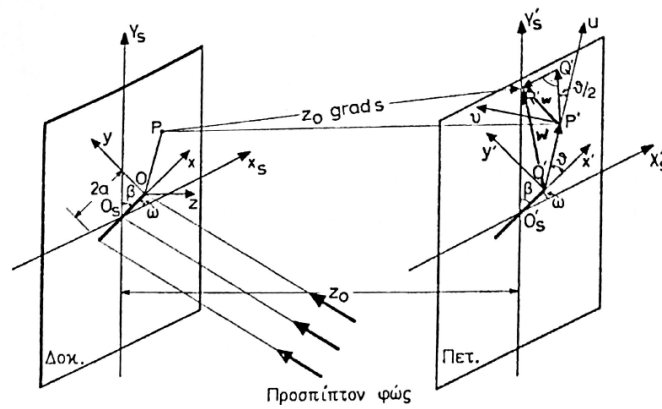
- $s(x, y)$ ο οπτικός δρόμος δια της πλάκας στο τυχόν σημείο P αυτής.

Η απόκλιση των ανακλωμένων φωτεινών ακτινών σε απόσταση z_0 από το μέσο επιπέδο της πλάκας εκφράζεται με το διάνυσμα w επί του επιπέδου $z = z_0$ και δίνεται, σύμφωνα με τη θεωρία της Εικονικής, από τη σχέση:

$$w = z_0 \text{grad}S(x, y, z) \quad (3.29)$$

Με χρήση των σχέσεων (3.27) και (3.28) προκύπτει:

$$w = -z_0 \text{grad}s(x, y, z) = -z_0 \left(\frac{\partial s}{\partial x} i + \frac{\partial s}{\partial y} j \right) \quad (3.30)$$



Εικόνα 28 Διάταξη πλάκας με ρωγή και πετάσματος αναφοράς

Δεδομένου ότι τα κυματικά μέτωπα των προσπιπτουσών φωτεινών ακτινών επί του μέσου επιπέδου της πλάκας είναι παράλληλα προς το επίπεδο αυτό, ισχύει η σχέση:

$$s(x, y) = s_0 + \Delta s_{r,t}(x, y) \quad (3.31)$$

Όπου,

- s_0 παριστάνει σταθερά για κάποιο κυματικό μέτωπο από την πλάκα και η οποία απαλείφεται κατά τον υπολογισμό των κλίσεων
- $\Delta s_{r,t}$ παριστάνει τη μεταβολή του οπτικού δρόμου δια της πλάκας που δίνεται από τις σχέσεις (3.12) και (3.13).

Με αντικατάσταση τη σχέσης (3.31) στη (3.30) προκύπτει:

$$w = -z_0 \text{grad} \Delta s_{r,t}(x, y) \quad (3.32)$$

Οι αιχμές του διανύσματος w καθορίζουν πάνω στο επίπεδο $z = z_0$ περιβάλλουσα (καυστική), η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με τον τρόπο παραμόρφωσης των περιοχών της πλάκας, από τις οποίες αναδύονται οι φωτεινές ακτίνες. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.12), (3.13), (3.21) και (3.22) στη σχέση (3.32) προκύπτει το διάνυσμα απόκλισης για τα οπτικώς ισότροπα υλικά ($\xi_{r,t} = 0$) ως ακολούθως,

- Για την πρώτη ακτίνα την ανακλώμενη από την πίσω επιφάνεια της πλάκας

$$w = -2z_0 dc_r \text{grad}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.33)$$

- Για την πρώτη ακτίνα η οποία διέρχεται μέσω της πλάκας

$$w = -z_0 dc_t \text{grad}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.34)$$

Συνοπτικά, οι σχέσεις (3.33) και (3.34) δύνανται να γραφούν ως,

$$w = -\varepsilon z_0 dc_{r,t} \text{grad}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.35)$$

Για την πρώτη ακτίνα την ανακλώμενη από την εμπρός επιφάνεια της πλάκας ισχύει ότι, εάν α είναι η γωνία στροφής λόγω της παραμόρφωσης, τότε η απόκλιση φ της ανακλώμενης ακτίνας, σύμφωνα με το νόμο της οπτικής του Snell, δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi = 2\alpha \quad (3.36)$$

Και η γωνία α δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \text{grad} \frac{\Delta d}{2} = -\text{grad} \left[\frac{vd}{2E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.37)$$

Οπότε η γωνία φ είναι:

$$\varphi = -\frac{vd}{E} \text{grad}(\sigma_1 + \sigma_2) = -dc_f \text{grad}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.38)$$

Όπου,

$$c_f = \frac{v}{E} \quad (3.39)$$

η τασεοπτική σταθερά για την πρώτη ανακλώμενη ακτίνα από την εμπρός επιφάνεια της πλάκας.

Το διάνυσμα απόκλισης w , της ανακλώμενης ακτίνας πάνω στο πέτασμα σε απόσταση z_0 από την πλάκα δίνεται από τη σχέση:

$$w = -z_0 dc_f grad(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.40)$$

Επομένως, οι σχέσεις (3.35) και (3.40) δύναται συνοπτικά να γραφούν ως,

$$w = -\varepsilon z_0 dc_{r,t,f} grad(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.41)$$

Στην περίπτωση όπου η προσπίπτουσα επί της πλάκας φωτεινή δέσμη είναι αποκλίνουσα (+) ή συγκλίνουσα (-), ο συντελεστής μεγέθυνσης της οπτικής διάταξης δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_m = \frac{z_o \pm z_i}{z_i} \quad (3.42)$$

Όπου,

- z_o η απόσταση του πετάσματος αναφοράς από την πλάκα
- z_i η απόσταση της εστίας της φωτεινής δέσμης από την πλάκα

Θέτοντας,

$$C^*_{r,t,f} = -\frac{\varepsilon z_0 dc_{r,t,f}}{\lambda_m} \quad (3.43)$$

Η σχέση (3.41) για τα οπτικώς ισότροπα υλικά γράφεται:

$$w = C^*_{r,t,f} grad(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3.44)$$

3.6.2.4 Εφαρμογή της Οπτικής Μεθόδου των Καυστικών στο Επίπεδο Εντατικό Πρόβλημα για Οπτικώς Ισότροπα Υλικά

Κατά την επίλυση του επίπεδου εντατικού προβλήματος με τη μέθοδο των μιγαδικών συναρτήσεων, το άθροισμα των κύριων τάσεων δίνεται από τη σχέση,

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} = 4 \operatorname{Re} \varphi(z) \quad (3.45)$$

Όπου $\varphi(z)$ αναλυτική συνάρτηση της μιγαδικής μεταβλητής z .

Έστω ότι η $\varphi(z)$ είναι της μορφής:

$$\varphi(z) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (3.46)$$

Όπου $u(x, y)$ και $v(x, y)$ πραγματικές συναρτήσεις των μεταβλητών x και y που ικανοποιούν τις σχέσεις Cauchy-Riemann:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.47)$$

Από τις ανωτέρω εξισώσεις συμπεραίνεται ότι οι συναρτήσεις u και v ικανοποιούν την αρμονική εξίσωση Laplace:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \quad (3.49)$$

Το διάνυσμα απόκλισης του φωτός για τα ισότροπα υλικά δίνεται από τη σχέση,

$$w = C^*_{r,t,f} \operatorname{grad}(\sigma_1 + \sigma_2) = 4C^*_{r,t,f} \operatorname{grad} \operatorname{Re} \varphi(z) = 4C^*_{r,t,f} \left(\frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial v}{\partial y} j \right) \quad (3.50)$$

Ενώ στο μιγαδικό επίπεδο η σχέση αυτή γράφεται,

$$w = 4C^*_{r,t,f} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.51)$$

Το διάνυσμα w εκφράζει τη σχετική απόκλιση του φωτός μεταξύ τυχόντος σημείου P, στη γειτονιά του άκρου της ρωγμής της πλάκας και της εικόνας του πάνω στο πέτασμα αναφοράς, τοποθετούμενου σε απόσταση z_0 από την πλάκα.

Εάν η απόκλιση αυτή αναφερθεί στην αρχή O' του συστήματος συντεταγμένων O'x'y'z' επί του πετάσματος αναφοράς, τότε το διάνυσμα απόκλισης εκφράζεται ως $W = z + w$.

Στο μιγαδικό επίπεδο γράφεται,

$$W = z + w = x + iy + 4C^*_{r,t,f} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.52)$$

Το διάνυσμα W στο μιγαδικό επίπεδο είναι της μορφής:

$$W' = x' + iy' \quad (3.53)$$

Οπότε η σχέση (3.52) γράφεται,

$$x' + iy' = \left(x + 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + i \left(y + 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.54)$$

Και μέσω αυτής προκύπτουν οι παραμετρικές εξισώσεις:

$$x' = x + 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.55)$$

$$y' = y + 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.56)$$

Όπως αναφέρθηκε, η ποσότητα W παριστάνει την προβολή πάνω στο πέτασμα των αποκλίσεων των ακτινών στην πλαστικοποιημένη περιοχή γύρω από το άκρο της ρωγμής.

Η απόκλιση των ακτινών είναι στενά συνδεδεμένη με τη μεταβολή του πάχους και του δείκτη διάθλασης του υλικού. Οι αποκλίνουσες ακτίνες συγκεντρώνονται πάνω σε μια οριακή καμπύλη η οποία φωτίζεται έντονα. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται Καυστική.

Η οριακή αυτή περιβάλλουσα παριστάνει ιδιόμορφη (singular) καμπύλη για το μέγεθος W . Οι συνθήκες για την ύπαρξη ιδιομορφίας (singularity) πληρούνται με τον μηδενισμό της Ιακωβιανής (Jacobian) διακρίνουσας:

$$J = \frac{\partial(x', y')}{\partial(x, y)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} \end{vmatrix} = 0 \quad (3.57)$$

Όπου,

$$\frac{\partial x'}{\partial x} = 1 + 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial x'}{\partial y} = 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial y'}{\partial x} = 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial y'}{\partial y} = 1 + 4C^*_{r,t,f} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.59)$$

Οπότε με αντικατάσταση στην ορίζουσα και μετέπειτα με την ανάπτυξή της προκύπτει,

$$1 + 4C^*_{r,t,f} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + 16C^*_{r,t,f}{}^2 \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] = 0 \quad (3.60)$$

Αντικαθιστώντας στην ανωτέρω σχέση, την σχέση (3.48) προκύπτει,

$$1 + 16C^*_{r,t,f}{}^2 \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] = 0 \quad (3.61)$$

Από την παραγωγή της αναλυτικής συνάρτησης $\varphi(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ δύο φορές ως προς x έχουμε,

$$\varphi''(z) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + i \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (3.62)$$

Η οποία λόγω της σχέσης (3.47) γίνεται,

$$\varphi''(z) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - i \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \quad (3.63)$$

Με μέτρο,

$$|\varphi''(z)|^2 = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\right)^2 \quad (3.64)$$

Ενώ χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.47) γίνεται,

$$|\varphi''(z)|^2 = -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y}\right)^2 \quad (3.65)$$

Με αντικατάσταση της (3.65) στην (3.63) έχουμε,

$$|4C^*_{r,t,f} \varphi''(z)|^2 = 1 \quad (3.66)$$

Δηλαδή,

$$|4C^*_{r,t,f} \varphi''(z)| = 1 \quad (3.67)$$

Η ανωτέρω εξίσωση είναι η εξίσωση της αρχικής καμπύλης της καυστικής.

Με δεδομένο ότι,

$$\overline{\varphi'(z)} = \frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.68)$$

Η σχέση (3.52) γίνεται,

$$W = z + 4C_{r,t,f}^* \overline{\varphi'(z)} \quad (3.69)$$

Η οποία είναι η εξίσωση της καυστικής.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η τασική συνάρτηση Westergaard Z , όπου ισχύει $2\varphi(z) = Z$, η εξίσωση της αρχικής καμπύλης της καυστικής καθώς και η εξίσωση της καυστικής (λαμβάνομένου υπόψη και του συντελεστή μεγέθυνσης λ_m) γίνονται αντίστοιχα:

$$|2C_{r,t,f}^* Z''(z)| = 1 \quad (3.70)$$

και

$$W = \lambda_m [z + 2C_{r,t,f}^* \overline{Z'(z)}] \quad (3.71)$$

3.6.2.5 Ανάλυση του Ελαστικού Προβλήματος της Εγκάρσιας Ρωγμής

Η συνάρτηση Westergaard για ρωγμή μήκους $2a$ εντός απείρων διαστάσεων ελαστικού σώματος δίνεται από τη σχέση:

$$Z_1 = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi\zeta}}, K_1 = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.72)$$

Όπου,

- σ , η ομοιόμορφη τάση κάθετη προς τον άξονα της ρωγμής
- ζ , η μιγαδική μεταβλητή με $\zeta = re^{i\theta}$

Παραγωγίζοντας την σχέση (3.72) έχουμε,

$$Z_1'(\zeta) = \frac{dZ_1}{d\zeta} = -\frac{K_1}{2\sqrt{2\pi}} \zeta^{-3/2} \quad (3.73)$$

$$\overline{Z_1}'(\zeta) = \overline{Z_1}'(\bar{\zeta}) = \frac{K_1}{2\sqrt{2\pi}} \bar{\zeta}^{-3/2} \quad (3.74)$$

$$Z_1''(\zeta) = \frac{d^2 Z_1}{d\zeta^2} = \frac{3K_1}{4\sqrt{2\pi}} \zeta^{-5/2} \quad (3.75)$$

Αντικαθιστώντας την τελευταία σχέση στην (3.70) προκύπτει,

$$\left| 2C_{r,t,f}^* \frac{3K_1}{4\sqrt{2\pi}} \zeta^{-5/2} \right| = 1 \quad (3.76)$$

Από την οποία προκύπτει η ακτίνα της αρχικής καμπύλης,

$$|\zeta| = r_0 = \left(\frac{3}{2} C_{r,t,f}^* \frac{K_1}{\sqrt{2\pi}} \right)^{2/5} \quad (3.77)$$

Και θέτοντας,

$$|C_{r,t,f}| = \frac{|C_{r,t,f}^*| K_1}{\sqrt{2\pi}} = \frac{\varepsilon z_0 d c_{r,t,f} K_I}{\lambda_m \sqrt{2\pi}} \quad (3.78)$$

Η σχέση (3.77) γράφεται,

$$|\zeta| = r_0 = \left(\frac{3}{2} C_{r,t,f} \right)^{2/5} \quad (3.79)$$

Δηλαδή, η αρχική καμπύλη είναι κύκλος ακτίνας r_0 η οποία ορίζεται από την ανωτέρω σχέση.

Για την εξίσωση της καυστικής, από την σχέση (3.71) προκύπτει,

$$\frac{W}{\lambda_m} = \zeta + C_{r,t,f} \bar{\zeta}^{-3/2} \quad (3.80)$$

Η οποία σε πολικές συντεταγμένες, με χρήση των $\zeta = re^{i\theta}$ και $\bar{\zeta} = re^{-i\theta}$, γράφεται,

$$\frac{W}{\lambda_m} = re^{i\theta} + C_{r,t,f} r^{-3/2} e^{3i\theta/2} \quad (3.81)$$

Η (3.81), εάν ληφθεί υπόψη η σχέση (3.79) γίνεται,

$$\frac{W}{\lambda_m} = r_0 \left(e^{i\theta} + \frac{2}{3} e^{3i\theta/2} \right) \quad (3.82)$$

Ισχύει όμως ότι,

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (3.83)$$

$$e^{3i\theta/2} = \cos \frac{3\theta}{2} + i \sin \frac{3\theta}{2} \quad (3.84)$$

Συνεπώς, προκύπτει,

$$\frac{W}{\lambda_m} = r_0 \left(\cos \theta + \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + ir_0 \left(\sin \theta + \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.85)$$

Ενώ θέτοντας $W = x'_{r,t,f} + iy'_{r,t,f}$, προκύπτουν οι παραμετρικές εξισώσεις των καυστικών,

$$x'_{r,t,f} = \lambda_m r_0 \left(\cos \theta + \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.86)$$

$$y'_{r,t,f} = \lambda_m r_0 \left(\sin \theta + \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.87)$$

Οι εξισώσεις (3.86) και (3.87) αποτελούν τις παραμετρικές εξισώσεις της λαμβανομένης παρά τα άκρα της ρωγμής καυστικής, η οποία είναι μια συμμετρική καμπύλη με άξονα συμμετρίας συμπίπτοντα με τον άξονα της ρωγμής. Από τις

παραμετρικές εξισώσεις της καυστικής συμπεραίνεται ότι αυτή είναι κλειστή καμπύλη, περατωμένη και με περίοδο 4π .

Η καυστική είναι ο γεωμετρικό τόπος των σημείων K με συντεταγμένες (x', y') . Η γεωμετρική σχεδίαση της καυστικής φαίνεται στην Εικόνα 39. Οι συντεταγμένες του σημείου K της καυστικής είναι,

$$x' = (OA) + (AB) = r_0 \cos \theta + r_0 \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} = r_0 \left(\cos \theta + \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.88)$$

$$y' = (B\Gamma) + (\Gamma K) = r_0 \sin \theta + r_0 \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} = r_0 \left(\sin \theta + \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.89)$$

Οι σχέσεις αυτές, οι οποίες είναι ίδιες με τις προηγούμενες, προσδιορίζουν την εξωτερική καυστική. Πέραν αυτής, σχηματίζεται καυστική εσωτερικά (εσωτερική καυστική) η οποία αποτελείται από το σύνολο των σημείων K' με συντεταγμένες,

$$x' = (O\Delta) = (OA) - (\Delta A) = r_0 \cos \theta - r_0 \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} = r_0 \left(\cos \theta - \frac{2}{3} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.90)$$

$$y' = (\Delta K') = (A\Gamma) - (A'\Gamma') = r_0 \sin \theta - r_0 \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} = r_0 \left(\sin \theta - \frac{2}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (3.91)$$

Επομένως, προκύπτει ότι για τη γεωμετρική σχεδίαση της καυστικής, αρκεί από το άκρο O' της ρωγμής να αχθεί ως προς τον άξονα συμμετρίας της καυστικής ακτίνα $O'P$ μήκους r_0 , που καθορίζεται από τη σχέση (3.79), υπό γωνία θ και ακολούθως από το σημείο P διάνυσμα (το διάνυσμα απόκλισης) PK (για την εξωτερική καυστική) ή PK' (για την εσωτερική καυστική) μήκους $2r_0/3$ υπό γωνία $\theta/2$ ως προς την $O'P$.

Η ακτίνα ρ της καυστικής δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \sqrt{x'^2 + y'^2} = r_0 \sqrt{\frac{13}{9} + \frac{4}{3} \cos \frac{\theta}{2}} \quad (3.92)$$

Τα ακρότατα της ακτίνας αυτής υπολογίζονται από τη συνθήκη $\frac{\partial \rho}{\partial \theta} = 0$, η οποία ισχύει για τιμές της γωνίας θ :

$$\theta_i^{\max} = 0, 2\pi, \dots \quad (3.93)$$

Από τις τιμές αυτές προκύπτει ότι η καυστική παρουσιάζει τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή πάνω στον άξονα συμμετρίας της. Οι τιμές αυτές είναι,

$$\begin{aligned} \text{Για } \theta_{i(1)}^{\max} = 0 &\rightarrow \rho_{\max} = \frac{5}{3} r_0 \lambda_m \\ \text{Για } \theta_{i(2)}^{\max} = \frac{5\pi}{6} &\rightarrow \rho_{\min} = \frac{4}{3} r_0 \lambda_m \end{aligned}$$

Ο άξονας συμμετρίας Ό'χ' τέμνει τη καυστική σε δυο σημεία που απέχουν απόσταση,

$$D_l^{\max} = 3r_0 \lambda_m \quad (3.94)$$

Η οποία παριστάνει τη μέγιστη διάμετρο της καυστικής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της, Ό'χ'.

Ο υπολογισμός της μέγιστης εγκάρσιας διαμέτρου, D_l^{\max} , της καυστικής προκύπτει από τη συνθήκη,

$$\frac{\partial y'}{\partial \theta} = 0 \quad (3.95)$$

Η οποία ισχύει για τιμές της γωνίας θ , $\theta_i^{\max} = 72^\circ$.

Από την τιμή αυτή της γωνίας προκύπτει,

$$D_l^{\max} = 2y' = 3,1702 \lambda_m \quad (3.96)$$

Οι ανωτέρω ευρεθείσες σχέσεις αποτελούν χαρακτηριστικές αναλλοίωτες της καυστικής. Θέτοντας,

$$\delta_l^{\max} = 3.00 \quad (3.97)$$

$$\delta_t^{\max} = 3.1702 \quad (3.98)$$

Μπορούμε να γράψουμε,

$$D_l^{\max} = r_0 \lambda_m \delta_l^{\max} \quad (3.99)$$

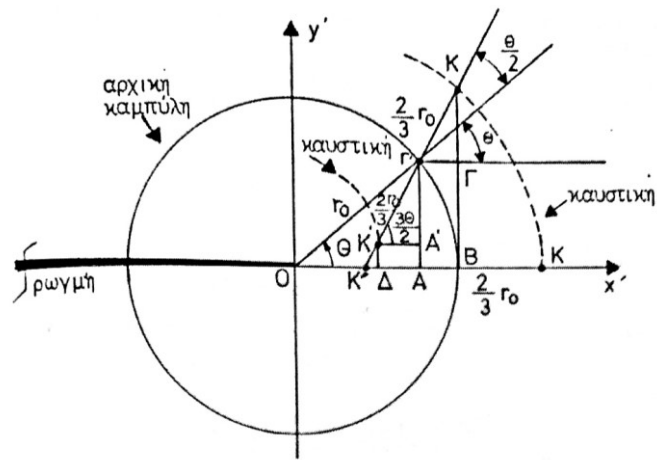
$$D_t^{\max} = r_0 \lambda_m \delta_t^{\max} \quad (3.100)$$

Όπου, $\delta_{l,t}^{\max}$ καλούνται συντελεστές διόρθωσης (correction factors) των διαμέτρων $D_{l,t}^{\max}$ της καυστικής.

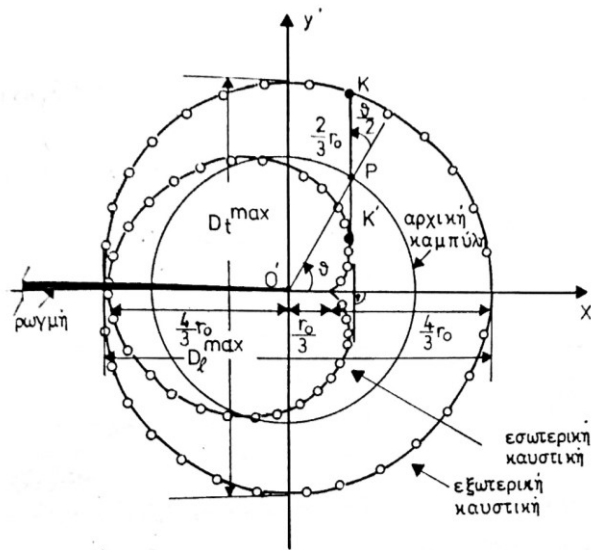
Από τις σχέσεις (3.78), (3.79), (3.99) και (3.100) υπολογίζεται ο συντελεστής έντασης των τάσεων K_I ,

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3\epsilon z_0 d \lambda_m^{3/2} c_{r,t,f}} \left(\frac{D_{l,t}^{\max}}{\delta_{l,t}^{\max}} \right)^{5/2} \quad (3.101)$$

Από τη σχέση αυτή υπολογίζεται ο συντελεστής έντασης των τάσεων K_I , για τον τύπο-I (εφελκυστικό τύπο) της παραμόρφωσης της ρωγμής, από τις διαμέτρους της καυστικής που σχηματίζεται παρά τα άκρα της ρωγμής.



Εικόνα 29 Γεωμετρική Σχεδία Καυστικής

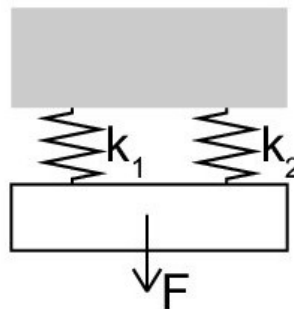


Εικόνα 30 Γεωμετρικά Στοιχεία Καυστικών

3.6.3 Η Μέθοδος των Παράλληλων Ελατηρίων

Σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη η λήψη καυστικών απευθείας από το υλικό που μελετάται, δύναται να εφαρμοστεί ένα πειραματικό μοντέλο προκειμένου να υπολογιστεί έμμεσα ο Συντελεστής Έντασης Τάσεων K_1 . Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος.

Το εν λόγω πειραματικό μοντέλο, βασίζεται στο Μοντέλο των Παράλληλων Ελατηρίων το αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 31 Διάταξη Παράλληλων Ελατηρίων

Έστω η διάταξη της Εικόνας 31, η οποία αποτελείται από δύο διαφορετικά ελατήρια στη κάτω μέρος των οποίων τοποθετείται μια πλάκα. Εάν δοθεί μετατόπιση στην πλάκα, ενώ το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, τότε η δύναμη επαναφοράς είναι η τάση του εκάστοτε ελατηρίου.

Είναι προφανές ότι, ενώ τα ελατήρια δέχονται διαφορετικές δυνάμεις εντούτοις έχουν την ίδια επιμήκυνση, έστω δ . Συνεπώς,

$$P_1 = k_1 \delta \quad (3.102)$$

$$P_2 = k_2 \delta \quad (3.103)$$

Όπου k_1, k_2 οι σταθερές του κάθε ελατηρίου. Από τις σχέσεις (3.102) και (3.103) συνεπάγεται,

$$\frac{P_1}{k_1} = \frac{P_2}{k_2} \quad (3.104)$$

Επομένως, καθώς ισχύει $P = P_1 + P_2$, μέσω της σχέσης (3.104) προκύπτει,

$$P = P_1 + P_2 = P_1 + \frac{k_2}{k_1} P_1 = \left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right) P_1 \quad (3.105)$$

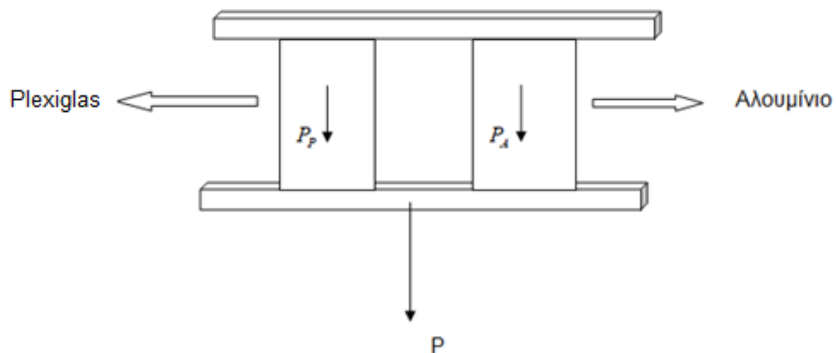
Επομένως,

$$P_1 = \left(\frac{k_1}{k_1 + k_2}\right) P \quad (3.106)$$

Και

$$P_2 = \left(\frac{k_2}{k_1 + k_2}\right) P \quad (3.107)$$

Ας υποθέσουμε τώρα ότι, το ένα ελατήριο αντικαθίσταται με δοκίμιο Plexiglas και το άλλο με το δοκίμιο του υλικού που μελετάται (στην συγκεκριμένη περίπτωση το δοκίμιο είναι κράμα Αλουμινίου).



Εικόνα 32 Αντικατάσταση Ελατηρίων με Δοκίμια

Συνεπάγεται επομένως,

$$P = P_P + P_A \quad (3.108)$$

Θεωρώντας ότι,

- t_A το πάχος του δοκιμίου κράματος αλουμινίου
- t_P το πάχος του δοκιμίου Plexiglas
- w_A το πλάτος του δοκιμίου κράματος αλουμινίου
- w_P το πλάτος του δοκιμίου Plexiglas

Προκύπτει,

$$\sigma_A = \frac{P_A}{t_A w_A} = \varepsilon E_A \quad (3.109)$$

$$\sigma_P = \frac{P_P}{t_P w_P} = \varepsilon E_P \quad (3.110)$$

Επομένως από τις (3.109) και (3.110) έχουμε,

$$\varepsilon = \frac{\sigma_A}{E_A} = \frac{P_A}{E_A t_A w_A} = \frac{\sigma_P}{E_P} = \frac{P_P}{E_P t_P w_P} \quad (3.111)$$

Και μέσω σχέσεων (3.108) και (3.111) προκύπτει,

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_P} = \frac{E_A}{E_P} \quad (3.112)$$

$$P_A = \frac{E_A t_A w_A}{E_A t_A w_A + E_P t_P w_P} P \quad (3.113)$$

$$P_P = \frac{E_P t_P w_P}{E_A t_A w_A + E_P t_P w_P} P \quad (3.114)$$

Στο προτεινόμενο μοντέλο, το Plexiglas αποτελεί το μηκυνσιόμετρο (strain gauge) από τις μετρήσεις και τις σταθερές του οποίου, υπολογίζονται οι σταθερές του αλουμινίου.

Από τους αντίστοιχους Συντελεστές Έντασης Τάσεων κατά τον Εφελκυστικό Τύπο-Ι έχουμε,

$$K_I^A = f_A \sigma_A \sqrt{\pi \alpha_A} \quad (3.115)$$

$$K_I^P = f_P \sigma_P \sqrt{\pi \alpha_P} \quad (3.116)$$

Για το δοκίμιο κράματος Αλουμινίου και Plexiglas, αντίστοιχα. Από τις σχέσεις (3.115) και (3.116) υπολογίζονται εύκολα τις τάσεις ως ακολούθως,

$$\sigma_A = \frac{K_I^A}{f_A \sqrt{\pi \alpha_A}} \quad (3.117)$$

Και

$$\sigma_P = \frac{K_I^P}{f_P \sqrt{\pi \alpha_P}} \quad (3.118)$$

Από τη σχέση (3.111) έχουμε,

$$\varepsilon = \frac{\sigma_A}{E_A} = \frac{\sigma_P}{E_P} \Rightarrow \sigma_A = \frac{E_A}{E_P} \sigma_P \quad (3.119)$$

Ενώ μέσω των (3.113) και (3.114), καταλήγουμε για τις τάσεις,

$$\sigma_A = \frac{P}{\left[\frac{E_A}{E_P} (t_A w_A) + (t_P w_P) \right]} \quad (3.120)$$

Και

$$\sigma_P = \frac{P}{\left[\frac{E_A}{E_P}(t_A w_A) + (t_P w_P)\right]} \frac{E_A}{E_P} \quad (3.121)$$

Διαιρώντας τις σχέσεις (3.115) και (3.116) καταλήγουμε στη σχέση,

$$K_1^A = K_1^P \frac{f_P \sqrt{\pi \alpha_P} E_A}{f_A \sqrt{\pi \alpha_A} E_P} \quad (3.122)$$

Από τη σχέση αυτή, γνωρίζουμε όλα τα μεγέθη ως ακολούθως,

- K_1^P , υπολογίζεται από την λαμβανομένη καυστική του Plexiglas
- f , διορθωτικός συντελεστής εξαρτώμενος από την γεωμετρία της πλάκας. Ο διορθωτικός συντελεστής f είναι συνάρτηση του λόγου $\frac{a}{w}$. Για πλάκα σε εφελκυσμό πλάτους w , μήκους $2h$, πάχους t και με μια ακραία ρωγμή μήκους a , ο διορθωτικός συντελεστής f προκύπτει από τις σχέσεις:

$$\text{➤} \quad f = 1.12 \text{ για } \frac{a}{w} \leq 0.13 \text{ και όριο ακρίβειας } 10\%$$

$$\text{➤} \quad f = 0.265 \left(1 - \left(\frac{a}{w}\right)^4\right) + \frac{0.857 + 0.265 \left(\frac{a}{w}\right)}{\left(1 - \left(\frac{a}{w}\right)\right)^{3/2}} \text{ για } \left(\frac{h}{w}\right) \geq 1 \text{ και οποιοδήποτε } \left(\frac{a}{w}\right)$$

- α_P, α_A το μήκος της ρωγμής για το δοκίμιο υλικού Plexiglas και Αλουμινίου αντίστοιχα
- E_A, E_P το Μέτρο Ελαστικότητας για το δοκίμιο υλικού Plexiglas και Αλουμινίου αντίστοιχα.

Επομένως, με βάση τα ανωτέρω, είναι πλέον εφικτός ο υπολογισμός του Συντελεστή Έντασης Τάσεων για το αλουμίνιο K_1^A .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει εκτενής αναφορά στην διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να προκύψουν τα πειραματικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους τα ακόλουθα:

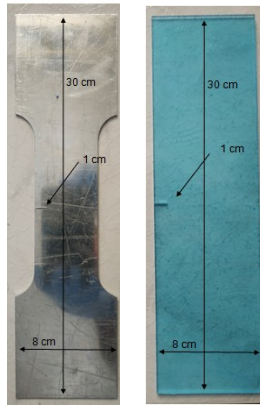
- Κατασκευή Δοκιμίων
- Πειραματική Διάταξη
- Πειραματική Επίλυση
- Θεωρητική Επίλυση
- Παρουσίαση Αποτελεσμάτων
- Ανάλυση Αποτελεσμάτων

4.2 Κατασκευή Δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, στην παρούσα διπλωματική εργασία εφαρμόζεται η μέθοδος των παράλληλων ελατηρίων. Τον ρόλο των ελατηρίων, τον διαδραματίζουν ένα κομμάτι υλικού Plexiglas και το κομμάτι αλουμινίου που μελετάται. Τα εν λόγω υλικά, αφενός θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις, και αφετέρου να διασφαλίζεται ότι είναι κατάλληλα ενωμένα προκειμένου κατά την διαδικασία του εφελκυσμού να επιμηκύνονται το ίδιο και να μην υπάρχουν θέματα αποκολλήσεων μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό, ανατήχθηκαν τα ακόλουθα στάδια.

Στάδιο Πρώτο

Προκειμένου να δοθούν οι κατάλληλες διαστάσεις στα δύο υλικά, χρησιμοποιήθηκαν μηχανήματα όπως κορδέλα κοπής και πρέσα. Τα δοκίμια που προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 33.

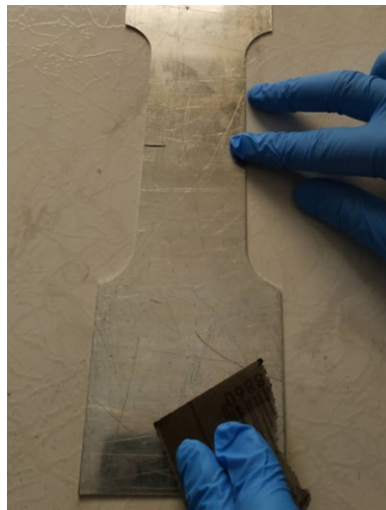


Εικόνα 33 Δοκίμια Αλουμινίου και Plexiglas

Οι διαστάσεις των δοκιμίων όπως διαφαίνεται, είναι ύψος $2h=30$ cm, πλάτος $w=8$ cm ενώ για το Plexiglas το πάχος παραμένει σταθερό $t=3$ mm. Επιπρόσθετα, στο μέσο του ύψους υπάρχει ρωγμής μήκους 1 cm.

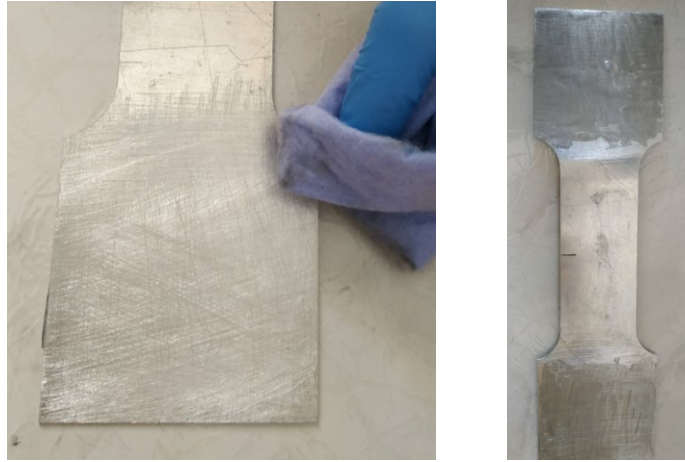
Στάδιο Δεύτερο

Στην συνέχεια, τα δοκίμια ενώνονται με κόλλα δύο συστατικών. Προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη κόλληση, οι επιφάνειες ένωσης υφίστανται επεξεργασία με τη χρήση γυαλόχαρτου όπως φαίνεται στην κάτωθι εικόνα.



Εικόνα 34 Τρίψιμο Περιοχής Κόλλησης Με Υαλόχαρτο

Στην συνέχεια, αφού καθαριστούν οι τριμμένες επιφάνειες, τοποθετείται επαρκής ποσότητα κόλλας και ενώνονται τα δοκίμια.



Εικόνα 35 Καθαρισμός Περιοχής και Τοποθέτηση Κόλλας

Στάδιο Τρίτο

Με σκοπό την δημιουργία ενός δοκιμίου, το οποίο θα διατηρεί τα επιμέρους δοκίμια ενωμένα σε κάθε φάση του πειράματος, κρίθηκε σκόπιμο να τοποθετηθούν ήλοι στα άνω και κάτω μέρη. Η διαδικασία αυτή, απαιτεί αρκετό χρόνο και ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να μην δημιουργηθούν ρωγμές στις περιοχές ένωσης. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ειδικό τρυπάνι αέρος και μηχανουργική φρέζα.



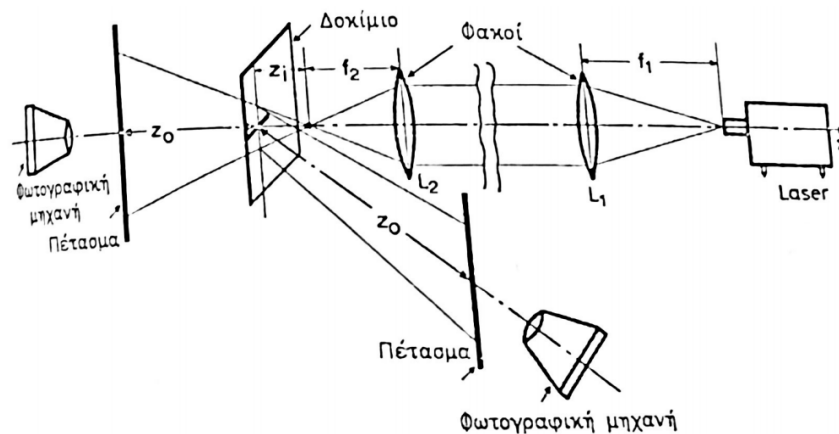
Εικόνα 36 Πιστόλι Αέρος για τη Δημιουργία Οπών



Εικόνα 37 Δημιουργία Οπών για τοποθέτηση Ύλων

4.3 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των καυστικών παρουσιάζεται στην κάτωθι εικόνα,

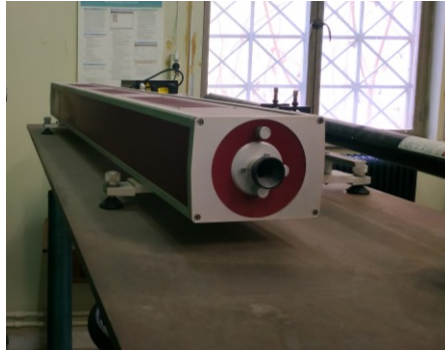


Εικόνα 38 Διάταξη για Λήψη Καυστικών

Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελείται από:

- Πηγή Φωτός-Laser
- Ειδικό φίλτρο για το άνοιγμα της συνεκτικής δέσμης τους laser

- Δυο συγκλίνοντες οπτικοί φακοί εστιακής απόστασης $f = 1\text{ m}$ για να δημιουργηθεί συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα φωτεινή δέσμη
- Ένα πέτασμα αναφοράς, θαμπόγυαλο, πάνω στο οποίο προβάλλονται οι σχηματιζόμενες καυστικές
- Φωτογραφική Μηχανή για τη λήψη των καυστικών



Εικόνα 39 (α) Συγκλίνων οπτικός φακός (β) Πηγή Φωτός-Laser με Ειδικό Φίλτρο (γ) Πέτασμα Αναφοράς

Κατά την πειραματική διαδικασία, το πέτασμα αναφοράς, τοποθετήθηκε μπροστά από το δοκίμιο σε απόσταση z_0 , στο οποίο εμφανίστηκαν οι καυστικές καμπύλες εξ ανακλάσεως.

Η εστία της φωτεινής δέσμης τοποθετήθηκε μπροστά από το δοκίμιο σε απόσταση z_i . Λόγω του ότι το Plexiglas είναι διαφανές υλικό η εστία τοποθετείται μπροστά από το δοκίμιο με αποτέλεσμα να έχουμε αποκλίνουσα δέσμη.

Η οπτική διάταξη έχει συντελεστή μεγέθυνσης λ_m , ο οποίος υπολογίζεται γεωμετρικά, σύμφωνα με τη γεωμετρική οπτική. Πιο συγκεκριμένα, για αποκλίνουσα δέσμη ο συντελεστής μεγέθυνσης είναι:

$$\lambda_m = \frac{z_0 + z_i}{z_i}$$

Οι πειραματικές καυστικές καμπύλες ελήφθησαν με διάταξη αποκλίνουσας φωτεινής δέσμης και προέκυψαν από την ανάκλαση των φωτεινών ακτινών από την εμπρός και την όπισθεν επιφάνεια του δοκιμίου (ανοικτή καυστική). Η κλειστή καυστική παραμένει απλή διότι οι ανακλώμενες ακτίνες από τις οποίες σχηματίζεται εξαρτώνται από τη μεταβολή του δείκτη διαθλάσεως του υλικού.

4.4 Πειραματικά Αποτελέσματα

Οι τασεοπτικές σταθερές του υλικού του δοκιμίου Plexiglas είναι γνωστές από πειραματικά δεδομένα και δίδονται στον παρακάτω πίνακα. Επιπλέον, οι τασεοπτικές σταθερές για κάθε τύπο αλουμινίου παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

Plexiglas	
Στατικές Τιμές	Δυναμικές Τιμές
$\nu^s = 0.34$	$\nu^d = 0.34$
$E^s = 3.4GPa$	$E^d = 4.3GPa$
$c_f^s = \frac{\nu^s}{E^s} = 10^{-10} \frac{m^2}{N}$	$c_f^d = \frac{\nu^d}{E^d} = 0.79 \times 10^{-10} \frac{m^2}{N}$
$c_t^s = -1.21 \times 10^{-10} \frac{m^2}{N}$	$c_t^d = -0.74 \times 10^{-10} \frac{m^2}{N}$
$c_r^s = -1.7 \times 10^{-10} \frac{m^2}{N}$	$c_r^d = -1.13 \times 10^{-10} \frac{m^2}{N}$

Πίνακας 1 Τασεοπτικές Σταθερές του πλαστικού Plexiglas

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέσω μηχανικής διάταξης επιβολής φορτίου. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα δοκίμια επιμηκύνονται κάτω από την επίδραση μονοαξονικής τάσης, με σταθερή ταχύτητα.



Εικόνα 40 Δοκίμιο σε Εφελκυστική Καταπόνηση

Για κάθε βήμα φόρτισης λήφθηκε η αντίστοιχη φωτογραφία της καυστικής καμπύλης που αποτυπώθηκε πάνω στο πέτασμα. Με την βοήθεια του «μάρτυρα» μήκους 2cm που βρίσκεται στο πέτασμα, προχωρούμε στον υπολογισμό της διαμέτρου της αντίστοιχης καυστικής καμπύλης σε κάθε μέτρηση.

Πιο συγκεκριμένα, μετρώντας την εγκάρσια διάμετρο της καυστικής καμπύλης καθώς και το μήκος του μάρτυρα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD και λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό μήκος του μάρτυρα, υπολογίζεται το πραγματικό μήκος της εγκάρσιας διαμέτρου της καυστικής καμπύλης.

Επομένως, είναι πλέον εφικτή η εύρεση του πειραματικού συντελεστή εντάσεως των τάσεων K_I για το Plexiglas, με χρήση του πειραματικού τύπου I (εφελκυστικό τύπο),

$$K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3\varepsilon z_0 d \lambda_m^{3/2} c_r} \left(\frac{D_t^{\max}}{\delta_t^{\max}} \right)^{5/2}$$

Όπου,

- $\varepsilon = 2$, καθώς μελετούμε την πρώτη ανακλώμενη ακτίνα από την πίσω επιφάνεια της πλάκας
- $z_0 = 1.9m$, η απόσταση πετάσματος-δοκιμίου

- $z_i = 0.335 \text{ m}$, η απόσταση της εστίας-δοκιμίου
- $d = 0.003 \text{ m}$, το πάχος του δοκιμίου Plexiglas
- $c_r^s = -1.7 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$
- $\delta_i^{\max} = 3.1702$, συντελεστής διόρθωσης
- D_i^{\max} , η εγκάρσια διάμετρος της καυστικής καμπύλης

Έχοντας υπολογίσει για κάθε φόρτιση τον πειραματικό συντελεστή εντάσεως των τάσεων K_I για το Plexiglas, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τον συντελεστή εντάσεως των τάσεων K_I για το εκάστοτε Αλουμίνιο. Χρησιμοποιώντας την θεωρία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα ισχύει

$$K_I^A = K_I^P \frac{f_P \sqrt{\pi \alpha_P} E_A}{f_A \sqrt{\pi \alpha_A} E_P}$$

Αναφερόμενοι στις τάσεις που αναπτύσσονται στα επιμέρους υλικά του δοκιμίου σε κάθε φόρτιση, είχε αναφερθεί ότι το φορτίο P που ασκείται κατανέμεται ως ακολούθως,

$$P_A = \frac{E_A t_A w_A}{E_A t_A w_A + E_P t_P w_P} P$$

$$P_P = \frac{E_P t_P w_P}{E_A t_A w_A + E_P t_P w_P} P$$

Όπου,

- P , η φόρτιση που λαμβάνει το δοκίμιο
- P_A, P_P η φόρτιση που λαμβάνει το Αλουμίνιο και το Plexiglas αντίστοιχα
- E_A, E_P το μέτρο Ελαστικότητας για το Αλουμίνιο και το Plexiglas αντίστοιχα

- w_A, w_P το πλάτος δοκιμίου για το Αλουμίνιο και το Plexiglas αντίστοιχα
- t_A, t_P το πάχος δοκιμίου για το Αλουμίνιο και το Plexiglas αντίστοιχα

Έχοντας υπολογίσει τις επιμέρους φορτίσεις, είναι εφικτός ο υπολογισμός των τάσεων για κάθε υλικό, εφαρμόζοντας την σχέση

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Όπου,

- P η φόρτιση που λαμβάνει κάθε υλικό
- $A = w \cdot t$, το εμβαδόν διατομής για κάθε υλικό

Συνεπώς, πλέον, μπορούμε να γνωρίζουμε σε κάθε φόρτιση, τον πειραματικό συντελεστή εντάσεως των τάσεων K_I καθώς και τις τάσεις που αναπτύσσονται για κάθε υλικό.

4.5 Θεωρητική Επίλυση

Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων K_I δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

Όπου,

- f , διορθωτικός συντελεστής εξαρτώμενος από την γεωμετρία της πλάκας. Ο διορθωτικός συντελεστής f είναι συνάρτηση του λόγου $\frac{a}{w}$. Για πλάκα σε εφελκυσμό πλάτους w , μήκους $2h$, πάχους t και με μια ακραία ρωγμή μήκους a , ο διορθωτικός συντελεστής f προκύπτει από τις σχέσεις:

➤ $f = 1.12$ για $\frac{a}{w} \leq 0.13$ και όριο ακρίβειας 10%

➤ $f = 0.265(1 - (\frac{a}{w})^4) + \frac{0.857 + 0.265(\frac{a}{w})}{(1 - (\frac{a}{w}))^{3/2}}$ για $(\frac{h}{w}) \geq 1$ και οποιοδήποτε $(\frac{a}{w})$

- σ , η τάση που αναπτύσσεται σε κάθε υλικό σε κάθε φόρτιση.

Από την προηγούμενη παράγραφο, έχοντας υπολογίσει τις τάσεις κάθε υλικού σε κάθε φόρτιση, είναι δυνατός ο υπολογισμός του θεωρητικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων.

4.6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στην παρούσα παράγραφο, θα γίνει αναφορά στα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη των κάτωθι δοκιμών:

- Aluminum 2024-T3 (πάχους 0.75 mm) -Plexiglas
- Aluminum 2024-T3 (πάχους 1 mm) -Plexiglas
- Aluminum 2024-O (πάχους 1 mm) -Plexiglas
- Aluminum 7075-T6 (πάχους 0.6 mm) -Plexiglas
- Aluminum 7075-T6 (πάχους 1.5 mm) -Plexiglas
- Aluminum 7075-T6 (πάχους 1.75 mm) -Plexiglas
- Aluminum 7075-O (πάχους 1.25 mm) -Plexiglas

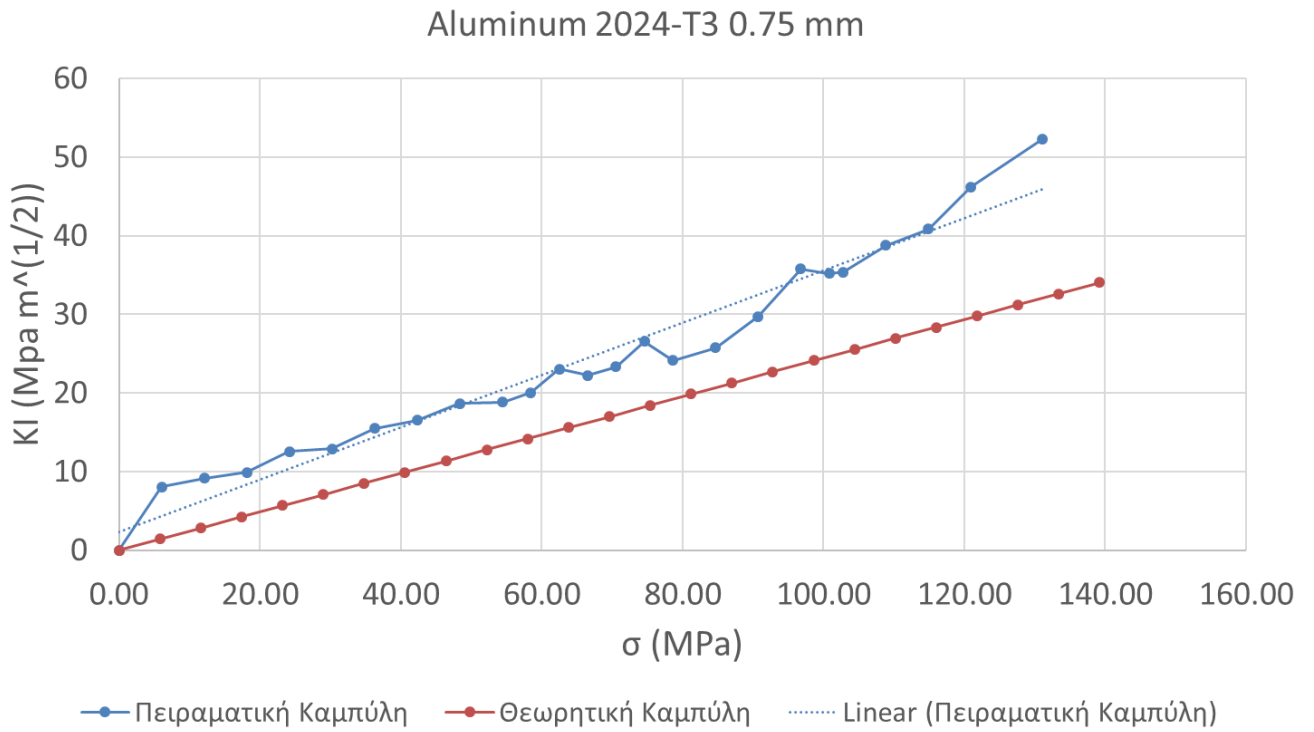
4.6.1 Δοκίμιο Aluminum 2024-T3 (πάχους 0.75 mm) –Plexiglas

Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 2024 -T3
Πάχος -t (m)	0.003	0.00075
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	73.1
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	$10^{(-10)}$	$4.51 \times 10^{(-12)}$
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	$1.7 \times 10^{(-10)}$	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμίων Plexiglas και Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 0.75 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglas (Mpa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (Mpa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglas)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglas)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0	0.0000	0.00	0.00000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	30	0.0295	0.42	8.07543	67.51	226.79	0.28	6.05	294.3
3	60	0.0310	0.47	9.14144	135.02	453.58	0.56	12.10	588.6
4	90	0.0320	0.51	9.89659	202.53	680.37	0.84	18.14	882.9
5	120	0.0352	0.65	12.53784	270.04	907.16	1.13	24.19	1177.2
6	150	0.0356	0.67	12.90506	337.55	1133.95	1.41	30.24	1471.5
7	180	0.0383	0.80	15.51983	405.06	1360.74	1.69	36.29	1765.8
8	210	0.0393	0.86	16.54030	472.57	1587.53	1.97	42.33	2060.1
9	240	0.0412	0.97	18.65654	540.08	1814.32	2.25	48.38	2354.4
10	270	0.0414	0.98	18.84932	607.59	2041.11	2.53	54.43	2648.7
11	290	0.0425	1.04	20.07242	652.59	2192.31	2.72	58.46	2844.9
12	310	0.0449	1.19	23.04327	697.60	2343.50	2.91	62.49	3041.1
13	330	0.0442	1.15	22.24374	742.61	2494.69	3.09	66.53	3237.3
14	350	0.0451	1.21	23.33483	787.61	2645.89	3.28	70.56	3433.5
15	370	0.0475	1.38	26.56712	832.62	2797.08	3.47	74.59	3629.7
16	390	0.0457	1.25	24.14017	877.63	2948.27	3.66	78.62	3825.9
17	420	0.0469	1.33	25.73136	945.14	3175.06	3.94	84.67	4120.2
18	450	0.0497	1.54	29.73948	1012.65	3401.85	4.22	90.72	4414.5
19	480	0.0535	1.85	35.80334	1080.15	3628.65	4.50	96.76	4708.8
20	500	0.0532	1.82	35.20999	1125.16	3779.84	4.69	100.80	4905
21	510	0.0533	1.83	35.35163	1147.66	3855.44	4.78	102.81	5003.1
22	540	0.0553	2.01	38.78383	1215.17	4082.23	5.06	108.86	5297.4
23	570	0.0564	2.12	40.86562	1282.68	4309.02	5.34	114.91	5591.7
24	600	0.0593	2.39	46.22943	1350.19	4535.81	5.63	120.95	5886
25	650	0.0623	2.70	52.23467	1462.71	4913.79	6.09	131.03	6376.5
26	670	n/a	n/a	n/a	1507.72	5064.98	6.28	135.07	6572.7

Πίνακας 3 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 0.75 mm)



Εικόνα 41 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 0.75 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση σημειώθηκε στο Plexiglas όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 670 kg. Αμέσως μετά τη θραύση, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 575 kg.

4.6.2 Δοκίμιο Aluminum 2024-T3 (πάχους 1 mm) -Plexiglas

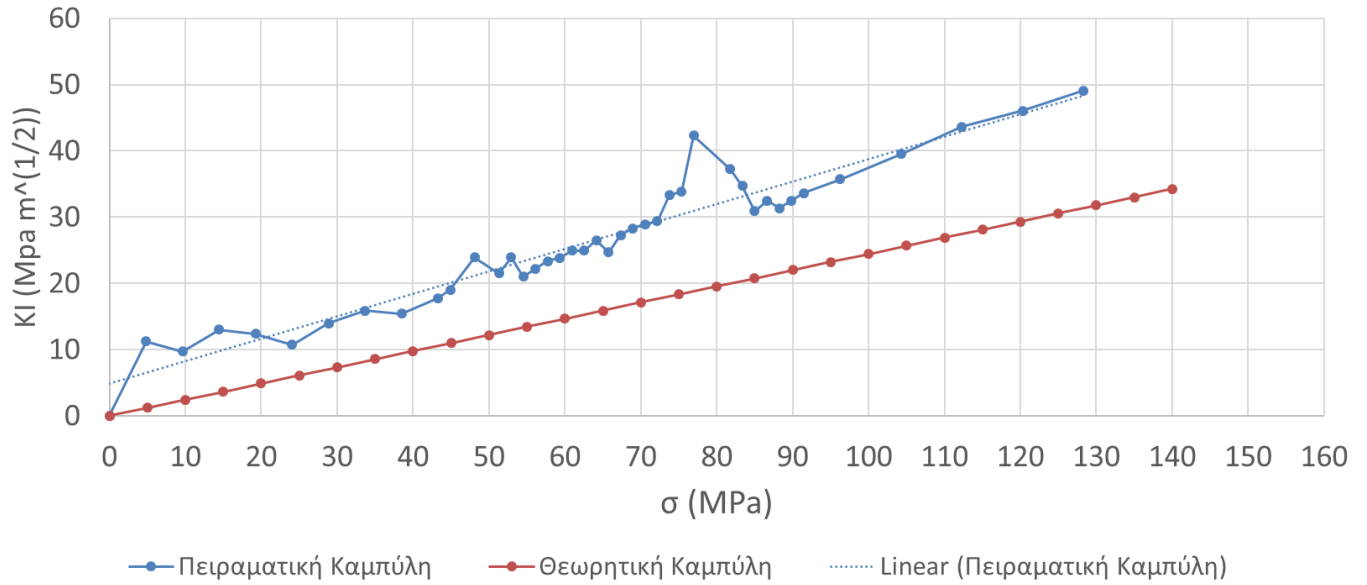
Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 2024 -T3
Πάχος -t (m)	0.003	0.0001
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	73.1
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	10^{-10}	4.51×10^{-12}
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	1.7×10^{-10}	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμίων Plexiglas και Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 1 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglas (Mpa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (Mpa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglas)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglas)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0.0	0.0000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	30.0	0.03365	0.58	11.220	53.71	240.59	0.22	4.81	294.3
3	60.0	0.03182	0.51	9.757	107.43	481.17	0.45	9.62	588.6
4	90.0	0.03571	0.67	13.023	161.14	721.76	0.67	14.44	882.9
5	120.0	0.03500	0.64	12.382	214.85	962.35	0.90	19.25	1177.2
6	150.0	0.03304	0.56	10.723	268.56	1202.94	1.12	24.06	1471.5
7	180.0	0.03673	0.72	13.966	322.28	1443.52	1.34	28.87	1765.8
8	210.0	0.03867	0.82	15.884	375.99	1684.11	1.57	33.68	2060.1
9	240.0	0.03819	0.80	15.403	429.70	1924.70	1.79	38.49	2354.4
10	270.0	0.04046	0.92	17.787	483.41	2165.29	2.01	43.31	2648.7
11	280.0	0.04157	0.99	19.039	501.32	2245.48	2.09	44.91	2746.8
12	300.0	0.04556	1.24	23.941	537.13	2405.87	2.24	48.12	2943
13	320.0	0.04364	1.11	21.490	572.93	2566.27	2.39	51.33	3139.2
14	330.0	0.04553	1.24	23.904	590.84	2646.46	2.46	52.93	3237.3
15	340.0	0.04323	1.09	20.990	608.74	2726.66	2.54	54.53	3335.4
16	350.0	0.04420	1.15	22.187	626.65	2806.85	2.61	56.14	3433.5
17	360.0	0.04513	1.21	23.381	644.55	2887.05	2.69	57.74	3531.6
18	370.0	0.04551	1.24	23.872	662.45	2967.25	2.76	59.34	3629.7
19	380.0	0.04633	1.29	24.963	680.36	3047.44	2.83	60.95	3727.8
20	390.0	0.04629	1.29	24.909	698.26	3127.64	2.91	62.55	3825.9
21	400.0	0.04745	1.37	26.495	716.17	3207.83	2.98	64.16	3924
22	410.0	0.04612	1.28	24.676	734.07	3288.03	3.06	65.76	4022.1
23	420.0	0.04800	1.41	27.272	751.98	3368.22	3.13	67.36	4120.2
24	430.0	0.04870	1.46	28.277	769.88	3448.42	3.21	68.97	4218.3
25	440.0	0.04913	1.50	28.906	787.78	3528.62	3.28	70.57	4316.4
26	450.0	0.04944	1.52	29.370	805.69	3608.81	3.36	72.18	4414.5
27	460.0	0.05200	1.72	33.313	823.59	3689.01	3.43	73.78	4512.6
28	470.0	0.05236	1.75	33.886	841.50	3769.20	3.51	75.38	4610.7
29	480.0	0.05722	2.19	42.312	859.40	3849.40	3.58	76.99	4708.8
30	510.0	0.05436	1.93	37.217	913.11	4089.99	3.80	81.80	5003.1
31	520.0	0.05287	1.80	34.724	931.02	4170.18	3.88	83.40	5101.2
32	530.0	0.05048	1.60	30.926	948.92	4250.38	3.95	85.01	5199.3
33	540.0	0.05147	1.68	32.469	966.83	4330.57	4.03	86.61	5297.4
34	550.0	0.05076	1.62	31.357	984.73	4410.77	4.10	88.22	5395.5
35	560.0	0.05147	1.68	32.469	1002.63	4490.97	4.18	89.82	5493.6
36	570.0	0.05220	1.74	33.640	1020.54	4571.16	4.25	91.42	5591.7
37	600.0	0.05347	1.85	35.710	1074.25	4811.75	4.48	96.23	5886
38	650.0	0.05568	2.05	39.530	1163.77	5212.73	4.85	104.25	6376.5
39	700.0	0.05794	2.26	43.651	1253.29	5613.71	5.22	112.27	6867
40	750.0	0.05920	2.38	46.062	1342.81	6014.69	5.60	120.29	7357.5
41	800.0	0.06071	2.54	49.072	1432.33	6415.67	5.97	128.31	7848
42	840.0	n/a	n/a	n/a	1503.95	6736.45	6.27	134.73	8240.4

Πίνακας 5 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 1 mm)

Aluminum 2024-T3 1mm



Εικόνα 42 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 2024-T3 (πάχους 1 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση σημειώθηκε στο Plexiglas όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 840 kg. Αμέσως μετά τη θραύση, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 740 kg.

4.6.3 Δοκίμιο Aluminum 2024-O (πάχους 1 mm) -Plexiglas

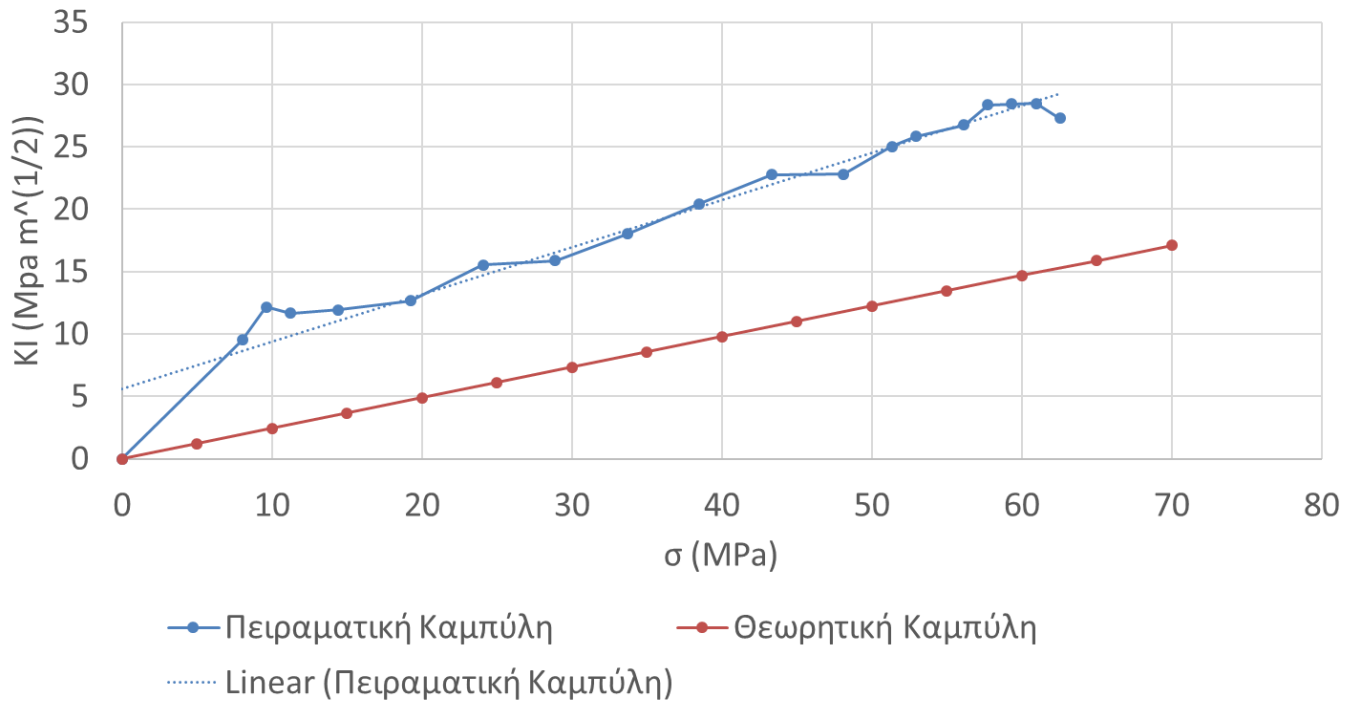
Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 2024 -O
Πάχος -t (m)	0.003	0.001
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	73.1
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	10^{-10}	4.51×10^{-12}
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	1.7×10^{-10}	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμίων Plexiglas και Αλουμινίου 2024-O (πάχους 1 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglass (MPa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (MPa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglass)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglass)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0	0.00000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	50	0.03152	0.49	9.530	89.52	400.98	0.37	8.02	490.5
3	60	0.03475	0.63	12.160	107.43	481.17	0.45	9.62	588.6
4	70	0.03420	0.60	11.683	125.33	561.37	0.52	11.23	686.7
5	90	0.03448	0.62	11.926	161.14	721.76	0.67	14.44	882.9
6	120	0.03530	0.65	12.651	214.85	962.35	0.90	19.25	1177.2
7	150	0.03833	0.80	15.544	268.56	1202.94	1.12	24.06	1471.5
8	180	0.03865	0.82	15.869	322.28	1443.52	1.34	28.87	1765.8
9	210	0.04068	0.93	18.031	375.99	1684.11	1.57	33.68	2060.1
10	240	0.04275	1.06	20.420	429.70	1924.70	1.79	38.49	2354.4
11	270	0.04466	1.18	22.767	483.41	2165.29	2.01	43.31	2648.7
12	300	0.04469	1.18	22.812	537.13	2405.87	2.24	48.12	2943
13	320	0.04637	1.30	25.019	572.93	2566.27	2.39	51.33	3139.2
14	330	0.04698	1.34	25.850	590.84	2646.46	2.46	52.93	3237.3
15	350	0.04762	1.38	26.740	626.65	2806.85	2.61	56.14	3433.5
16	360	0.04876	1.47	28.359	644.55	2887.05	2.69	57.74	3531.6
17	370	0.04882	1.47	28.449	662.45	2967.25	2.76	59.34	3629.7
18	380	0.04882	1.47	28.457	680.36	3047.44	2.83	60.95	3727.8
19	390	0.04800	1.41	27.272	698.26	3127.64	2.91	62.55	3825.9
20	410	n/a	n/a	n/a	734.07	3288.03	3.06	65.76	4022.1

Πίνακας 7 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 2024-Ο (πάχους 1 mm)

Aluminum 2024-O 1mm



Εικόνα 43 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 2024-O (πάχους 1 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση σημειώθηκε στο Plexiglas όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 410 kg. Αμέσως μετά τη θραύση, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 308 kg.

4.6.4 Δοκίμιο Aluminum 7075-T6 (πάχους 0.6 mm) –Plexiglas

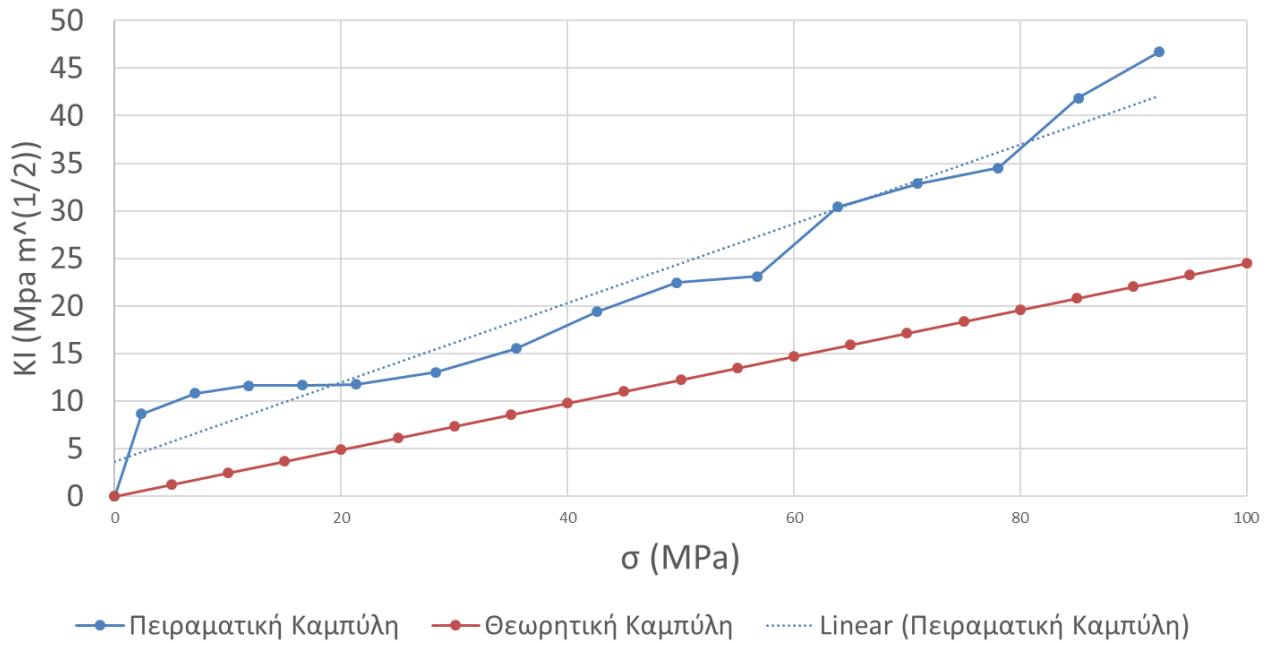
Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 7075-T6
Πάχος -t (m)	0.003	0.0006
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	71.1
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	10^{-10}	4.64×10^{-12}
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	1.7×10^{-10}	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμών Plexiglas και Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 0.6 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglas (MPa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (MPa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglas)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglas)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0	0.00000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	10	0.03069	0.46	8.673	27.14	70.96	0.11	2.37	98.1
3	30	0.03351	0.58	10.805	81.43	212.87	0.34	7.10	294.3
4	50	0.03449	0.62	11.608	135.72	354.78	0.57	11.83	490.5
5	70	0.03455	0.62	11.664	190.01	496.69	0.79	16.56	686.7
6	90	0.03467	0.63	11.758	244.30	638.60	1.02	21.29	882.9
7	120	0.03613	0.69	13.038	325.74	851.46	1.36	28.38	1177.2
8	150	0.03874	0.83	15.521	407.17	1064.33	1.70	35.48	1471.5
9	180	0.04234	1.03	19.389	488.60	1277.20	2.04	42.57	1765.8
10	210	0.04491	1.20	22.461	570.04	1490.06	2.38	49.67	2060.1
11	240	0.04541	1.23	23.096	651.47	1702.93	2.71	56.76	2354.4
12	270	0.05068	1.62	30.392	732.91	1915.79	3.05	63.86	2648.7
13	300	0.05231	1.75	32.883	814.34	2128.66	3.39	70.96	2943
14	330	0.05333	1.84	34.519	895.77	2341.53	3.73	78.05	3237.3
15	360	0.05761	2.23	41.864	977.21	2554.39	4.07	85.15	3531.6
16	390	0.06020	2.49	46.726	1058.64	2767.26	4.41	92.24	3825.9
17	420	n/a	n/a	n/a	1140.08	2980.12	4.75	99.34	4120.2

Πίνακας 9 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 0.6 mm)

Aluminum 7075-T6 0.6mm



Εικόνα 44 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 0.6 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση σημειώθηκε στο Plexiglas όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 420 kg. Αμέσως μετά τη θραύση, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 330 kg.

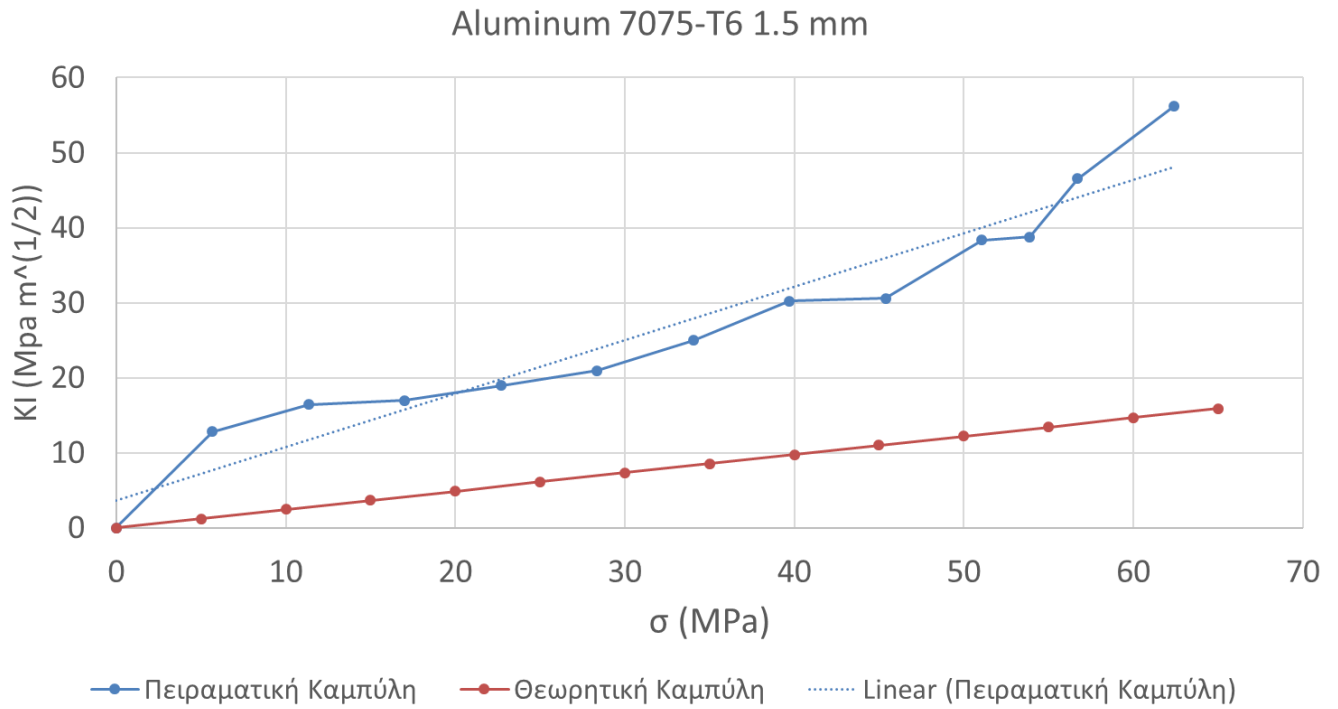
4.6.5 Δοκίμιο Aluminum 7075-T6 (πάχους 1.5 mm) -Plexiglas

Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 7075-T6
Πάχος -t (m)	0.003	0.0015
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	71.1
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	10^{-10}	4.64×10^{-12}
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	1.7×10^{-10}	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμίων Plexiglas και Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.5 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglas (Mpa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (Mpa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglas)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglas)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0.00	0.00000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	50.00	0.03592	0.68	12.849	65.10	425.40	0.27	5.67	490.5
3	100.00	0.03965	0.88	16.449	130.19	850.81	0.54	11.34	981
4	150.00	0.04013	0.90	16.951	195.29	1276.21	0.81	17.02	1471.5
5	200.00	0.04199	1.01	18.982	260.39	1701.61	1.08	22.69	1962
6	250.00	0.04368	1.12	20.957	325.48	2127.02	1.36	28.36	2452.5
7	300.00	0.04687	1.33	24.986	390.58	2552.42	1.63	34.03	2943
8	350.00	0.05056	1.61	30.199	455.68	2977.82	1.90	39.70	3433.5
9	400.00	0.05081	1.63	30.586	520.77	3403.23	2.17	45.38	3924
10	450.00	0.05563	2.04	38.351	585.87	3828.63	2.44	51.05	4414.5
11	475.00	0.05586	2.06	38.758	618.42	4041.33	2.58	53.88	4659.75
12	500.00	0.06011	2.48	46.553	650.97	4254.03	2.71	56.72	4905
13	550.00	0.06479	2.99	56.151	716.07	4679.43	2.98	62.39	5395.5
14	600.00	n/a	n/a	n/a	781.16	5104.84	3.25	68.06	5886

Πίνακας 11 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.5 mm)



Εικόνα 45 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.5 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση σημειώθηκε στο Plexiglas όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 600 kg. Αμέσως μετά τη θραύση, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 520 kg.

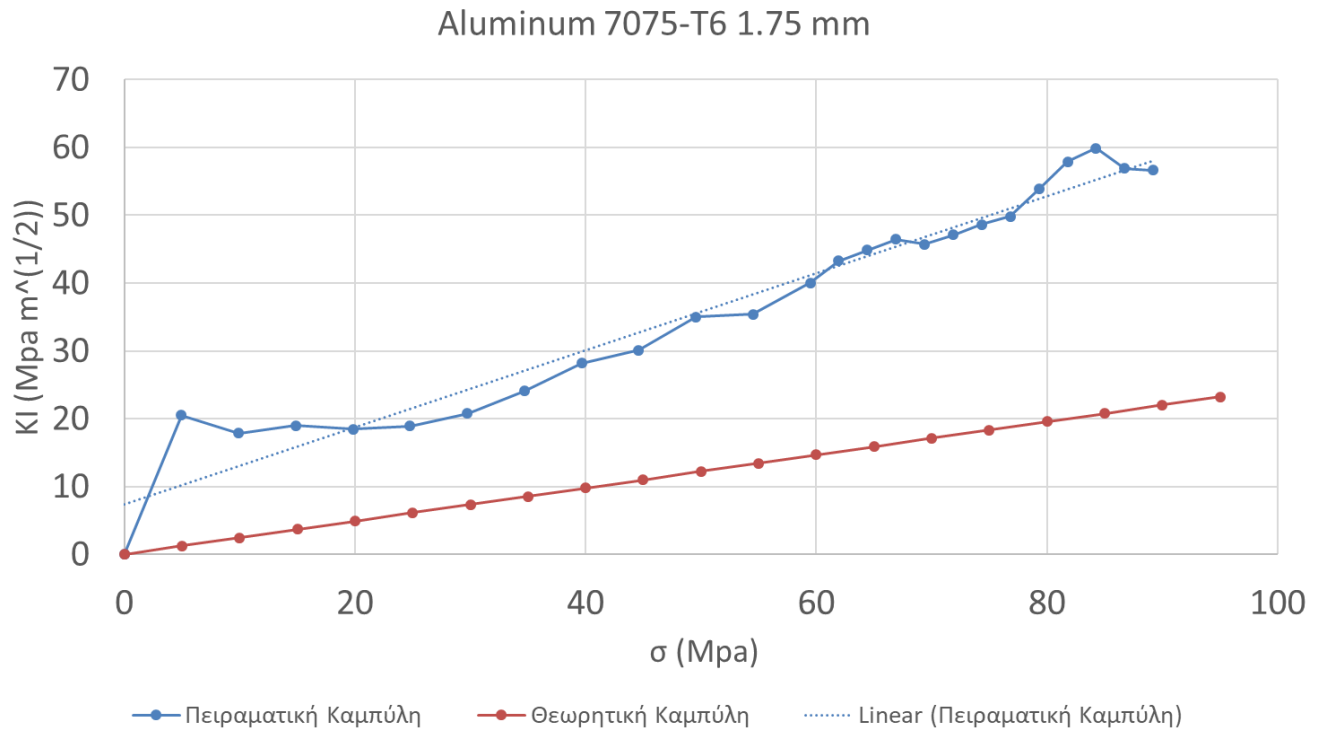
4.6.6 Aluminum 7075-T6 (πάχους 1.75 mm) -Plexiglas

Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 7075-T6
Πάχος -t (m)	0.003	0.00175
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	71.1
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	$10^{(-10)}$	$4.64 \times 10^{(-12)}$
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	$1.7 \times 10^{(-10)}$	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 12 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμίων Plexiglas και Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.75 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglas (Mpa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (Mpa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglas)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglass)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0.00	0.00000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	50.00	0.04330	1.09	20.497	56.88	433.62	0.24	4.96	490.5
3	100.00	0.04098	0.95	17.867	113.75	867.25	0.47	9.91	981
4	150.00	0.04198	1.01	18.978	170.63	1300.87	0.71	14.87	1471.5
5	200.00	0.04149	0.98	18.424	227.50	1734.50	0.95	19.82	1962
6	250.00	0.04192	1.01	18.906	284.38	2168.12	1.18	24.78	2452.5
7	300.00	0.04350	1.10	20.739	341.25	2601.75	1.42	29.73	2943
8	350.00	0.04619	1.28	24.100	398.13	3035.37	1.66	34.69	3433.5
9	400.00	0.04918	1.50	28.191	455.01	3468.99	1.90	39.65	3924
10	450.00	0.05049	1.60	30.103	511.88	3902.62	2.13	44.60	4414.5
11	500.00	0.05362	1.86	34.977	568.76	4336.24	2.37	49.56	4905
12	550.00	0.05388	1.88	35.414	625.63	4769.87	2.61	54.51	5395.5
13	600.00	0.05657	2.13	39.996	682.51	5203.49	2.84	59.47	5886
14	625.00	0.05837	2.30	43.253	710.95	5420.30	2.96	61.95	6131.25
15	650.00	0.05923	2.39	44.868	739.38	5637.12	3.08	64.42	6376.5
16	675.00	0.06007	2.47	46.466	767.82	5853.93	3.20	66.90	6621.75
17	700.00	0.05969	2.43	45.740	796.26	6070.74	3.32	69.38	6867
18	725.00	0.06041	2.51	47.136	824.70	6287.55	3.44	71.86	7112.25
19	750.00	0.06116	2.59	48.612	853.13	6504.37	3.55	74.34	7357.5
20	775.00	0.06176	2.65	49.819	881.57	6721.18	3.67	76.81	7602.75
21	800.00	0.06371	2.87	53.847	910.01	6937.99	3.79	79.29	7848
22	825.00	0.06559	3.08	57.897	938.45	7154.80	3.91	81.77	8093.25
23	850.00	0.06647	3.19	59.863	966.89	7371.61	4.03	84.25	8338.5
24	875.00	0.06513	3.03	56.891	995.32	7588.43	4.15	86.72	8583.75
25	900.00	0.06502	3.01	56.652	1023.76	7805.24	4.27	89.20	8829
26	925.00	n/a	n/a	n/a	1052.20	8022.05	4.38	91.68	9074.25

Πίνακας 13 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.75 mm)



Εικόνα 46 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-T6 (πάχους 1.75 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση σημειώθηκε στο Plexiglas όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 925 kg. Αμέσως μετά τη θραύση, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 850 kg.

4.6.7 Δοκίμιο Aluminum 7075-O (πάχους 1.25 mm) -Plexiglas

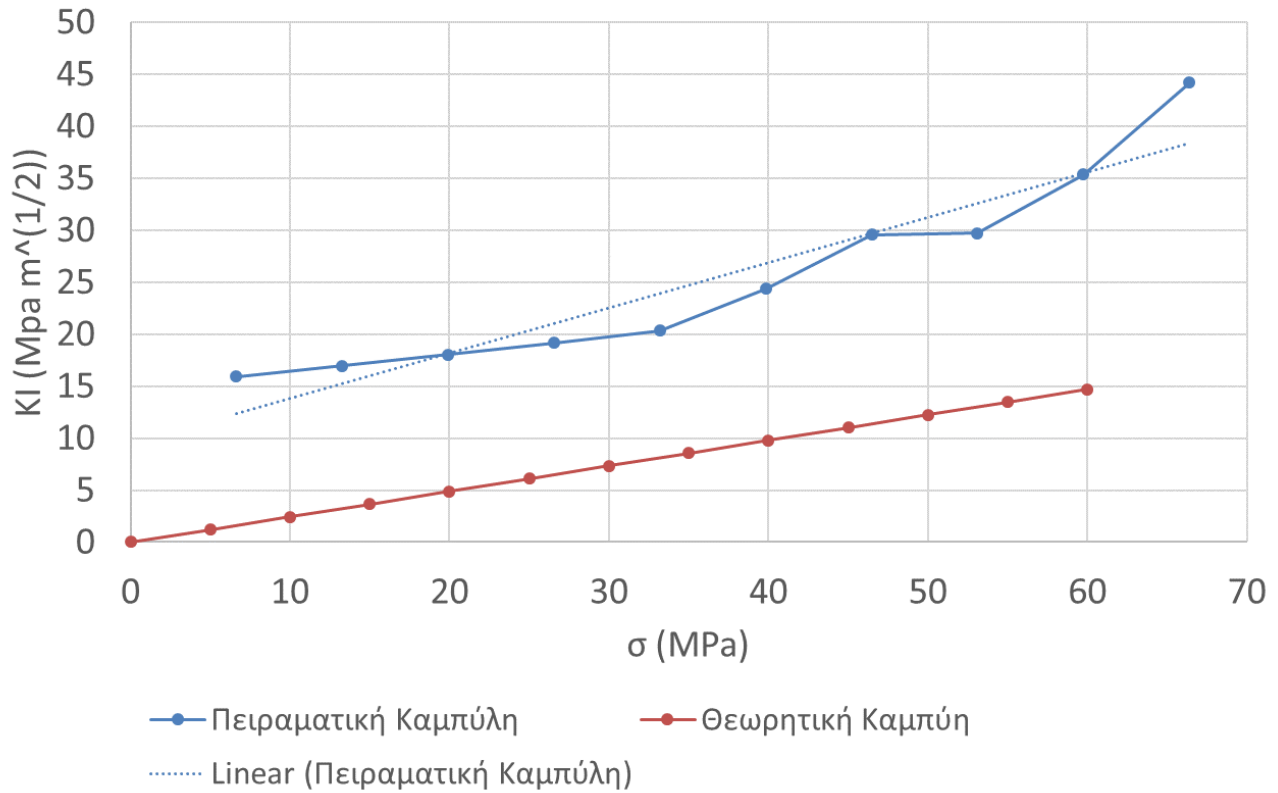
Model Plexiglas-(Al 2024-T3)	Plexiglas	Al 7075-O
Πάχος -t (m)	0.003	0.00125
Πλάτος-w (m)	0.08	0.05
Μήκος-2h (m)	0.3	0.3
Μήκος Ρωγμής-a (m)	0.01	0.01
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	3.4	71.7
Σταθερά Poisson	0.34	0.33
Τασεοπτική Σταθερά (cf)	10^{-10}	4.64×10^{-12}
(a/w)	0.13	0.20
(h/w)	1.88	3.00
Διορθωτικός Συντελεστής (f)	1.24	1.38
Τασεοπτική Σταθερά (c_r)	1.7×10^{-10}	-
z0	1.90	
zi	0.34	
λm	6.67	
ε	2.00	

Πίνακας 14 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Δοκιμίων Plexiglas και Αλουμινίου 7075-O (πάχους 1.25 mm)

A/A	ΦΟΡΤΙΟ (Kg)	Διάμετρος Καυστικής (m)	K Plexiglass (Mpa m ^{^(1/2)})	K Aluminium (Mpa m ^{^(1/2)})	P (Nt) (Plexiglass)	P (Nt) (Aluminium)	σ (Mpa) (Plexiglass)	σ (Mpa) (Aluminium)	ΦΟΡΤΙΟ (Nt)
1	0.00	0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	50.00	0	0.00	0.000	75.56	414.94	0.31	6.64	490.5
3	100.00	0.039	0.84	15.917	151.12	829.88	0.63	13.28	981
4	150.00	0.04	0.89	16.958	226.67	1244.83	0.94	19.92	1471.5
5	200.00	0.041	0.95	18.037	302.23	1659.77	1.26	26.56	1962
6	250.00	0.042	1.01	19.157	377.79	2074.71	1.57	33.20	2452.5
7	300.00	0.043	1.07	20.318	453.35	2489.65	1.89	39.83	2943
8	350.00	0.046229229	1.29	24.350	528.90	2904.60	2.20	46.47	3433.5
9	400.00	0.049969481	1.56	29.578	604.46	3319.54	2.52	53.11	3924
10	450.00	0.050060606	1.57	29.713	680.02	3734.48	2.83	59.75	4414.5
11	500.00	0.053653846	1.86	35.336	755.58	4149.42	3.15	66.39	4905
12	550.00	0.058663006	2.33	44.170	831.13	4564.37	3.46	73.03	5395.5
13	585.00	n/a	n/a	n/a	884.03	4854.82	3.68	77.68	5738.85

Πίνακας 15 Πειραματικά Αποτελέσματα Αλουμινίου 7075-O (πάχους 1.25 mm)

Aluminum 7075-O 1.25 mm



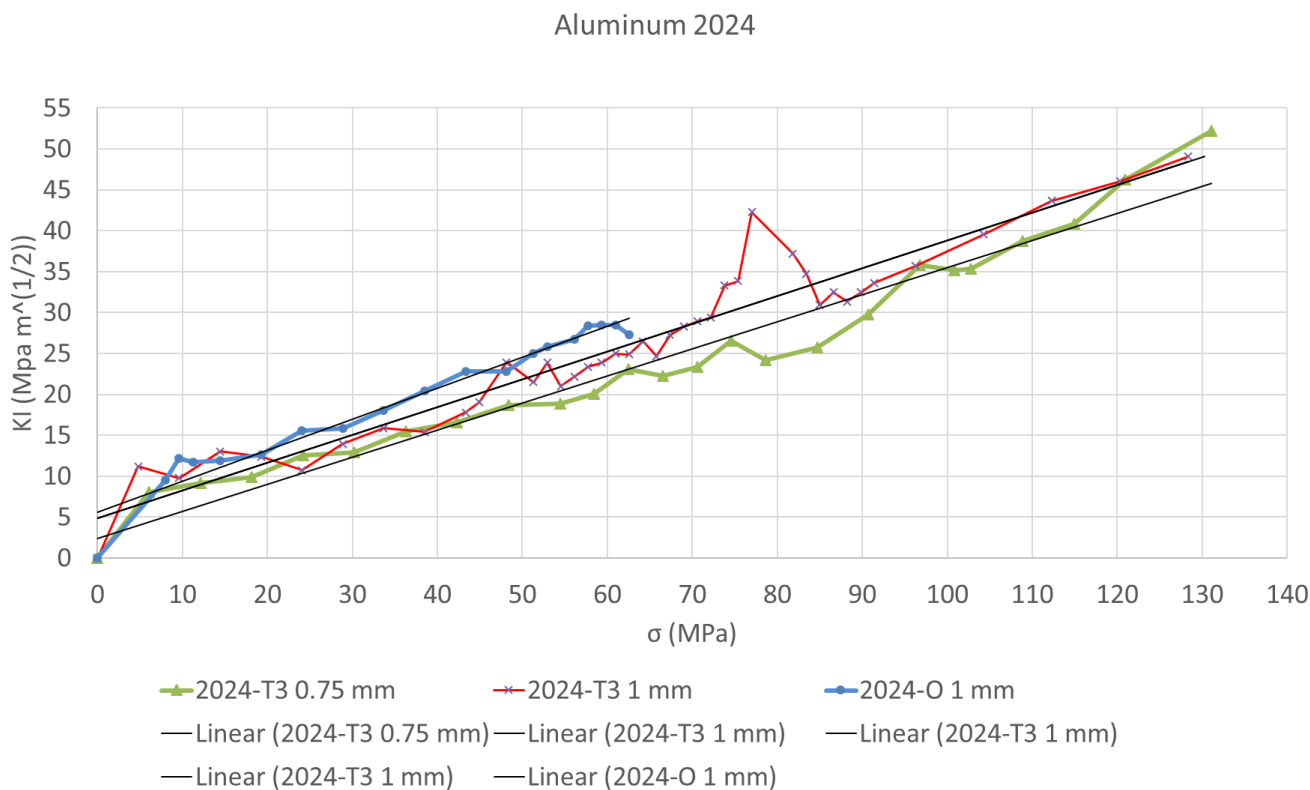
Εικόνα 47 Πειραματική και Θεωρητική Καμπύλη Αλουμινίου 7075-O (πάχους 1.25 mm)

Σημειώνεται ότι, η θραύση στο Plexiglas δεν σημειώθηκε στην ρωγμή αλλά στο σημείο ήλωσης με το αλουμίνιο. Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι, η θραύση σημειώθηκε όταν το επιβαλλόμενο φορτίο ήταν 925 kg. Αμέσως μετά, η ένδειξη του επιβαλλόμενου φορτίου ήταν 850 kg.

4.7 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

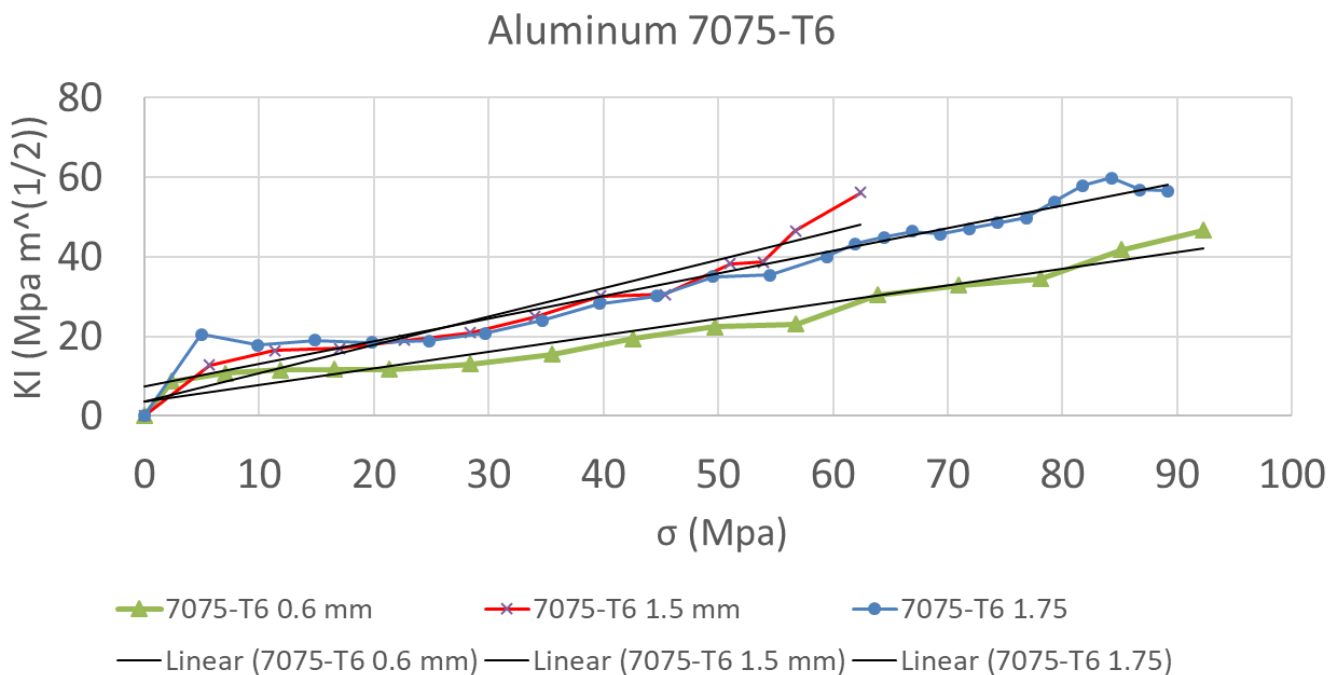
Από τα ανωτέρω διαγράμματα, παρατηρείται ότι σε όλα τα δοκίμια υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην θεωρητική και την πειραματική λύση. Πιο συγκεκριμένα, κατά την πειραματική λύση ο συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων είναι μεγαλύτερος συγκρινόμενος με την θεωρητική λύση. Η διαφορά αυτή, μπορεί να εξηγηθεί λόγω της ύπαρξης ατελειών οι οποίες είναι ικανές να ενισχύσουν μια εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση στην περιοχή τους και οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη κατά την θεωρητική επίλυση.

Αναφερόμενοι στην σειρά Αλουμινίου 2024, παρατηρείται ότι η αύξηση του πάχους οδηγεί σε μεγαλύτερες τάσεις γύρω από τη ρωγμή. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, το δοκίμιο αλουμινίου 2024-O εμφανίζει υψηλότερο συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων σε σχέση με το δοκίμιο αλουμινίου 2024-T3 ίδιου πάχους. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που δεν προτιμάται το κράμα αλουμινίου με την συγκεκριμένη θερμική κατεργασία.



Εικόνα 48 Πειραματικές Καμπύλες Κραμάτων Αλουμινίου 2024

Περνώντας στην σειρά 7075-T6, σημειώνεται ότι η αύξηση του πάχους του δοκιμίου επηρεάζει τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται, με την αύξηση του πάχους αυξάνεται και η τάση των τάσεων γύρω από τη ρωγμή.

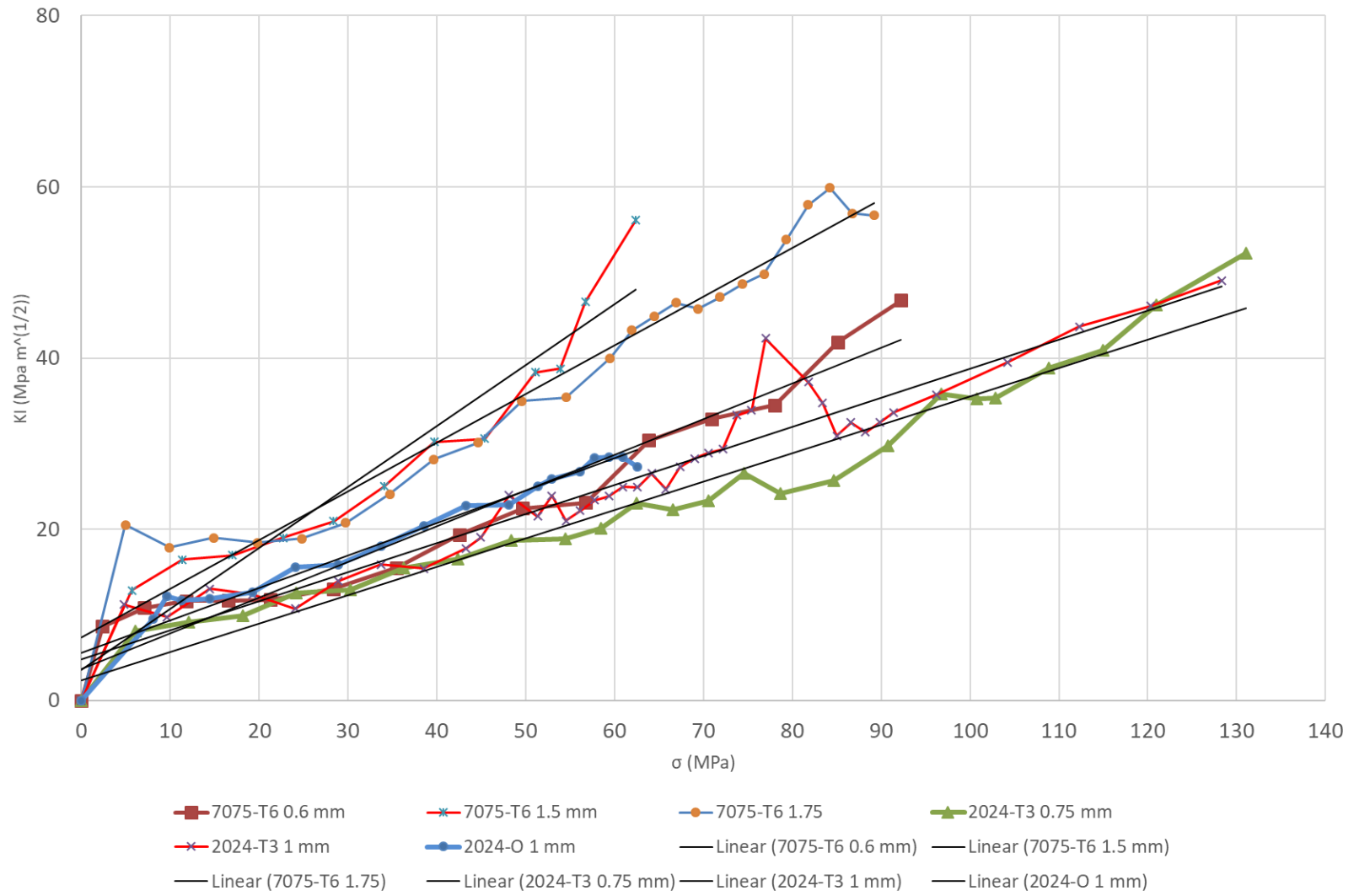


Εικόνα 49 Πειραματικές Καμπύλες Κραμάτων Αλουμινίου 7075

Τέλος, συγκρίνοντας τις δυο κατηγορίες αλουμινίων (2024 και 7075) παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων είναι μεγαλύτερος στα κράμματα 7075. Τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγουμε έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τα όσα γνωρίζουμε από την αεροπορική βιομηχανία.

Πιο συγκεκριμένα, το κράμα αλουμινίου 7075-T6 μπορεί να προτιμάται σε περιοχές όπου έχουμε θλιπτική καταπόνηση λόγω της υψηλής αντοχής σε θλίψη (upper skins of wings, spar caps), ωστόσο σε περιοχές όπου έχουμε εφελκυστικά φορτία (lower skins of wings, shear webs and ribs) προτιμάται το κράμα αλουμινίου 2024. Επιπλέον, σε περιπτώσεις εγκοπών, το κράμα 7075 καθίσταται περισσότερο ευαίσθητο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται το κράμα 2024 περισσότερο.

Συγκεντρωτικός Πίνακας



Εικόνα 50 Πειραματικές Καμπύλες Κραμάτων Αλουμινίου 2024 και 7075

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία είχε ως αντικείμενο τον προσδιορισμό του Συντελεστή Έντασης των Τάσεων σε κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα , μελετήθηκαν τα κράματα Al-2024 και Al-7075.

Όπως αναφέρθηκε, ο προσδιορισμός του πεδίου των τάσεων γύρω από το άκρο της ρωγμής μπορεί να γίνει είτε με θεωρητικές μεθόδους είτε με πειραματικές. Στην συγκεκριμένη εργασία εφαρμόστηκε η Οπτική Μέθοδος των Καυστικών, η οποία κρίνεται ως η μόνη ενδεδειγμένη μέθοδος για αυτό το σκοπό. Σημειώνεται ότι, για τον υπολογισμό του Συντελεστή Έντασης των Τάσεων εφαρμόστηκε η πειραματική μέθοδος των παράλληλων ελατηρίων.

Ωστόσο, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων επιδιώχθηκε η εφαρμογή της Μεθόδου των Καυστικών απευθείας στα δοκίμια αλουμινίου. Η προσπάθεια δεν στέφθηκε με επιτυχία καθώς η λείανση των δοκιμίων δεν επαρκούσε για τη λήψη καυστικών και το φαινόμενο της σκέδασης ήταν ιδιαίτερα εμφανές.



Εικόνα 51 Λήψη Καυστικής Επηρρεασμένη από Σκέδαση

Ο αναγνώστης και μελλοντικός ερευνητής, επηρεαζόμενος από την παρούσα εργασία θα μπορούσε να ασχοληθεί με τα ακόλουθα θέματα:

- Λήψη Καυστικών απευθείας από τα δοκίμια. Η συγκεκριμένη προσπάθεια αν και κρίνεται χρονοβόρα καθώς και κοστοβόρα, εντούτοις θα προσφέρει περισσότερα αποτελέσματα από την παρούσα εργασία. Ο λόγος είναι ότι, στην συγκεκριμένη μελέτη, τα δοκίμια ήταν ενωμένα με υλικό Plexiglas το οποίο δεν δύναται να φέρει μεγάλα φορτία.
- Δημιουργία δοκιμίων από κατασκευές που έχουν υποστεί επαρκή εκμετάλλευση. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατό να αποκτηθεί μια σαφής εικόνα για το πώς επηρεάζει η κόπωση τα συγκεκριμένα υλικά.
- Το μέλλον στις αεροπορικές κατασκευές, είναι η χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών. Συνεπώς κρίνεται ιδιαίτερα αναγκαίο να μελετηθεί πώς η ύπαρξη μιας ρωγμής επηρεάζει τα σύνθετα υλικά.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α

Στοιχεία Θεωρίας Ελαστικότητας

A.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο Παράρτημα θα γίνει αναφορά κάποιων βασικών εξισώσεων της Κλασσικής Θεωρίας Ελαστικότητας. Σκοπός του είναι να αποτελέσει ένα γρήγορο ευρετήριο βασικών εξισώσεων. Για περαιτέρω εξήγηση ο αναγνώστης θα πρέπει να ανατρέξει στην διεθνή βιβλιογραφία.

Επισημαίνεται ότι, οι βασικές εξισώσεις θα πρέπει να πληρούνται σε κάθε σημείο ενός ομογενούς, ιστροπικού και γραμμικά ελαστικού σώματος υπό συνθήκες σταθερής φόρτισης.

A.2 Διαφορικές Εξισώσεις Ισορροπίας

Θεωρούμε ένα σώμα σε ισορροπία υπό εξωτερική φόρτιση. Συνεπώς, θα πρέπει να ισχύουν οι εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων $\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0$ και $\Sigma F_z = 0$. Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτουν οι σχέσεις,

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0$$

Όπου σ_{ij} οι αναπτυσσόμενες τάσεις και F_i οι καθολικές δυνάμεις.

A.3 Εξισώσεις Συμβιβαστού των Παραμορφώσεων

Στην επίπεδη κατάσταση οι τρεις συνιστώσες των παραμορφώσεων ε_{ij} δίνονται από τις μερικές παραγώγους των μετατοπίσεων u, v έτσι ώστε στο σώμα να υπάρχει συνέχεια στις παραμορφώσεις. Αυτό συμβαίνει όταν οι παραμορφώσεις ικανοποιούν ορισμένες εξισώσεις συμβιβαστού που εκφράζουν τη μαθηματική διατύπωση της συνθήκης συνέχειας του παραμορφωσίμου σώματος. Οι εξισώσεις αυτές είναι,

$$\varepsilon_{ij,km} + \varepsilon_{km,ij} - \varepsilon_{ik,jm} - \varepsilon_{jm,ik} = 0$$

A.4 Ο φυσικός Νόμος (Νόμος Hooke)

Τα γραμμικά και ελαστικά υλικά, είναι τα υλικά στα οποία οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις είναι ελαστικές και υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων. Η γραμμικότητα μεταξύ των τάσεων και των αναπτυσσόμενων υπό αυτών παραμορφώσεων εκφράζει τον γενικευμένο νόμο του Hooke. Για την περίπτωση ισότροπου και ομογενούς πολυκρυσταλλικού υλικού, οι σχέσεις τάσεων και παραμορφώσεων εκφράζονται με τις κάτωθι απλοποιημένες σχέσεις,

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, ν ο λόγος Poisson και G το μέτρο διάτμηση του υλικού. Από τις ανωτέρω σχέσεις, μπορούν να προκύψουν οι τάσεις.

A.5 Τασική Συνάρτηση Airy

Στη γενικευμένη επίπεδη εντατική κατάσταση τίθενται οι ίδιες υποθέσεις με τις τάσεις όπως στην επίπεδη εντατική κατάσταση, με τη διαφορά ότι οι τάσεις δεν είναι συναρτήσεις της μεταβλητής z . Οι τάσεις $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ υπολογίζονται από την τασική συνάρτηση $F = F(x, y)$, η οποία καλείται τασική συνάρτηση Airy, από τις σχέσεις,

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + V \\ \sigma_{yy} &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + V \\ \tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}\end{aligned}$$

Η συνάρτηση F , για να αποτελεί λύση σε ένα ελαστοστατικό πρόβλημα θα πρέπει αφενός να ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας, αφετέρου την εξίσωση Laplace

$$\nabla^4 F = -(1-\nu)\nabla^2 V$$

Κατά την περίπτωση απουσίας καθολικών δυνάμεων, θα ισχύει,

$$\nabla^2 F = 0$$

Τέλος, αναφέρεται ότι, η συνάρτηση $F(x, y)$ δύναται να παρασταθεί με τη βοήθεια δυο αναλυτικών συναρτήσεων $\varphi(z)$ και $\chi(z)$ της μιγαδικής μεταβλητής $z=x+yi$ δια της σχέσης,

$$\varphi(z)F = \operatorname{Re}[\bar{z}\varphi(z) + \chi(z)]$$

Παράρτημα Β

B.1 Αλουμίνιο και τα Κράματα του

Το αλουμίνιο και τα κράματά του χαρακτηρίζονται από μια σχετικά χαμηλή πυκνότητα ($2,7 \text{ g/cm}^3$ έναντι $7,9 \text{ g/cm}^3$ για τους χάλυβες), υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα κι αντίσταση στη διάβρωση σε ορισμένα κοινά περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένης και της συνήθους ατμόσφαιρας. Πολλά από αυτά τα κράματα μορφοποιούνται εύκολα εξαιτίας της υψηλής τους ολκιμότητας. Το βασικό μειονέκτημα του αλουμινίου είναι το χαμηλό σημείο τήξης (600°C), το οποίο θέτει περιορισμούς στη μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του.

Η μηχανική αντοχή του αλουμινίου είναι δυνατό να βελτιωθεί με ψυξηλασία και με κραμάτωση, εντούτοις και οι δύο κατεργασίες τείνουν να μειώσουν την αντίστασή του στη διάβρωση. Μεταξύ των κύριων κραματικών στοιχείων είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο, το πυρίτιο, το μαγγάνιο και ο ψευδάργυρος.

Γενικά, τα κράματα αλουμινίου διακρίνονται σε χυτά ή διαμόρφωσης. Η σύσταση και στους δυο τύπους δηλώνεται με έναν τετραψήφιο αριθμό ο οποίος υποδηλώνει τις κύριες προσμίξεις, και σε ορισμένες περιπτώσεις το βαθμό καθαρότητας. Για χυτά κράματα, τα δυο τελευταία ψηφία χωρίζονται με τελεία. Μετά από αυτά τα ψηφία ακολουθεί μια παύλα και ο προσδιορισμός της βασικής κατεργασίας (temper designation) – ένα γράμμα και πιθανά ένας μονοψήφιος έως τριψήφιος αριθμός, με τον οποίο προσδιορίζεται η μηχανική ή/και η θερμική κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα.

B.2 Κράματα Διαμόρφωσης (Wrought Alloys)

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου:

Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.

Το δεύτερο ψηφίο δείχνει τις διάφορες μορφές του αρχικού κράματος

Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο τις διαφορετικές μορφές του κάθε κράματος.

- **1xxx Καθαρό Al (Al >99,00%)**

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα
- Παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση
- Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69- 186 Mpa

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al) . Μερικοί τύποι , σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η σειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι

το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων ή φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας.

- **2xxx Κράματα Al-Cu**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όπως και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Εφαρμογές σε μεταφορές (αεροπλάνα τραίνα)
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186- 427 Mpa

Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται ή επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα ή πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές , έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία

αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες.

- **3xxx Κράματα Al-Mn**

- Διαμορφώνεται πολύ εύκολα
- Παρουσιάζει καλή αντοχή στη διάβρωση
- Καλή συγκολλησιμότητα
- Μέτρια αντοχή
- Χρησιμοποιείται για αγωγούς μεταφοράς θερμότητας, συσκευασία και εφαρμογές στέγης και πλαϊνών τοιχωμάτων
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 3003, 3004, 3005
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 110-282 Μρα

Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές υποδομές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα βασικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς. Τα κράματα 3004 και το 3104 είναι μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κραμάτων λόγω της χρήσης τους στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.

- **4xxx Κράματα Al-Si**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μέτρια αντοχή
- Εφαρμογές: πιστόνια , σφυρήλατα πολύπλοκου σχήματος
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 4032 και υλικό ηλεκτροδίων 4043
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172- 380 Mpa

Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 4xxx , το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Από την άλλη πλευρά το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα. Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς. Πολύ καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην ψηλή περιεκτικότητα σε Si, στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών , στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται.

- **5xxx Κράματα Al-Mg**

- Σκληρύνεται με ενδοτράχυνση
- Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση
- Καλή συγκολλησιμότητα
- Καλή δυσκαμψία

- Ενδιάμεση αντοχή
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, κρουογενικά υλικά, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 5052, 5083, 5754
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172-380 Μρα

Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυχρηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρουογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0ο Κ. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270o C και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα. Τα κράματα 5052, 5086 και 5083 χρησιμοποιούνται ευρέως σε κατασκευές με την αντοχή να αυξάνει καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε Mg. Ειδικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν το 5182 (ο πυθμένας από το τενεκεδάκι των αναψυκτικών) το 5754 για σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων και 5252, 5457 και 5657 για εμφανισιακές εφαρμογές (φτερά, καπώ αυτοκινήτου κ.λ.π.). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με Mg >3%, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100ο C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σ'αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.

- **6xxx Κράματα Al-Mg-Si**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση

- Εξαιρετική ολκιμότητα
- Ενδιάμεση αντοχή
- Εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 6061, 6063, 6111
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 125- 400 Μpa

Τα κράματα της σειράς 6xxx δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή. Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Forgesmo της Νορβηγίας και είναι το κράμα που η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της. Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά, βαγόνια τραίνου και σωληνώσεις. Μεταξύ των ειδικών κραμάτων της σειράς: 6066-T6 με υψηλή αντοχή για σφυρήλατα 6111 για panel πλαίσιων αυτοκινήτου και 6101 και 6201 για υψηλής αντοχής ηλεκτρικούς αγωγούς.

- **7xxx Κράματα Al-Zn**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Πολύ μεγάλη αντοχή
- Εξαιρετική ακαμψία

- Εφαρμογές αυτοκινήτων και αεροδιαστημικές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005,7075,7475,7150
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Μρα

Τα κράματα της σειράς 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας. Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλησίμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια. Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται η αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad). Στις περιπτώσεις που υπάρχει υποψία για κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking) πρέπει να εφαρμόζεται θερμική T73 αντί για T6.

- **8xxx Κράματα Al με άλλα στοιχεία**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Μεγάλη αγωγιμότητα και αντοχή, σκληρότητα
- Ηλεκτρικές εφαρμογές και αεροδιαστημικές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 8017,8176,8081,8280,8090
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 117-241 Μρα

Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγώτερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: Τα Fe και Ni παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αντιπροσωπευτικό 8017). Το Li στο 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, έτσι χρησιμοποιείται για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

B.3 Κράματα Χύτευσης (Casting Alloys)

Σε αντίθεση με τα κατεργάσιμα κράματα, τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κραματικών στοιχείων όπως πυριτίου και χαλκού. Αυτό προκαλεί μια μεγάλη ετερογενή δομή π.χ. μια σημαντική ποσότητα δεύτερης φάσης. Αυτή η δεύτερη φάση απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη, διότι κάθε άγριο, κοφτερό και εύθραυστο συστατικό μπορεί να δημιουργήσει εσωτερικές εγκοπές και να ξεκινήσει ρωγμές όταν το χυτό τοποθετηθεί αργότερα σε συνθήκες φορτίου. Οι μεγάλες ετερογενείς δομές δεν έχουν καλές αντοχές σε κόπωση. Καλές μεταλλουργικές και χυτευτικές τεχνικές μπορούν να προλάβουν τέτοια σφάλματα. Η επιμήκυνση και η αντοχή, ειδικά στην κόπωση, των περισσότερων χυτών είναι σχετικά χαμηλότερες από αυτές των κατεργάσιμων προϊόντων. Αυτό οφείλεται στο ότι οι τεχνικές χύτευσης ακόμη δεν μπορούν να προλάβουν τα χυτευτικά σφάλματα.

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου:

Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία.

Το δεύτερο και τρίτο ψηφία δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος.

Το τέταρτο ψηφίο δείχνει αν είναι χυτό (casting) (0) ή ελατό (ingot) (1,2)

- **1xx.x Καθαρό Al (Al >99,00%)**
- **2xx.x Κράματα Al-Cu**
 - Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) και στο «χώμα»
 - Υψηλές αντοχές σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες. Μερικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη
 - Εφαρμογές για αεροσκάφη, αυτοκίνητα και μηχανές
 - Αντιπροσωπευτικά κράματα: 201.0, 203.0
 - Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-450 Μpa Το περισσότερο ανθεκτικό κράμα είναι το 201.0/AlCu4Ti (Ντουραλουμίνιο) που επιδέχεται θερμική κατεργασία

Η χυτευσιμότητα του περιορίζεται λόγω της τάσης σχηματισμού μικροπορώδους και «θερμών σταγόνων» (hot tears) έτσι καλύτερα ταιριάζει στις μεθόδους επενδυμένων κελυφών. Η μεγάλη του αντοχή σε κάμψη το κάνει ιδιαίτερα κατάλληλο για εξαρτήματα υψηλής καταπόνησης σε εργαλειομηχανές, σε εφαρμογές ηλεκτρολογικού υλικού και στη κατασκευή αεροσκαφών. Εκτός από τα κανονικά κράματα χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για ιδιαίτερα εξαρτήματα π.χ. κεφαλές μηχανής, σώματα μηχανής ή κουζινέτα. Για τέτοιες εφαρμογές το επιλεγμένο κράμα απαιτεί καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής, όπως επίσης κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το κράμα 203.0/AlCu5NiCo που σήμερα είναι το κράμα χύτευσης με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200ο C

- **3xx.x Κράματα Al-Si + Cu και / η Mg.**

- Υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε «κοχύλι» (μεταλλικό καλούπι) στο «χώμα» και σε χυτόπρεσσα
- Εξαιρετική χυτευσιμότητα (εύροια), υψηλή αντοχή, μερικά δε κράματα με υψηλή αντοχή σε κάμψη
- Εφαρμογές σε εξαρτήματα αυτοκινήτου, πιστόνια, αντλίες ηλεκτρολογικά εξαρτήματα
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 356.0, A356.0, 359.0, A360.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Mpa

Η σειρά 3xx.x των χυτών είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες σειρές λόγω της ελαστικότητας που προσδίδει το υψηλό σε πυρίτιο ποσοστό, όπως και της πολύ καλής χυτευσιμότητας. Σε αυτές τις ιδιότητες πρέπει να προστεθεί και μια ποικιλία υψηλών αντοχών μετά από θερμική κατεργασία. Επιπλέον η σειρά 3xx.x μπορεί να χυτευθεί με τις περισσότερες τεχνικές, από «χώμα» και χυτόπρεσσα μέχρι πολύπλοκα «κοχύλια» και με τις μεθόδους του χαμένου κεριού και του χαμένου ομοιώματος πολυστυρενίου καθώς και τις πολύ νέες «θιξοχύτευση» και χύτευση squeeze. Μεταξύ των περισσότερο γνωστών είναι τα 319.0 356.0/A356.0 για «χώμα» και «κοχύλι», 360.0, 380.0/A380.0 και 390.0 για χυτόπρεσσα και 357.0/A357.0 για τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Το κράμα 332.0 είναι επίσης ένα πολύ διαδεδομένο κράμα που μπορεί να παραχθεί αποκλειστικά σχεδόν από ανακύκλωση.

- **4xx.x Κράματα Al-Si**

- Δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται σε «χώμα» «κοχύλι» και χυτόπρεσσα

- Εξαιρετική χυτευσιμότητα πολύ καλή για περίπλοκα χυτά
- Πλαίσια γραφομηχανών, εξοπλισμός οδοντιατρείου, παραθαλάσσιες εφαρμογές και διακοσμητικές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 413.0, 443.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131-275 Μρα

Το κράμα B413.0/AlSi12 είναι γνωστό για την καλή χυτευσιμότητα του και την καλή συγκολλησιμότητα που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης (570ο C). Συνδυάζει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και καλή αντοχή σε διάβρωση. Το κράμα είναι καλό για πολύπλοκες λεπτές διατομές με καλή αντοχή σε κόπωση.

- **5xx.x Κράματα Al-Mg**
- **6xx.x Μη χρησιμοποιούμενη σειρά**
- **7xx.x Κράματα Al-Zn**
- **8xx.x Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία**
- **9xx.x Κράματα Al-με άλλα στοιχεία**

ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

- **F – Όπως παράγεται (χωρίς θερμική)**
- **0 – Με ανόπτηση**
- **H- Ψυξηλατημένο (Σκληρυμένο)**

- **W- Με θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης**

- **T-Με θερμική κατεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες.** Συνήθως με σκλήρυνση μετά από υπερβαφή και κατακρήμνιση. Η προσθήκη αριθμού δείχνει διάφορες μορφές. Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθες κατηγορίες:
 - T1: Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης και φυσική γήρανση
 - T2: Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης, κατεργασία εν ψυχρώ και ακολούθως φυσική γήρανση
 - T3: Διαλυτοποίηση, υπερβαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
 - T4: Διαλυτοποίηση, υπερβαφή και φυσική γήρανση
 - T5: Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης και τεχνητή γήρανση
 - T6: Διαλυτοποίηση, υπερβαφή και τεχνητή γήρανση

Βιβλιογραφία

1. Γεώργιος Α. Παπαδόπουλος, Πειραματική Μηχανική των Θραύσεων – Οπτικές Μέθοδοι Ανάλυσης των Τάσεων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007.
2. Γεώργιος Α. Παπαδόπουλος, Μηχανική των Θραύσεων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2015.
3. Γεώργιος Α. Παπαδόπουλος, Β.Α. Βαδαλούκα, Εφαρμοσμένη Μηχανική των Υλικών/Ελαστικότητα – Αντοχή, Εκδόσεις ΝΚ, 2009.
4. B. Badalouka, G.A. Papadopoulos, Experimental Evaluation of Stress – Optical Constants By Caustics, Springer, 2011.
5. William D. Callister, Jr, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 5^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2004.
6. D. P. Wilhem, Fracture Mechanics Guidelines For Aircraft Structural Applications, Northrop Corporation, California 1970.
7. E. E. Gdoutos, Solution of Crack Problems By the Optical Method of Caustics, Newsletter 50, 2012
8. Hallam D, Review of Aeronautical Fatigue and Structural Integrity Investigations in the UK During the Period April 2017 – April 2019, Dstl Platform Systems, 1 May 2019
9. Δασκαλόπουλος Ι, Ανάλυση βλάβης στα απάρτια στροβιλοκινητήρα T-53 : «First Stage Gas Producer Liner» και «Second Stage Power Turbine Nozzle Assembly» με Καταστροφικές (DI) και Μη Καταστροφικές (NDI) μεθόδους, Οκτώβριος 2017.
10. <https://mechanicalc.com/reference/fracture-mechanics>
11. <http://www.flight-mechanic.com/>
12. <http://www.aerospacemetals.com/aluminum-distributor.html>

