



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πολυτεχνική σχολή

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς κόπωσης και
απομένουσας αντοχής σε διάτμηση κυψελοειδών δομών
αλουμίνιου

Απόστολος Μπακρυσιώρης

Γεώργιος Παναγιώτης Μπαρώτας

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Αλέξης Κερμανίδης, Καθηγητής

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την
απόκτηση του διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2025

© 2025 Μπαकुσιώρης Απόστολος, Μπαρώτας Γεώργιος Παναγιώτης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Πρώτος εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Αλέξης Κερμανίδης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος εξεταστής	Δρ. κ. Χαϊδεμενόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος εξεταστής	Δρ. κ. Μπουζάκης Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Επιτρέψτε μας να εκφράσουμε την ειλικρινή μας ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή Αλέξη Κερμανίδη, για την άρτια επίβλεψη, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συμβολή του, που υπήρξαν καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωση της έρευνας.

Ευχαριστούμε θερμά τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή Γρηγόρη Χαιδεμενόπουλο και Αναπληρωτή Καθηγητή Εμμανουήλ Μπουζάκη, για την προσεκτική μελέτη της εργασίας και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους.

Ιδιαίτερη μνεία οφείλουμε στον Καθηγητή Γρηγόρη Χαιδεμενόπουλο για την ευγενική παραχώρηση εξοπλισμού, που κατέστησε εφικτή την πειραματική διαδικασία.

Θα θέλαμε επίσης να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στο συναδελφο μας Γιάννη Γούλα για την άριστη συνεργασία και την τεχνική υποστήριξη που μας παρείχαν στο εργαστήριο

Τέλος, εκφράζουμε τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειά μας για τη διαρκή στήριξη, την ενθάρρυνση και την καθοδήγησή τους σε κάθε στάδιο της πορείας μας, χωρίς την οποία η παρούσα προσπάθεια δεν θα ήταν δυνατή.

Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς κόπωσης και απομένουσας αντοχής σε διάτμηση κυψελοειδών δομών αλουμίνιου

Απόστολος Μπακρυσιώρης
Γεώργιος Παναγιώτης Μπαρώτας

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2025

Επιβλέπων: Αλέξης Κερμανίδης, Καθηγητής

Περίληψη

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική και την αεροδιαστημική, τα κυψελοειδή υλικά αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο στις σύνθετες δομές τύπου sandwich. Η ευρεία χρήση τους δικαιολογείται από χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή ειδική αντοχή και δυσκαμψία, το εξαιρετικά χαμηλό βάρος και η ικανότητα απορρόφησης μηχανικής ενέργειας. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν εφικτή τη δημιουργία δομικών μερών κατασκευών όπου προαπαιτούμενα χαρακτηριστικά είναι το χαμηλό βάρος και η στιβαρότητα.

Η διερεύνηση της δυνατότητας επέκτασης της χρήσης των σάντουιτς δομών σε πρωτεύοντα, φέροντα μέρη κατασκευών έναντι των παραδοσιακών μεταλλικών κραμάτων και των ινωδών σύνθετων υλικών απαιτεί μια λεπτομερή διερεύνηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά ειδικά τη συμπεριφορά διάτμησης των πυρήνων honeycomb υπό συνθήκες κόπωσης. Επιπλέον, εξετάζεται η απομένουσα αντοχή των υλικών έπειτα από προηγούμενη καταπόνηση κόπωσης. Η πειραματική μελέτη, η οποία διεξήχθη σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C273, εστιάζει στην επίδραση δύο παραγόντων: την παρουσία μικροσπών και τον προσανατολισμό των κυψελίδων, όπως αυτοί επηρεάζουν τη συνολική συμπεριφορά διάτμησης των πυρήνων.

Λέξεις- κλειδιά: Δομές honeycomb, διάτμηση honeycomb, κόπωση honeycomb, απομένουσα αντοχή honeycomb

EXPERIMENTAL STUDY OF SHEAR FATIGUE BEHAVIOR AND RESIDUAL SHEAR STRENGTH OF ALUMINIUM HONEYCOMB STRUCTURES

APOSTOLOS MPAKRYSIORIS
GEORGIOS PANAGIOTIS BAROTAS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2025

Supervisor: Alexis Kermanidis, Professor

Abstract

In the automotive, aeronautical, and aerospace industries, honeycomb materials are a key structural element in composite sandwich structures. Their widespread use is justified by their characteristics, such as high specific strength, extremely low weight, and the ability to absorb mechanical energy. These properties make it possible to create structures that are both robust and lightweight.

Evaluating them against traditional metal alloys and fibrous composite materials requires a detailed investigation of their mechanical behavior. In this context, the present diploma thesis specifically investigates the shear behavior of honeycomb cores under fatigue conditions. Furthermore, the residual strength of the materials is examined after fatigue loading. The experimental study, which was conducted in accordance with the ASTM C273 standard, focuses on the effect of two factors: the presence of micro-holes and the orientation of the cells, and how they affect the overall shear behavior of the cores.

Key words: Honeycomb structures, Shear behavior of honeycomb, Fatigue behavior of honeycomb, residual strength of honeycomb

Περιεχόμενα

Κατάλογος Διαγραμμάτων	ix
Κατάλογος πινάκων	xi
Κατάλογος εικόνων	xi
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή προβλήματος	1
1.2 Σκοπός εργασίας	2
Κεφάλαιο 2: Υλικά Κυψελοειδούς Δομής	3
2.1 Κατηγορίες Κυψελοειδών Υλικών	3
2.2. Honeycomb	5
2.3 Τρόποι παρασκευής δομής honeycomb	6
2.3.1 Μέθοδος με ξεδίπλωμα φύλλων (Expansion method)	6
2.3.2 Αρχική δημιουργία αυλακώσεων (Corrugation method)	7
2.4 Παράμετροι της δομής honeycomb	8
2.5 Εφαρμογές κυψελοειδών υλικών	9
2.6 Αποτελέσματα ερευνών	10
Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία	13
3.1 Περιγραφή	13
3.2 Μέρη κατασκευής δομής	13
3.2.1 Δοκίμια Honeycomb	13
3.2.2 Κόλλα Hex Bond 609™[3]	15
3.2.3 Πλακίδια Αλουμινίου	15
3.3 Κατασκευή δοκιμίων	16
3.4 Πρότυπο ASTM- C273	18
3.5 Εργαστηριακός Εξοπλισμός	20
3.6 Πειράματα διάτμησης	21
3.6.1 Περιγραφή Δοκιμίων Κόπωσης	21
3.6.2 Πειράματα Κόπωσης	23
3.6.3 Πειράματα Απομένουσας Αντοχής	24
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα πειραμάτων Κόπωσης σε Διάτμηση	25
4.1 Διεύθυνση L	25
4.1.1 Δοκίμιο L4_UP	25
4.1.2 Δοκίμιο L2_P	26
4.1.3 Δοκίμιο L6_UP	29

4.1.4 Δοκίμιο L3_P	33
4.1.5 Δοκίμιο L5_UP	35
4.2 Διεύθυνση W.....	39
4.2.1 Δοκίμιο W3_UP	39
4.2.2 Δοκίμιο W4_UP	42
4.2.3 Δοκίμιο W1_P.....	45
4.2.4 Δοκίμιο W2_P	49
4.2.5 Δοκίμιο W5_P	53
4.2.6 Δοκίμιο W9_P	56
4.3 Συγκριτικά Αποτελέσματα Πειραμάτων Κόπωσης	60
Κεφάλαιο 5: Πειράματα Απομένουσας Αντοχής	64
5.1 Περιγραφή δοκιμών Απομένουσας Αντοχής	64
5.2 Δοκίμιο W13.....	65
5.3 Δοκίμιο W6.....	66
5.4 Δοκίμιο W8.....	67
5.5 Δοκίμιο W11	68
5.6 Δοκίμιο W12	69
5.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραμάτων Απομένουσας Αντοχής	70
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

Κατάλογος Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P-Εύρος μετατόπισης με κύκλους	26
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P-Αύξηση εύρους μετατόπισης με κύκλους	26
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 4ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P-Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	27
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 5ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P- % μείωσης δυσκαμψίας - % αύξησης ΔU.....	28
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους	30
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP-Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους	30
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	31
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 4-ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	31
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 5ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP(0,45-4,5 kN)- % μείωσης δυσκαμψίας % αύξησης ΔU	32
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους	33
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους	33
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	34
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 4 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	34
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 5 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP(0,45-4,5 kN)-% μείωσης δυσκαμψίας - % αύξησης ΔU	35
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους	36
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους	36
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP-Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 4 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 5 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP(0,55-5,5 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU.....	38
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους.....	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP(0,45-4,5 kN)- % μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU.....	41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους.....	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP(0,55-5,5 kN)- % μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU.....	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους	45

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	46
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	47
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P(0,35-3,5 kN)- % μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU.....	47
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους.....	49
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους.....	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης.....	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P(0,35-3,5 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU.....	52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους.....	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P-Μεταβολή εύρους μετατόπισης	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P(0,4-4 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους.....	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους.....	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P(0,45-4,5 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU.....	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 1 Συνολικό διάγραμμα ζωής όλων των δοκιμίων	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 2 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής στα L δοκίμια	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 3 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής στα W δοκίμια	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 4 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής σε L&W δοκίμια στα 0.45-4.5 kN	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 5 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής σε L&W δοκίμια 0.55-5.5kN	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 6 Συνολική σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής.....	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2 1ΔΟΚΙΜΙΟ W13-Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3 1ΔΟΚΙΜΙΟ W6- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής	66
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4 1ΔΟΚΙΜΙΟ W8- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.5 1ΔΟΚΙΜΙΟ W11- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής.....	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.6 1ΔΟΚΙΜΙΟ W12- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής.....	69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7 1Συγκεντρωτικά πειράματα μέγιστης διατμητικής αντοχής W perforated	70

Κατάλογος πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6.1 1 Συντομογραφίες και εκφράσεις.....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6.1 Χαρακτηριστικά δοκιμών κόπωσης.....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 1 Συνολικά αποτελέσματα διάρκειας ζωής στην κόπωση.....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 1 Χαρακτηριστικά δοκιμών απομένουσας αντοχής.....	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απομένουσας αντοχής.....	70

Κατάλογος εικόνων

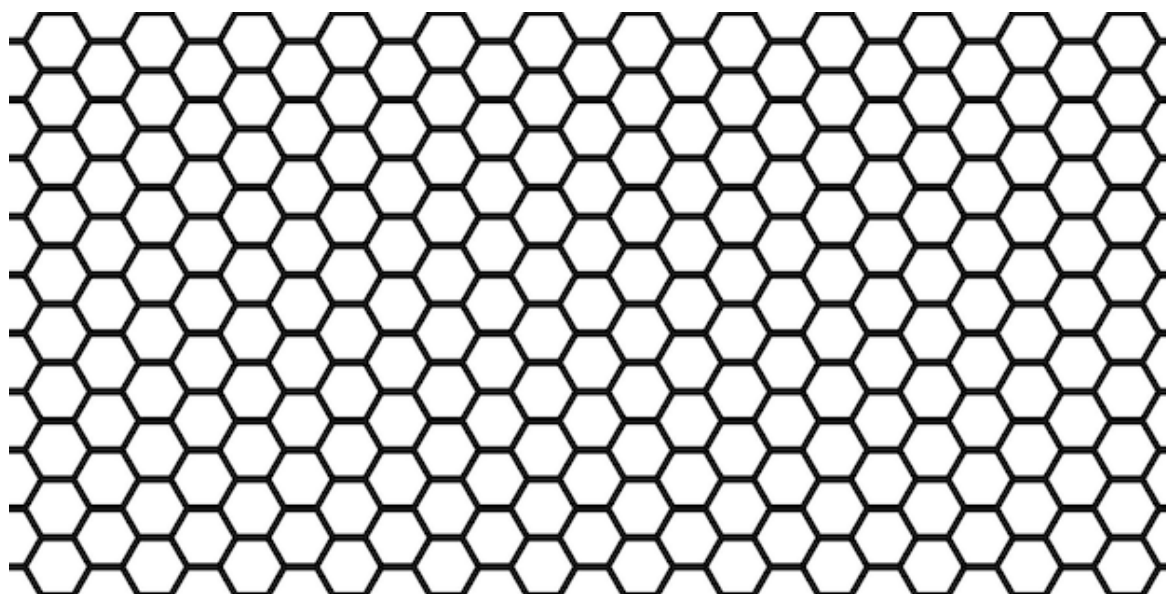
EIKONA 1.1 1 Δισδιάστατη δομή εξαγωνικής κυψελίδας.....	1
EIKONA 1.2. 1 Εξαγωνική δομή αλουμινίου 5052.....	2
EIKONA 1.2. 2 honeycomb sandwich panel	2
EIKONA 2.1. 1 Δομή ανοιχτών και κλειστών κελιών	3
EIKONA 2.1. 2 Κανονική δομή honeycomb	4
EIKONA 2.1. 3 Ακανόνιστη δομή κοκάλων	4
EIKONA 2.1. 4 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη διάταξη.....	4
EIKONA 2.2 1 Εξαγωνική δομή honeycomb	5
EIKONA 2.3.1 1 Διαδικασία παραγωγής honeycomb με expansion method [6]	6
EIKONA 2.3.2 1 Διαδικασία παραγωγής honeycomb με Corrugation method [6]	7
EIKONA 2.4 1 Δομή honeycomb [7].....	8
EIKONA 2.5 1 Sandwich δομές (με μπλε χρώμα) στο Boeing 747 [8].....	9
EIKONA 2.5 2 La Bella Vita, Taichung City, Taiwan,	10
EIKONA 3.1. 1 Ιδιοσυσκευή πειραματικής μελέτης εργαστηρίου Π.Θ. [21]	13
EIKONA 3.2.1. 1 Κατηγοριοποίηση πυρήνα.....	14
EIKONA 3.2.1. 2 Honeycomb με οπές.....	14
EIKONA 3.2.1. 3 Honeycomb χωρίς οπές.....	14
EIKONA 3.2.2 1 Κόλλα HEX BOND 609 TM	15
EIKONA 3.2.2 2 Οδηγίες θέρμανσης κατασκευαστή.....	15
EIKONA 3.2.3. 1 Διαστάσεις πλακιδίων αλουμινίου	16
EIKONA 3.3. 1 Τοποθέτηση κόλλας - πυρήνα.....	17
EIKONA 3.3. 2 Σύσφιξη δομής	17
EIKONA 3.3. 3 Ατμοσφαιρικός φούρνος	18
EIKONA 3.4. 1 Ιδιοσυσκευή για υποβολή δοκιμών σε διατμητικά φορτία κατά ASTM....	19
EIKONA 3.4. 2 Σχέδιο βάσης ιδιοσυσκευής [21]	19
EIKONA 3.4. 3 Σχέδιο άρθρωσης ιδιοσυσκευής [21]	19
EIKONA 3.5.1 1 INSTRON.....	20
EIKONA 3.5.1 2 MTS.....	20
EIKONA 3.5.2 1 CANON 750D	21
EIKONA 3.5.2 2 MACRO LEN	21
EIKONA 4.1.2 1 Ρωγμή σε αρχικό στάδιο	28
EIKONA 4.1.2 2 μετάδοση ρωγμής σε γειτονικά κελιά.....	28
EIKONA 4.1.2 3 Τελικό στάδιο αστοχίας	29
EIKONA 4.1.3 1 Ρωγμές στη δεξιά και αριστερή διεπιφάνεια	32
EIKONA 4.1.3 2 Τελική μορφή αστοχίας	32
EIKONA 4.1.4. 1 Διάδοση ρωγμής.....	35
EIKONA 4.1.4. 2 Τελικό στάδιο αστοχίας	35

<i>EIKONA 4.1.5 1 Ρωγμή στην πάνω επιφάνεια</i>	<i>38</i>
<i>EIKONA 4.1.5 2 Τελικό στάδιο αστοχίας</i>	<i>38</i>
<i>EIKONA 4.2.1 1 Πρώτη ρωγμή</i>	<i>39</i>
<i>EIKONA 4.2.1 2 Τελικό στάδιο αστοχίας</i>	<i>42</i>
<i>EIKONA 4.2.2 1 Ρωγμές πριν την τελική αστοχία</i>	<i>44</i>
<i>EIKONA 4.2.3 1 Αρχικές ρωγμές</i>	<i>46</i>
<i>EIKONA 4.2.3 2 Ρωγμές σε οπές σε ελαστικός λυγισμός</i>	<i>48</i>
<i>EIKONA 4.2.3 3 Τελικό στάδιο αστοχίας</i>	<i>48</i>
<i>EIKONA 4.2.4 1 Ρωγμές σε γειτονικά κελιά</i>	<i>49</i>
<i>EIKONA 4.2.4 2 Άνοιγμα ρωγμών</i>	<i>50</i>
<i>EIKONA 4.2.4 3 Τελικό στάδιο αστοχίας</i>	<i>52</i>
<i>EIKONA 4.2.5 1 Αρχικές ρωγμές</i>	<i>54</i>
<i>EIKONA 4.2.5 2 Τελικό στάδιο αστοχίας</i>	<i>56</i>
<i>EIKONA 4.2.6 1 Ρωγμές σε οπές και ελαστικός λυγισμός</i>	<i>59</i>
<i>EIKONA 4.2.6 2 Τελικό στάδιο αστοχίας</i>	<i>60</i>
<i>EIKONA 5.2. 1 Κατάσταση W13 πριν τη στατική δοκιμή</i>	<i>65</i>
<i>EIKONA 5.3 1 Κατάσταση W6 πριν τη στατική δοκιμή</i>	<i>66</i>
<i>EIKONA 5.4 1 Κατάσταση W8 πριν τη στατική δοκιμή</i>	<i>67</i>
<i>EIKONA 5.5 1 Κατάσταση W8 πριν τη στατική δοκιμή</i>	<i>68</i>

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή προβλήματος

Βασικός στόχος στον σχεδιασμό μηχανολογικών κατασκευών είναι η επίτευξη κατασκευών υψηλής αντοχής και χαμηλού βάρους. Καλή λύση σε αυτό το πρόβλημα αποτελούν τα κυψελοειδή υλικά, σε χρήση με δομές συνθέτων τύπου σάντουιτς, που συνδυάζουν χαμηλό βάρος και ικανοποιητική αντοχή. Παρατηρώντας στη φύση υπάρχουν ποικίλα παραδείγματα τέτοιων δομών με χαρακτηριστικά παραδείγματα τα οστά και η κηρήθρα. Η δομή της κηρήθρας (hexagonal honeycomb) μάλιστα, με το επαναλαμβανόμενο μοτίβο εξαγωνικών κελιών (εικόνα 1.1.1) αποτελεί τον καλύτερο τρόπο πλήρωσης δισδιάστατων χώρων[1], περιλαμβάνοντας μεγαλύτερη επιφάνεια με μικρότερο περίμετρο, αλλά και χρησιμοποιεί λιγότερο υλικό για τον ίδιο όγκο σε σχέση με τετράγωνα ή τρίγωνα κελιά [2].



ΕΙΚΟΝΑ 1.1 1 Δισδιάστατη δομή εξαγωνικής κυψελίδας

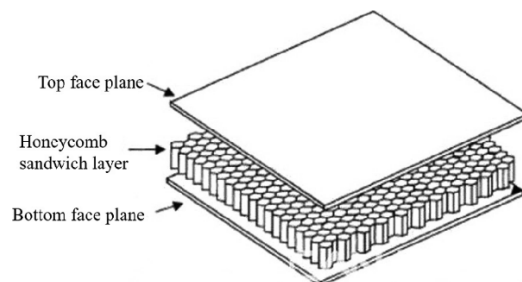
1.2 Σκοπός εργασίας

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε εξαγωνική δομή αλουμινίου 5052 (Εικόνα 1.2.1). Τέτοια δομή κυψελοειδών συναντώνται σε σύνθετα υλικά δομής sandwich (Εικόνα 1.2.2), όπου ο πυρήνας – κυψέλη περικλείεται από δύο πλάκες και η ένωση τους γίνεται με κάποιο μέσο κόλλησης, στην περίπτωση μας με εποξειδική κόλλα Hex Bond 609™. [3].

Μέσω των πειραμάτων μελετήθηκε η συμπεριφορά του πυρήνα της κυψέλης βάση προτύπου ASTM [4] σε κόπωση λόγω διάτμησης σε διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης (L&W), η επίδραση που είχε η ύπαρξη των οπών στα τοιχώματα καθώς και πώς επηρέασαν την απομένουσα αντοχή αστοχίες που προκλήθηκαν από κόπωση. Τέλος, στόχος των πειραμάτων ήταν η καλύτερη κατανόηση της διατμητικής αντοχής (κυκλικής και στατικής) της εξαγωνικής κυψελίδας μιας και η πολυπλοκότητα της την καθιστά δύσκολη στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της.



ΕΙΚΟΝΑ 1.2. 1 Εξαγωνική δομή αλουμινίου 5052



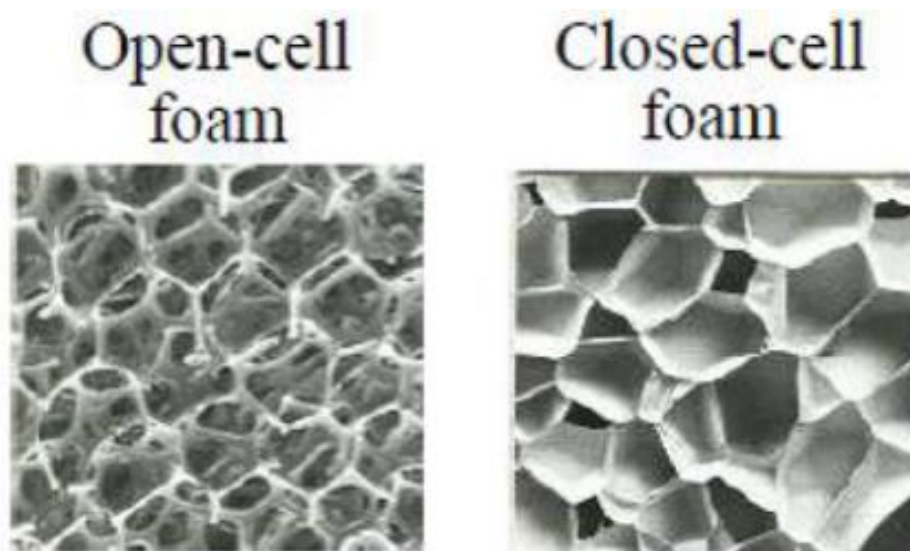
ΕΙΚΟΝΑ 1.2. 2 honeycomb sandwich panel

Κεφάλαιο 2: Υλικά Κυψελοειδούς Δομής

2.1 Κατηγορίες Κυψελοειδών Υλικών

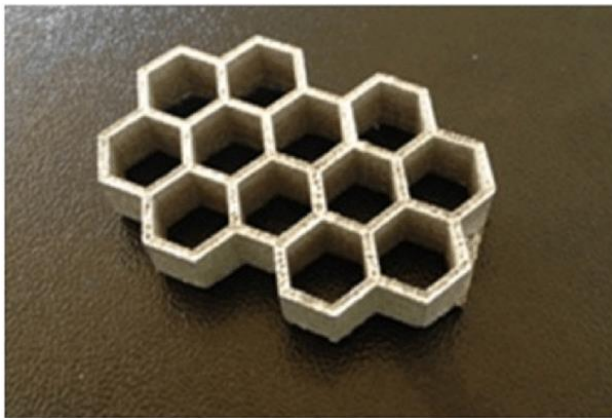
Ως κυψελοειδής θεωρείται μια δομή που δημιουργείται από ένωση ξεχωριστών κελιών της οποίας η σχετική πυκνότητα ρ^*/ρ είναι αρκετά χαμηλή και προσεγγιστικά μικρότερη από 0.3, όπου ρ^* η πυκνότητα του κυψελοειδούς υλικού και ρ η πυκνότητα του υλικού από το οποίο αυτό παρασκευάζεται. Τέτοια υλικά χαρακτηρίζονται από μεγάλο ποσοστό κενού όγκου, ενώ οι ιδιότητες τους έχουν άμεση σχέση με τη γεωμετρία και τη σχετική πυκνότητά τους.[2] Η κατηγοριοποίησή τους μπορεί να γίνει με βάση τρεις πυλώνες.

- Την αρχιτεκτονική των κελιών χαρακτηρίζοντάς τα ανοιχτών ή κλειστών κελιών (εικόνα 2.1.1). Στην πρώτη περίπτωση τα κελιά επικοινωνούν μεταξύ τους, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας δομής τους σπόγγους, ενώ στη δεύτερη τα κελιά διαχωρίζονται πλήρως από τοιχώματα, όπως για παράδειγμα ο αφρός πολυστυρενίου.

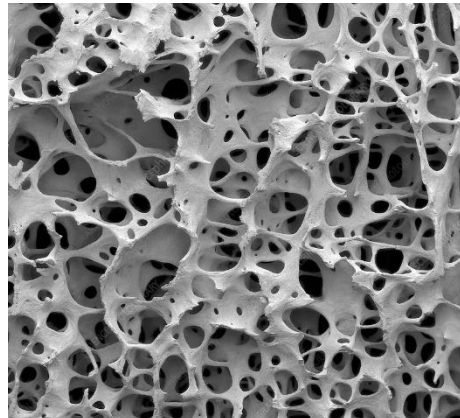


ΕΙΚΟΝΑ 2.1. 1 Δομή ανοιχτών και κλειστών κελιών

- Την οργάνωση της γεωμετρίας της δομής χωρίζοντάς τα σε κανονικά ή ακανόνιστα . Με τα κανονικά να έχουν μια επαναλαμβανόμενη διάταξη κελίων σε αντίθεση με την τυχαία κατανομή τους στην περίπτωση των ακανόνιστων κυψελοειδών. Ως κανονική δομή αντιπροσωπευτική είναι η περίπτωση των honeycombs (εικόνα 2.1.2) ενώ τα κόκκαλα (εικόνα 2.1.3) αποτελούν ακανόνιστες μορφές κυψελοειδών.

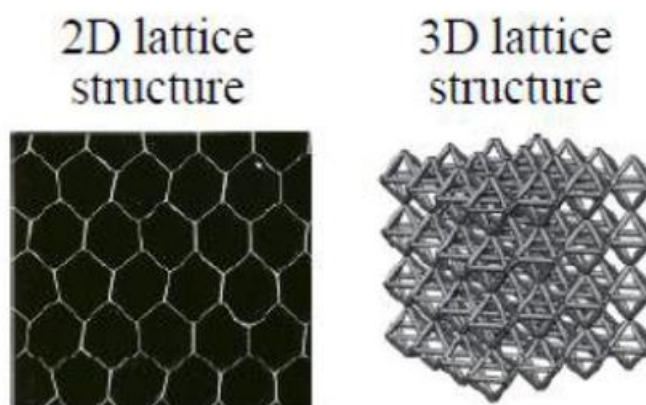


ΕΙΚΟΝΑ 2.1. 2 Κανονική δομή honeycomb



ΕΙΚΟΝΑ 2.1. 3 Ακανόνιστη δομή κοκάλων

- Τη διάσταση ανάπτυξης της δομής. Έτσι, δομές που αναπτύσσονται στο επίπεδο θεωρούνται δισδιάστατες ενώ δομές που αναπτύσσονται στο χώρο τρισδιάστατες (εικόνα 2.1.4). Τα honeycombs αποτελούν δισδιάστατη δομή και οι αφροί τρισδιάστατη.

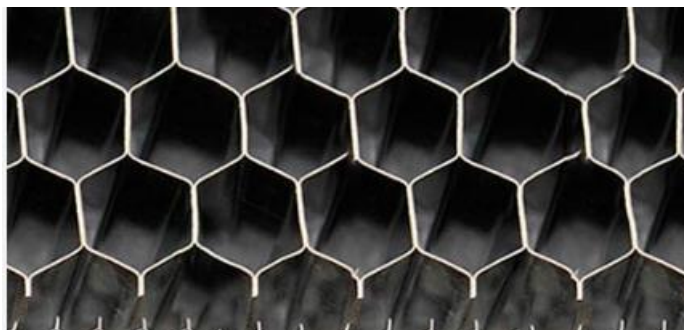


ΕΙΚΟΝΑ 2.1. 4 Δισδιάστατη και τρισδιάστατη διάταξη

2.2. Honeycomb

Τα κυψελοειδή τύπου honeycomb αποτελούνται από ομοιόμορφα κελιά που μπορεί να έχουν τρίγωνο, τετράγωνο ή εξαγωνικό σχήμα. Οι εξαγωνικές κυψέλες, οι οποίες προσομοιάζουν (στην εξιδανικευμένη μορφή της) την κηρήθρα της μέλισσας χρησιμοποιούνται, όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, σε δομές sandwich, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή δυνάμεων κατά μήκος της εκάστοτε επιφάνειας.

Το εξάγωνο σχήμα εξυπηρετεί σε πολλούς τομείς της μηχανικής. Αρχικά, η φύση από μόνη της εμφανίζει εξαγωνικά μοτίβα σε πολλές άλλες δομές πέραν της κηρήθρας, όπως αυτά του κελύφους της χελώνας καθώς και οι στήλες βασάλτη. Τα εξάγωνα, χάρη στο σχήμα τους, έχουν την καλύτερη πλήρωση χώρου ελαχιστοποιώντας την περίμετρο της εκάστοτε δοσμένης επιφάνειας λόγω των γωνιών τους (120 μοίρες) [1]. Έτσι, η ένταση που ασκείται στην επιφάνεια κατανέμεται προς κάθε διεύθυνση ομοιόμορφα και σταθερά. Επιπλέον, η ελάχιστη περίμετρος στις εξαγωνικές δομές οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του υλικού για την κατασκευή του κυψελοειδούς, οδηγώντας, μεταξύ άλλων, σε οικονομία.[2]



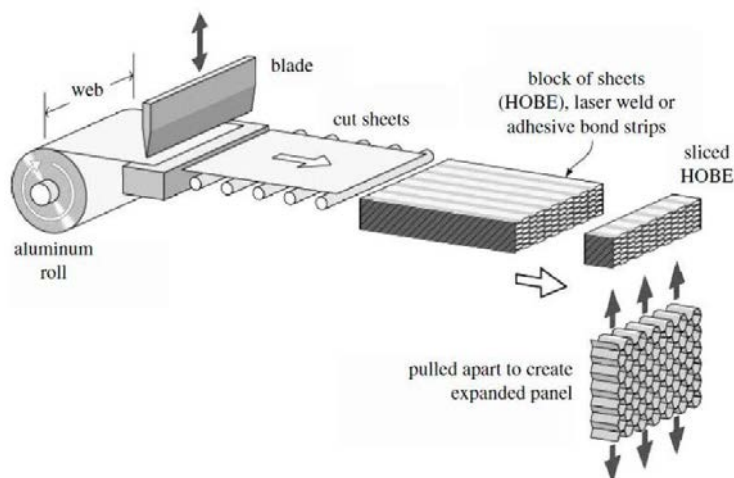
ΕΙΚΟΝΑ 2.2 1 Εξαγωνική δομή honeycomb

2.3 Τρόποι παρασκευής δομής honeycomb

Η κατασκευή μίας δομής honeycomb είναι μια πολύπλοκη και δαπανηρή διαδικασία και απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό. Ο βασικός στόχος είναι η κόλληση φύλλων του υλικού μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε η τελική μορφή να έχει την επιθυμητή δομή επαναλαμβανόμενων εξάγωνων. Η ένωση γίνεται με α) συγκόλληση με εναπόθεση κόλλας β) συγκόλληση με αντίσταση γ) συγκόλληση με θέρμανση και εναπόθεση μετάλλου δ) συγκόλληση με διάχυση και ε) θερμική σύντηξη. [5] Η συγκόλληση με εναπόθεση κόλλας (adhesive bonding) χρησιμοποιείται κατά κόρον για την παραγωγή τέτοιων δομών και μπορεί να επιτευχθεί είτε με κόλληση λεπτών ευθείων φύλλων και ξεδίπλωμά τους στη συνέχεια (Expansion method), είτε με κόλληση ήδη διαμορφωμένων με αυλακώσεις φύλλων (Corrugation method).

2.3.1 Μέθοδος με ξεδίπλωμα φύλλων (Expansion method)

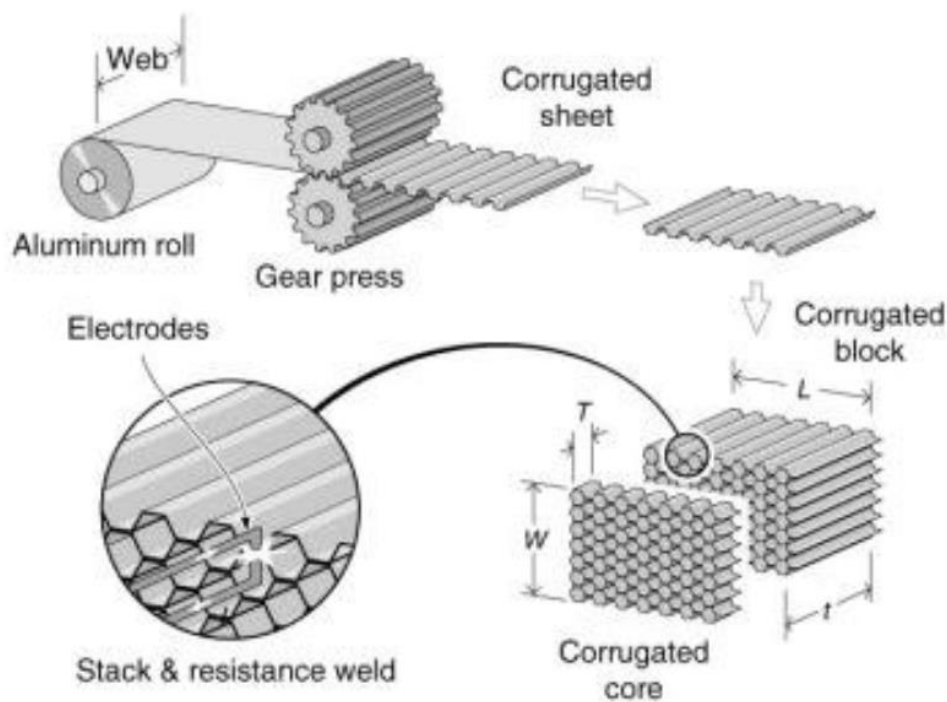
Με αυτή τη μέθοδο, λεπτά φύλλα από το υλικό που θα σχηματίσει το honeycomb κόβονται σε συγκεκριμένο μέγεθος. Πάνω σε κάθε φύλλο τοποθετούνται λωρίδες κόλλας, αλλά κάθε φορά με μια μικρή μετατόπιση (κατά το μισό της απόστασης των λωρίδων). Στη συνέχεια, τα φύλλα στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο, δημιουργώντας ένα ενιαίο «μπλοκ» κολλημένων φύλλων. Αυτό το συμπαγές μπλοκ κόβεται στο πάχος που θέλουμε να έχει ο πυρήνας, και έπειτα «ανοίγεται» σαν ακορντεόν, σχηματίζοντας την κυψελοειδή δομή του honeycomb. (εικόνα 2.3.1.1)



ΕΙΚΟΝΑ 2.3.1 1 Διαδικασία παραγωγής honeycomb με expansion method [6]

2.3.2 Αρχική δημιουργία αυλακώσεων (Corrugation method)

Σε αυτή τη μέθοδο, τα φύλλα περνούν πρώτα μέσα από ειδικούς κυλίνδρους με οδοντώσεις ώστε να αποκτήσουν κυματοειδές σχήμα. Έπειτα, τα διαμορφωμένα φύλλα συγκολλούνται μεταξύ τους με μία από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν (χρήση κόλλας, συγκόλληση με αντίσταση ή εναπόθεση μετάλλου), με αποτέλεσμα να σχηματίζεται το τελικό πάνελ honeycomb (εικόνα 2.3.2.1). Η τεχνική αυτή είναι ιδανική για την παραγωγή πυρήνων υψηλής πυκνότητας, όπου λόγω της σκληρότητας του υλικού δεν είναι εύκολη η διαδικασία ανοίγματος με τον τρόπο της επέκτασης.

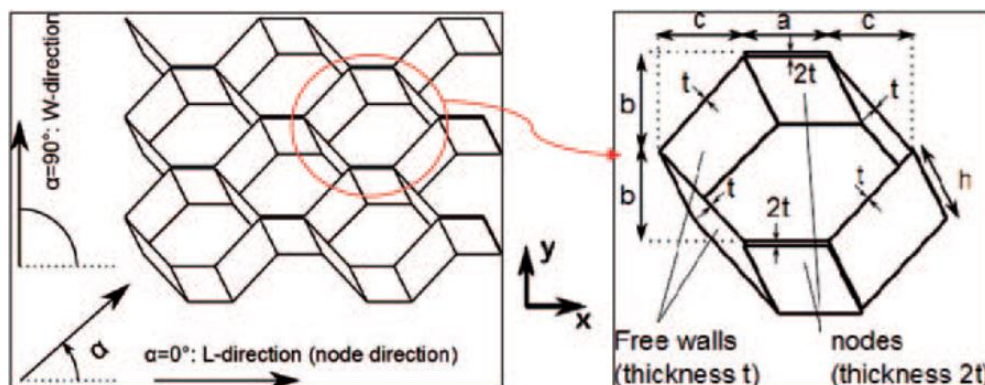


ΕΙΚΟΝΑ 2.3.2 1 Διαδικασία παραγωγής honeycomb με Corrugation method [6]

2.4 Παράμετροι της δομής honeycomb

Τα honeycomb αποτελούνται από εξαγωνικές κυψελίδες, των οποίων η γεωμετρία καθορίζει τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού σε διαφορετικές κατευθύνσεις φόρτισης. Εξαιτίας της μεθόδου κατασκευής, τα τοιχώματα των κυψελίδων δεν έχουν ομοιόμορφο πάχος: ορισμένα σχηματίζονται διπλά ($2t$), ενώ άλλα παραμένουν απλά (t). Αυτό οδηγεί στη δημιουργία δύο κύριων διευθύνσεων φόρτισης με διαφορετική αντοχή.

- Διεύθυνση L ($\alpha = 0^\circ$): Αντιστοιχεί στη φόρτιση παράλληλα με τα παχύτερα τοιχώματα ($2t$) των εξάγωνων. Πρόκειται για την «ισχυρή διεύθυνση» του πυρήνα, καθώς παρουσιάζει τη μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα.
- Διεύθυνση W ($\alpha = 90^\circ$): Ορίζεται όταν το υλικό περιστραφεί κατά 90° σε σχέση με τον κεντρικό άξονα της κυψελίδας. Σε αυτήν τη διάταξη τα φορτία μεταφέρονται μέσω των λεπτότερων τοιχωμάτων (t), με αποτέλεσμα η αντοχή να είναι αισθητά μικρότερη.

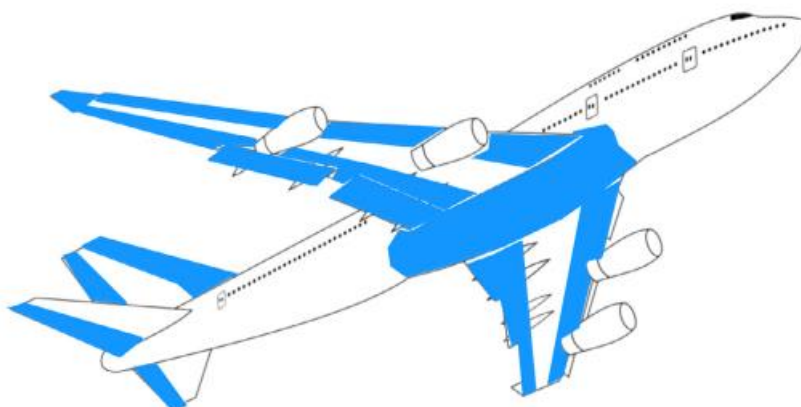


ΕΙΚΟΝΑ 2.4 1Δομή honeycomb [7]

2.5 Εφαρμογές κυψελοειδών υλικών

Οι αλουμινένιες δομές honeycomb βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική, ναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία, χάρη στην ικανότητά τους να συνδυάζουν ελαφριά κατασκευή με εξαιρετική αντοχή και απορροφητικότητα κραδασμών, καλύπτοντας κοινές εφαρμογές όπως εσωτερικά πάνελ, διαχωριστικά και δομικά στοιχεία φορτίου. Στην αεροναυπηγική, όπου η μείωση του βάρους και η διατήρηση της αντοχής είναι υψηλής σημασίας, χρησιμοποιούνται σε εσωτερικά τοιχώματα και πάνελ αεροσκαφών [8], καθώς και σε σήραγγες ελέγχου ροής αέρα [9]. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, ενσωματώνονται σε αντίστοιχα εσωτερικά πάνελ και δομικά μέρη φορτηγών ή λεωφορείων, απορροφώντας κραδασμούς από δυναμικές φορτίσεις [10].

Επιπλέον, χρήση τους παρατηρείται και στον τον τομέα της αρχιτεκτονικής και των κατασκευών. Οι δομές honeycomb από αλουμίνιο χρησιμοποιούνται σε προσόψεις κτιρίων, στέγες, τοίχους κουρτίνας και ανελκυστήρες, προσφέροντας ελαφριά κατασκευή που μειώνει το κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης, ενώ αντέχουν σε υψηλούς ανέμους και σεισμούς [11]. Αυτά τα χαρακτηριστικά έρχεται να συμπληρώσει και η διαμορφοσιμότητά τους, καθώς η ευκαμψία τους τα καθιστά ιδανικά για αρχιτεκτονικές εφαρμογές όπου η καλαισθησία απαιτεί περίπλοκα σχήματα [12].



ΕΙΚΟΝΑ 2.5 1 Sandwich δομές (με μπλε χρώμα) στο Boeing 747 [8]



EIKONA 2.5.2 La Bella Vita, Taichung City, Taiwan,

2.6 Αποτελέσματα ερευνών

Η χρήση των κυψελοειδών υλικών σε πληθώρα εφαρμογών δημιούργησε την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη τους ώστε να γίνουν περισσότερο αντιληπτές τόσο οι μηχανικές ιδιότητες τους όσο και οι μηχανισμοί αστοχίας τους. Έτσι, πολλοί ερευνητές διεξήγαγαν έρευνες για την καλύτερη κατανόηση των δομών.

Αρχικά, για δομές με πυρήνα εξαγωνικών κυψελίδων τύπου sandwich φαίνεται ότι είναι ανθεκτικότερες σε διάτμηση κατά μήκος της L διεύθυνσης σε σχέση με την W . Οι Gibson & Ashby αναλύουν την μηχανική αντοχή των εξαγωνικών κυψελοειδών δομών (honeycombs) δείχνοντας την ανισοτροπία τους σε διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης. Κατά τη διεύθυνση L το φορτίο κατανέμεται κυρίως στα τοιχώματα που είναι στην ίδια διεύθυνση με τη φόρτιση ενώ στην W τα λοξά τοιχώματα δέχονται το φορτίο εγκάρσια με αποτέλεσμα να κάμπτονται και να στρέφονται στους κόμβους, καθιστώντας έτσι την L διεύθυνση ισχυρότερη [1]. Σε αντίστοιχα αποτελέσματα κατέληξαν και οι S. Li et al. μετά από ενδελεχή έρευνα. [13]

Οι Yang Zhao, Meng Ge*, Wenlai Ma [14] με χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μελέτησαν τη συμπεριφορά του μέτρου ελαστικότητας E στον πυρήνα εξαγωνικών κυψελίδων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, έρχονται σε συνεννόηση με πειραματικά αποτελέσματα του Gibson για μικρές παραμορφώσεις και έδειξαν πως στην L θυσση το E_L αυξάνει καθώς αυξάνει τόσο η αναλογία t/l όσο και η h/l ενώ στην W διεύθυνση το E_W αυξάνει με αύξηση του t/l , αλλά μειώνεται με αύξηση του h/l . Στη συνέχεια, με γνώμονα πειραματικά αποτελέσματα του Qiu φαίνεται τόσο στη W και κυρίως στην L μη γραμμική αύξηση του E για μεγάλες παραμορφώσεις ενώ παρατηρώντας τα αποτελέσματα φαίνεται όπως και παραπάνω υπεροχή της αντοχής στην διεύθυνση L .

Οι Wahl et al. [15] μέσα από την εργασία τους τόσο με χρήση πεπερασμένων στοιχείων όσο και με πειράματα κάμψεις τριών σημείων και κόπωσης σε διάτμηση έβγαλαν σημαντικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά των εξαγωνικών κυψελοειδών δομών sandwich ανάλογα τη γωνία φόρτισης διατμήσεως. Αποδείχτηκε πως η πιο ευάλωτη διεύθυνση είναι για γωνία $\alpha=62^\circ$ ενώ η πιο ισχυρή η διεύθυνση L επιβεβαιώνοντας ξανά την υπεροχή της L διεύθυνσης στην καταπόνηση μέσω διάτμησης.

Οι Bianchi et al. [16] τόσο πειραματική όσο και με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν πως η L διεύθυνση υπερέχει και σε στατική φόρτιση, αλλά και στην κόπωση. Επιπλέον, συμπέραναν πως σημαντική αύξηση στην αντοχή υπάρχει σε διεύθυνση φόρτισης από 45° ως 0° (L διεύθυνση) με την W διεύθυνση να μην είναι η πιο αδύναμη, αλλά στα δικά τους πειράματα η φόρτιση στις $67,5^\circ$, επιβεβαιώνοντας την παραπάνω εργασία.

Σε μια αναλυτική εργασία οι Kermanidis et al. [17] μελέτησαν την επίδραση σε διάτμηση στον πυρήνα τόσο της διεύθυνσης φόρτισης, αλλά και της ύπαρξης ή όχι οπών στον πυρήνα των κυψελίδων. Μέσω στατικών πειραμάτων φόρτισης-αποφόρτισης αναδείχτηκε πως την περίπτωση φόρτισης στη L διεύθυνση τόσο το ελαστικό μέτρο διατμήσεων όσο και η μέγιστη αντοχή σε διάτμηση είναι υψηλότερα σε σχέση με φόρτιση στην W διεύθυνση, ενώ σε συμφωνία ήρθαν και τα αποτελέσματα από μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ένα κελί. Επιπλέον, η παρουσία οπών δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την L διεύθυνση, αντιθέτως στην W διεύθυνση συμβαίνει το αντίθετο τόσο στα πειράματα όσο και στο μοντέλο. Παρατηρούνται

εντονότεροι μηχανισμοί λογισμού καθώς και σημαντική μείωση τόσο στο ελαστικό μέτρο διατμήσεων όσο και στην μέγιστη αντοχή.

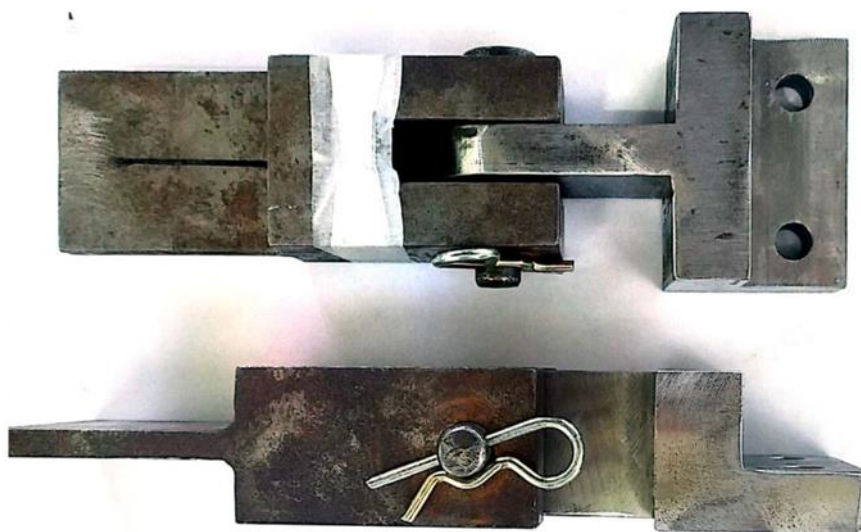
Οι Q. Zhou και R. Mayer [18] με πειραματική μελέτη παρατήρησαν την υπεροχή της T διεύθυνσης σε θλιπτικά φορτία με τη αντοχή στις διευθύνσεις L και W να είναι ίσες με το 3% της T, ενώ μεταξύ των δύο τελευταίων πάλι παρατηρήθηκε καλύτερη συμπεριφορά στην L. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί και ο τρόπος αστοχίας σε κάθε περίπτωση. Στην T-L φόρτιση κυρίαρχος τρόπος είναι το σχίσσιμο των κυψελών, στην T-W η αποκόλληση, ενώ στο W-L δεν υπερτερεί κάποιος μηχανισμός.

Οι Hyo S. Lee και Soon H. Hong [19] με πειραματική μελέτη ανέδειξαν τους μηχανισμούς αστοχίας κατά τη διάρκεια διάτμησης πυρήνα στην L διεύθυνση και θλίψης στην T. Στην πρώτη περίπτωση η αρχική ελαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων ακολουθείται από πλαστική και στη συνέχεια προκύπτουν ρωγμές και τελικά αποκόλληση μεταξύ πυρήνα και επικάλυψης. Στην περίπτωση θλιπτικών φορτίων ο αρχικός ελαστικός λυγισμός ακολουθείται από πλαστικό λυγισμό και αποκόλληση μεταξύ γειτονικών κελιών και τελικό στάδιο αστοχίας αποτελούν οι ρωγμές στην επιφάνεια των τοιχωμάτων. Μια ακόμα μελέτη στους μηχανισμούς αστοχίας σε διάτμηση πυρήνα στην L διεύθυνση από τους Shi-Dong Pan et al. [20] κατέληξε στα ίδια τέσσερα στάδια αστοχίας.

Κεφάλαιο 3: Πειραματική Διαδικασία

3.1 Περιγραφή

Η διαδικασία των πειραμάτων χωρίζεται σε δύο στάδια. Αρχικά, για να επιτευχθεί η διάτμηση του πυρήνα honeycomb, απαιτείται η χρήση ιδιοσυσκευής διάτμησης (εικόνα 3.1.1) στην οποία το honeycomb περικλείεται από δύο πλάκες και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διαδικασία του πειράματος.

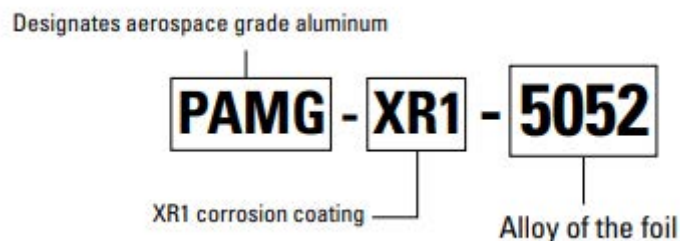


ΕΙΚΟΝΑ 3.1. 1Ιδιοσυσκευή πειραματικής μελέτης εργαστηρίου Π.Θ. [21]

3.2 Μέρη κατασκευής δομής

3.2.1 Δοκίμια Honeycomb

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε honeycomb (PAMG-XR1 5052)[22]. Είναι ένα ελαφρύ υλικό πυρήνα που προσφέρει καλή αντοχή σε διατμητικές καταπονήσεις και αντοχή στη διάβρωση, με προστατευτικό στρώμα τύπου XR1. Τα honeycomb PAMG-XR1 5052 είναι κατασκευασμένα από φύλλο κράματος αλουμινίου 5052 και παρέχονται με ή χωρίς ύπαρξη οπών στα τοιχώματα των κυψελίδων.

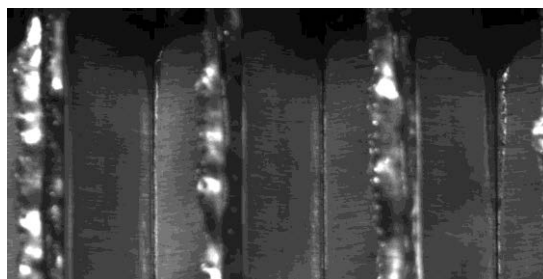


ΕΙΚΟΝΑ 3.2.1. 1 Κατηγοριοποίηση πυρήνα

Μελετήθηκαν και οι δύο τύποι honeycomb, τόσο με όσο και χωρίς οπές (εικόνα 3.2.1.2) (εικόνα 3.2.1.3). Οι οπές στα honeycomb αλουμινίου 5052 προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, κυρίως σε σχέση με τη διευκόλυνση του εξαερισμού. Συγκεκριμένα, οι οπές επιτρέπουν: την επικοινωνία μεταξύ των κυψελών, η οποία είναι σημαντική σε εφαρμογές που απαιτούν εξισορρόπηση κενού ή πίεσης, όπως στα αεροδιαστημικά εξαρτήματα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του ελέγχου της ροής του αέρα σε εφαρμογές όπως οι αεροδυναμικές σήραγγες[9]. Στα honeycomb χωρίς οπές, τα τοιχώματα των κυψελίδων αποτελούνται από φύλλα αλουμινίου ακολουθώντας την ίδια κατασκευαστική διαδικασία χωρίς, ωστόσο, να έχει τη διάνοιξη των οπών στα φύλλα. Οι εφαρμογές είναι αντίστοιχες, με διαφορά τη μειωμένη χρήση σε εφαρμογές όπου απαιτείται η κυκλοφορία αέρα, όπως αναφέρεται παραπάνω.



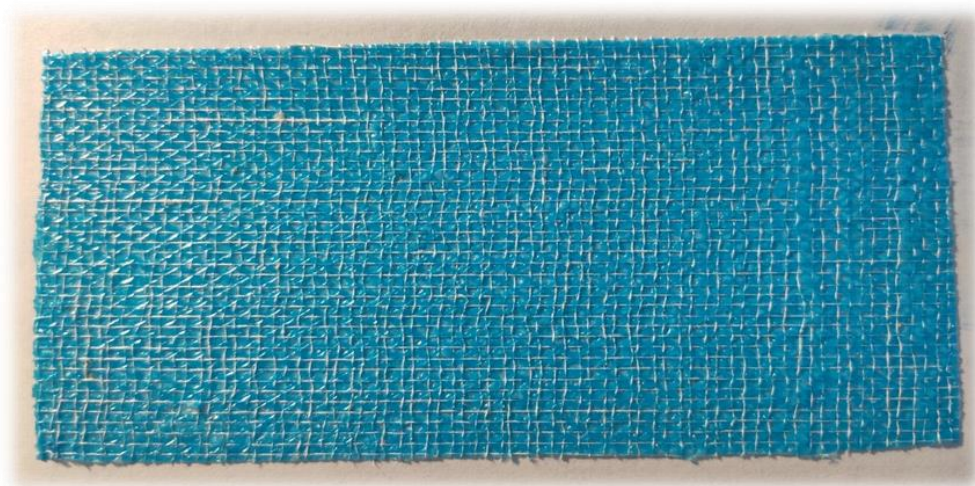
ΕΙΚΟΝΑ 3.2.1. 2 Honeycomb με οπές



ΕΙΚΟΝΑ 3.2.1. 3 Honeycomb χωρίς οπές

3.2.2 Κόλλα Hex Bond 609™[3]

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ισχυρή κόλληση του πυρήνα honeycomb μεταξύ των πλακών, ώστε να αποφευχθεί αποκόλληση. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, κατά την διάρκεια των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική κόλλα Hex Bond 609™, ενισχυμένη με ίνες (εικόνα 3.2.2.1). Η κόλλα αποτελείται από λεπτά φιλμ τα οποία προσδίδουν τις ιδιότητές τους μέσω της θερμικής επεξεργασίας, με μέγιστες ιδιότητες να επιτυγχάνονται με σταδιακή θέρμανση ως τους 120°C και παραμονή σε αυτή τη θερμοκρασία για μία ώρα (εικόνα 3.2.2.2).



ΕΙΚΟΝΑ 3.2.2 1 Κόλλα HEX BOND 609 TM

Alternative Cure Cycles

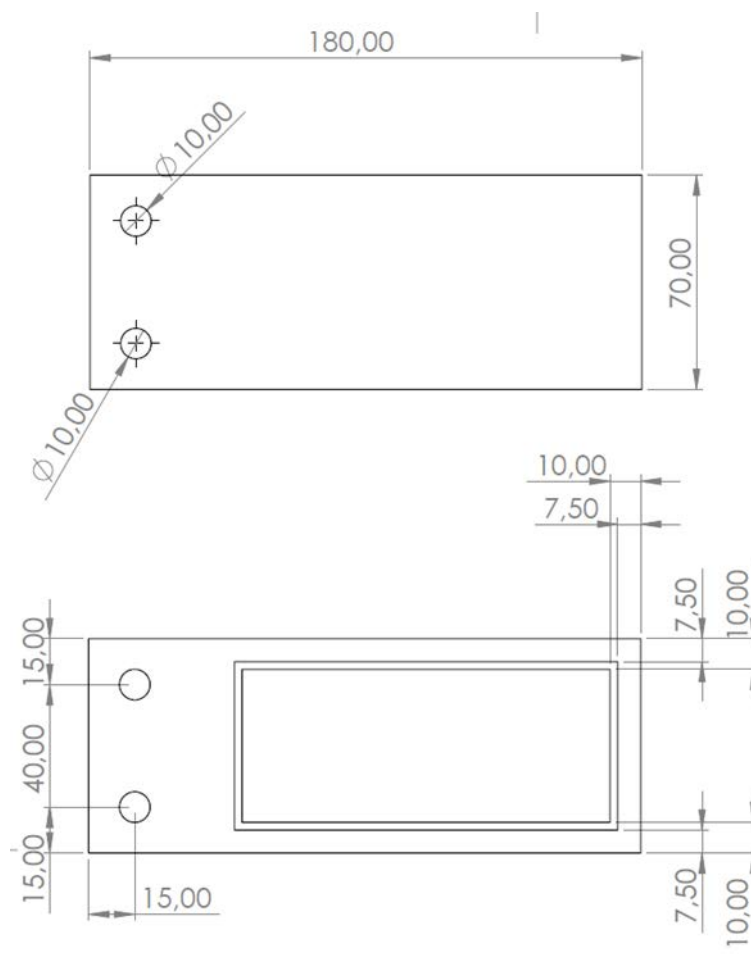
Temperature (°C)	180	170	160	150	140	130	120	110	100	below 100°C incomplete cure
Time (min)	5	7	8	10	20	30	60	120	240	

ΕΙΚΟΝΑ 3.2.2 2 Οδηγίες θέρμανσης κατασκευαστή

3.2.3 Πλακίδια Αλουμινίου

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη διάτμησης στον πυρήνα honeycomb, είναι απαραίτητη η κόλληση του πυρήνα σε δομή τύπου sandwich. Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν πλάκες αλουμινίου 5052- H32H, κράματος αντίστοιχου του υλικού του πυρήνα honeycomb για ομοιογενή συμπεριφορά των μερών του δοκιμίου κατά την θερμική επεξεργασία και κατ' επέκταση αποφυγή παραμενουσών τάσεων από τυχόν διαφορετική διαστολή-συστολή των μερών της δομής. Οι διαστάσεις των πλακιδίων

που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια των πειραμάτων συνοψίζονται στο παρακάτω σχέδιο. Το πάχος των πλακιδίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 10mm.

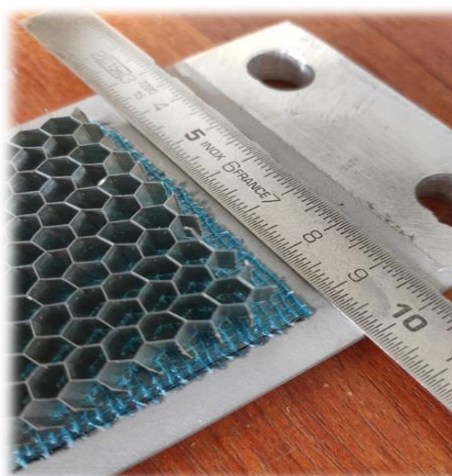


ΕΙΚΟΝΑ 3.2.3. 1 Διαστάσεις πλακιδίων της δομής σάντουιτς

3.3 Κατασκευή δοκιμίων

Η συναρμολόγηση των δομών έγινε σε τρία στάδια. Αρχικά, στις πλάκες αλουμινίου εφαρμόστηκε η κατεργασία της αμμοβολής, όπως προτείνει ο κατασκευαστής [3], ώστε να είναι λείες και να υπάρχει πιο ομοιόμορφη επιφάνεια κόλλησης και να αφαιρεθεί η οξείδωση της επιφάνειας λόγω έκθεσης στον αέρα. Επόμενο βήμα, ύστερα από την προετοιμασία των πλακιδίων, αποτελεί η κόλληση. Η κοπή της κόλλας στις σωστές διαστάσεις (125mm x 55mm) είναι τέτοιες ώστε το δοκίμιο honeycomb να τοποθετείται εντός της κόλλας, αφήνοντας περιθώρια από τις άκρες τις κόλλας. Η κόλλα τοποθετείται εντός των περιθωρίων που έχουν σχεδιαστεί στην επιφάνεια της πλάκας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα στην εικόνα 3.2.3.1. Ύστερα από την τοποθέτηση της κόλλας επάνω στα πλακίδια τοποθετούνται οι σφιγκτήρες και γίνεται

μέτρηση του πάχους του δοκιμίου. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή της κόλλας η μέγιστη τάση που θα πρέπει να εφαρμοστεί στην κόλλα είναι 350GPa. Από έρευνα στα πλαίσια προηγούμενων διπλωματικών εργασιών [23], προέκυψε ότι η μέγιστη τάση που θα πρέπει να εφαρμοστεί αντιστοιχεί σε 0.4mm βύθισης του δοκιμίου honeycomb εντός της κόλλας. Συνεπώς, μετρώντας με το παχύμετρο, η σύσφιξη των σφιγκτήρων ολοκληρώνεται μόλις επιτευχθεί η αντίστοιχη βύθιση (εικόνα 3.3.2).



ΕΙΚΟΝΑ 3.3. 1 Τοποθέτηση κόλλας - πυρήνα



ΕΙΚΟΝΑ 3.3. 2 Σύσφιξη δομής

Τελικό στάδιο της συναρμολόγησης αποτελεί η θερμική κατεργασία της κόλλας σε ατμοσφαιρικό φούρνο (εικόνα 3.3.3). Ο χρόνος και η θερμοκρασία της κόλλησης καθορίζονται από τον κατασκευαστή της κόλλας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ο βέλτιστος τρόπος θέρμανσης με βάση τον κατασκευαστή ο οποίος προβλέπει θερμοκρασία 120°C για 1 ώρα. Επίσης, η θέρμανση των δοκιμίων έγινε σταδιακά με ρυθμό $\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, από συνθήκες περιβάλλοντος μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία. Μετά την ολοκλήρωση της θέρμανσης το δοκίμιο αφηνόταν να ψυχθεί μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος προτού αφαιρεθούν οι σφιγκτήρες.



ΕΙΚΟΝΑ 3.3. 3 Ατμοσφαιρικός φούρνος

3.4 Πρότυπο ASTM- C273

Βασικό στοιχείο για κάθε πειραματική μελέτη αποτελεί η τήρηση των προδιαγραφών που καθορίζουν τις συνθήκες του πειράματος και, ως εκ τούτου, η τήρηση μίας ενιαίας βάσης αναφοράς μεταξύ των μελετητών. Η διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε κατά το πρότυπο ASTM- C273[4]. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-C273 καθιερώθηκε ο τύπος της ιδιοσυσκευής για μελέτη δοκιμίων τύπου sandwich με πυρήνα από κυψελοειδές υλικό. Η ιδιοσυσκευή χρησιμοποιείται για την σύσφιξη του δοκιμίου επάνω στην μηχανή δοκιμής και αποτελείται από δύο αρθρώσεις με στόχο η αξονική δύναμη που επιβάλλεται από τη μηχανή να διέρχεται από τη διαγώνιο δύο απέναντι γωνιών των πλακών (εικόνα 3.4.1). Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της καθαρής διάτμησης του δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού.

3.5 Εργαστηριακός Εξοπλισμός

Τα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν στην Instron[24] (εικόνα 3.5.1.1) η οποία αποτελεί μηχανή για δοκιμές υλικών τα οποία υποβάλλονται σε μονοαξονικά φορτία. Η μηχανή διαθέτει ένα σύστημα από αρπάγες επάνω στις οποίες συνδέεται η ιδιοσυσκευή, προκειμένου το δοκίμιο να υποβάλλεται σε διατμητικά φορτία. Τα πειράματα εναπομένουσας αντοχής, καθώς και η προεπάρχουσα από κόπωση καταπόνηση αυτών των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή MTS 810[25] (εικόνα 3.5.1.2), η οποία είναι μηχανή ίδιας λειτουργίας με την προαναφερθείσα.



ΕΙΚΟΝΑ 3.5.1 1 INSTRON



ΕΙΚΟΝΑ 3.5.1 2 MTS

Ο οπτικός έλεγχος και απεικόνιση των ρωγμών και των αστοχιών έγιναν με τη χρήση DSLR κάμερας Cannon (εικόνα 3.5.2 1) με ειδικό για κοντινές αποστάσεις macro φακό (εικόνα 3.5.2 2) . Η ύπαρξή της ήταν καίρια καθώς χωρίς αυτή δε θα ήταν δυνατή η καθαρή απαθανάτιση των ρωγμών πάνω στα κελιά των κυψελών.



EIKONA 3.5.2 1 CANON 750D



EIKONA 3.5.2 2 MACRO LEN

3.6 Πειράματα διάτμησης

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν δύο κατηγορίες πειραμάτων: πειράματα κόπωσης και πειράματα απομένουσας αντοχής σε καθαρή διάτμηση πυρήνων honeycomb. Σε αμφότερους τους τύπους πειραμάτων τα φορτία μεταφέρθηκαν στον πυρήνα μέσω της ιδιοσυσκευής και της δομής sandwich με βάση το πρότυπο ASTM-C273. Έτσι, τα αξονικά φορτία που επιβάλλονται από την μηχανή να μετατρέπονται σε καθαρή διάτμηση του honeycomb. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 και Κεφάλαιο 5.

3.6.1 Περιγραφή Δοκιμών Κόπωσης

Στα πειράματα της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις τύποι δοκιμών, ανάλογα με την διεύθυνση των κυψελών και την ύπαρξη ή μη οπών, ίδιων διαστάσεων (120x50x10) (μήκος x πλάτος x πάχος) με $R=0.1$. Έτσι λοιπόν εξετάστηκαν:

- Δοκίμια L διεύθυνσης χωρίς οπές
- Δοκίμια L διεύθυνσης με οπές
- Δοκίμια W διεύθυνσης χωρίς οπές
- Δοκίμια W διεύθυνσης με οπές

Χαρακτηρισμός	Περιγραφή
Δοκίμιο LX_XX	Διεύθυνση κελιών L
Δοκίμιο WX_XX	Διεύθυνση κελιών W
Δοκίμιο XX_UP	Δοκίμιο χωρίς οπές (unperforated)
Δοκίμιο XX_P	Δοκίμιο με οπές (perforated)
ribbon	Διπλό τοίχωμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6.1 1 Συνοτομογραφίες και εκφράσεις

Ονομασία	Διεύθυνση Κυψελών	Υπαρξη Οπών	Εύρος Φόρτισης (kN)
L4_UP	L	OXI	0.35-3.5
L2_P	L	NAI	0.45-4.5
L6_UP	L	OXI	0.45-4.5
L3_P	L	NAI	0.55-5.5
L5_UP	L	OXI	0.55-5.5
W1_P	W	NAI	0.35-3.5
W2_P	W	NAI	0.35-3.5
W5_P	W	NAI	0.4-4.0
W3_UP	W	OXI	0.45-4.5
W9_P	W	NAI	0.45-4.5
W4_UP	W	OXI	0.55-5.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6.1 2 Χαρακτηριστικά δοκιμών κόπωσης

3.6.2 Πειράματα Κόπωσης

Τα πειράματα κόπωσης πραγματοποιήθηκαν με λόγο τάσεων $R=0,1$ στην ελαστική περιοχή των δοκιμών, όπως προσδιορίστηκε από προηγούμενες εργασίες [7] [23] [26] και επιβεβαιώθηκε από την πολυκυκλική συμπεριφορά των δοκιμών. Στόχος των πειραμάτων ήταν η όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της δομής υπό κυκλική φόρτιση διάτμησης. Έτσι, βγήκαν συμπεράσματα για την διάρκεια ζωής, την επίδραση των κύκλων φόρτισης στην στιβαρότητα της δομής μας, αλλά και τον τρόπο εξέλιξης των αστοχιών και την τελική βλάβη της.

Αναλυτικότερα, η μελέτη των δοκιμών χωρίστηκε σε συστηματική οπτική παρακολούθηση κατά τη διάρκεια του πειράματος και επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφηκαν από τα μετρητικά όργανα (δυναμόμετρο και προσδιορισμός θέσης εμβόλου) της Instron. Μέσα από τον οπτικό έλεγχο λοιπόν, παρατηρήθηκε το πότε παρουσιάστηκε η πρώτη ρωγμή, η εξέλιξή της και η δημιουργία νέων, οι πιθανότερες θέσεις εμφάνισης τους, φαινόμενα λυγισμού και αποκόλλησης με το πέρασμα των κύκλων φόρτισης και η τελική μορφή αστοχίας της εκάστοτε δομής. Στη συνέχεια, περνώντας τα αποτελέσματα των καταγραφών της Instron ποσοτικοποιήθηκαν τα οπτικά ευρήματα και έγινε μια πιο ακριβή αναπαράσταση της προοδευτικής υποβάθμισης της ακεραιότητας της δομής. Τα πειράματα κόπωσης έγιναν με έλεγχο φορτίου συνεπώς η μεταβολή του εύρους μετατόπισης του ΔU (αύξηση του εύρους Δu), σχετίζεται με την μεταβολή της δυσκαμψίας του δοκιμίου αφού για τα ίδια φορτία απαιτούνται μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά την δοκιμή κόπωσης. Η υποβάθμιση δυσκαμψίας μπορεί να προέλθει από πλαστικές παραμορφώσεις κελιών, αποκόλληση μεταξύ του βασικού κορμού και της κόλλας, ανάπτυξη ρωγμών και μια γενικότερη μείωση της δυνατότητας παραλαβής των φορτίων από τη δομή. Στη συνέχεια, μέσω της αναπαράστασης φορτίων – μετατόπισης για συγκεκριμένους κύκλους υπολογίστηκε η κλίση για τους κύκλους αυτούς που είναι η δυσκαμψία της δομής μας, καθώς και την υποβάθμισή της με το πέρασμα των κύκλων. Για τον υπολογισμό λαμβάνονται 250 σημεία στον κύκλο και η κλίση είναι η κλίση ευθείας με μορφή $y=ax+b$, που αποτελεί την ευθεία που ελαχιστοποιεί το άθροισμα τετραγώνων των αποστάσεων από κάθε σημείο δεδομένων μέχρι την ευθεία. Η ευθεία επιλέχθηκε να είναι γραμμική, αφού είμαστε στην ελαστική περιοχή και τα σημεία δεν αποκλίνουν από γραμμική αναπαράσταση.

3.6.3 Πειράματα Απομένουσας Αντοχής

Τα πειράματα απομένουσας αντοχής χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί πώς μειώνεται η αντοχή ενός υλικού ή μιας κατασκευαστικής δομής αφού έχει ήδη υποστεί κύκλους κόπωσης. Το πρώτο σκέλος της διαδικασίας περιλαμβάνει πειράματα κόπωσης δοκιμίων με οπές (perforated) κυψελίδες προσανατολισμένες στην W διεύθυνση (W), τα οποία διεξήχθησαν υπό εναλλασσόμενη φόρτιση 0,35–3,5kN, με σκοπό την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του honeycomb. Πέραν της παρακολούθησης της πτώσης της δυσκαμψίας (λαμβάνοντας σε πραγματικό χρόνο δεδομένα για την πληροφορία ενώ το πείραμα κόπωσης βρισκόταν σε εξέλιξη), λήφθηκε υπόψιν ο αριθμός κύκλων ζωής για κάθε δοκίμιο που επιλέχθηκε, όπως και ο αριθμός των ρωγμών που αναπτύχθηκαν. Το δεύτερο σκέλος της διαδικασίας αφορά στατικά πειράματα διάτμησης των παραπάνω δοκιμίων, τα οποία πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο μετατόπισης ώστε να μην ξεπεραστούν κρίσιμα φορτία και επιβεβαίωσαν την υπόθεση περί υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω της μεταβολής της θέσης του σημείου θραύσης σε διάτμηση.

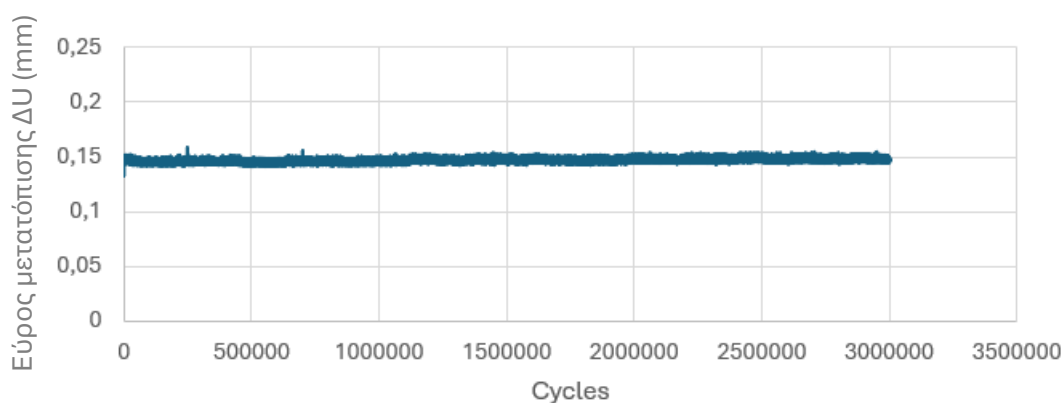
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα πειραμάτων Κόπωσης σε Διάτμηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων κόπωσης της πειραματικής μελέτης που έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Θα γίνει πλήρης αναφορά στις συνθήκες των δοκιμών και στα αποτελέσματα που προέκυψαν.

4.1 Διεύθυνση L

4.1.1 Δοκίμιο L4_UP

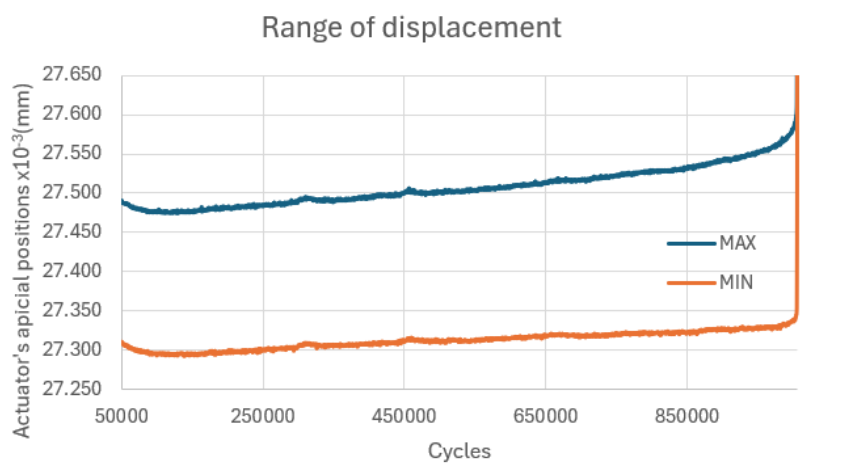
Το συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν το πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε και η προσέγγισή του ήταν ιδιαίτερα συντηρητική. Το εύρος φορτίων που εφαρμόστηκε ήταν 0,35-3,5 kN και δεν παρατηρήθηκε υποβιβασμός της ακεραιότητας ούτε εμφάνιση ρωγμών ή άλλων ατελειών οπότε διακόπηκε στους 3.500.000 κύκλους και δεν έγινε κάποια ιδιαίτερη ανάλυση. Παρακάτω φαίνεται η μεταβολή ΔU (Διάγραμμα 4.1.1.1) κατά τη διάρκεια του πειράματος που παραμένει σταθερή και υποδηλώνει πως δεν υπάρχουν φαινόμενα που υποβαθμίζουν το δοκίμιο.



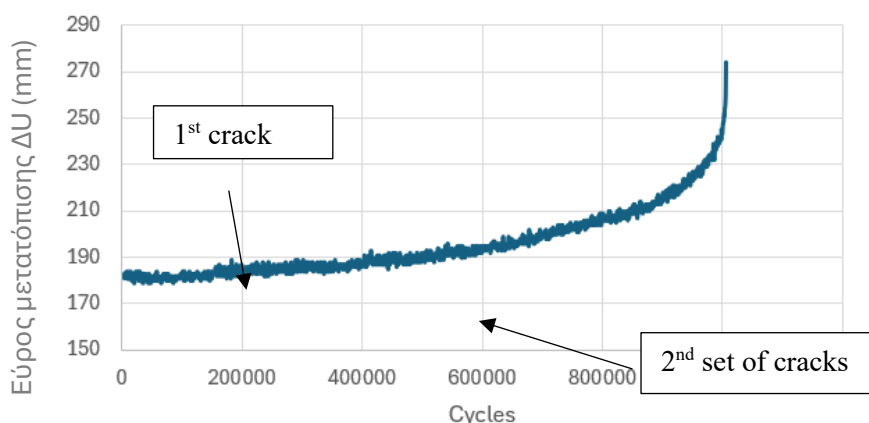
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.1. 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L4_UP-Αύξηση εύρους μετατόπισης με κύκλους

4.1.2 Δοκίμιο L2_P

Το συγκεκριμένο δοκίμιο εξετάστηκε σε εύρος φορτίων 0,45-4,5 kN και εκτέλεσε 1.006.000 κύκλους μέχρι την ολική του καταστροφή. Πρώτη ορατή ρωγμή εμφανίστηκε στους 250.000 κύκλους, ενώ ακολούθησαν πληθώρα ρωγμών. Με το πέρασμα των κύκλων αρκετές πέρασαν σε γειτονικές κυψέλες ή ενώθηκαν με ρωγμές από γειτονικά κελιά και ξεκίνησαν κυρίως από θέσης οπών με προσανατολισμό 45 μοιρών ως προς το ribbon. Παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.1.2.1 και 4.1.2.2 φαίνεται ένα άνοιγμα και μια αυξητική τάση αντίστοιχα που υποδηλώνει τη δομική εξασθένηση του δοκιμίου. Αυτή η μεταβολή παρατηρείται να συμβαίνει εντονότερα μετά από δημιουργία ρωγμών.

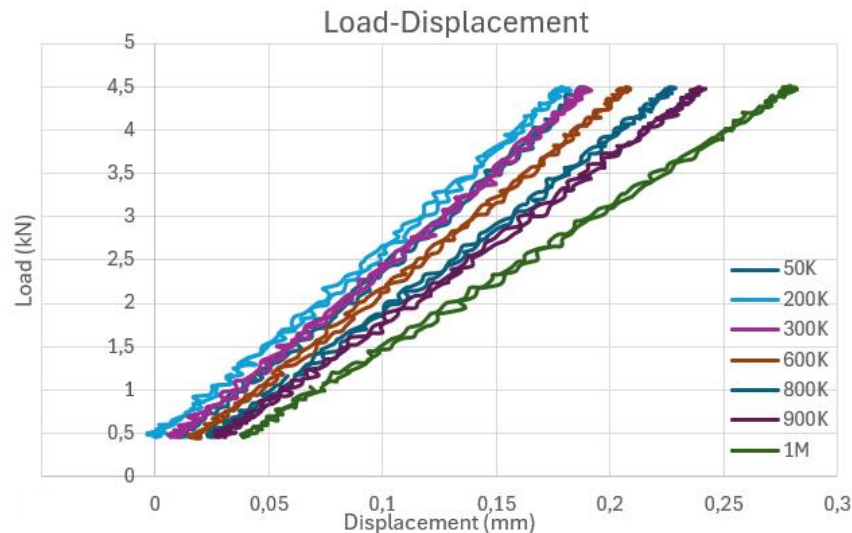


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P-Εύρος μετατόπισης με κύκλους

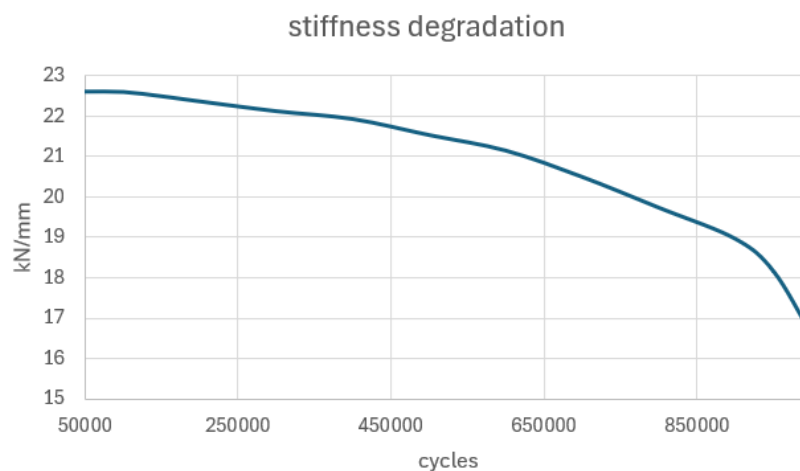


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P-Αύξηση εύρους μετατόπισης με κύκλους

Στη συνέχεια, από τις κλήσεις στο διάγραμμα 4.1.2.3 υπολογίστηκε η δυσκαμψία του δοκιμίου και η μεταβολή της φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.2.4.

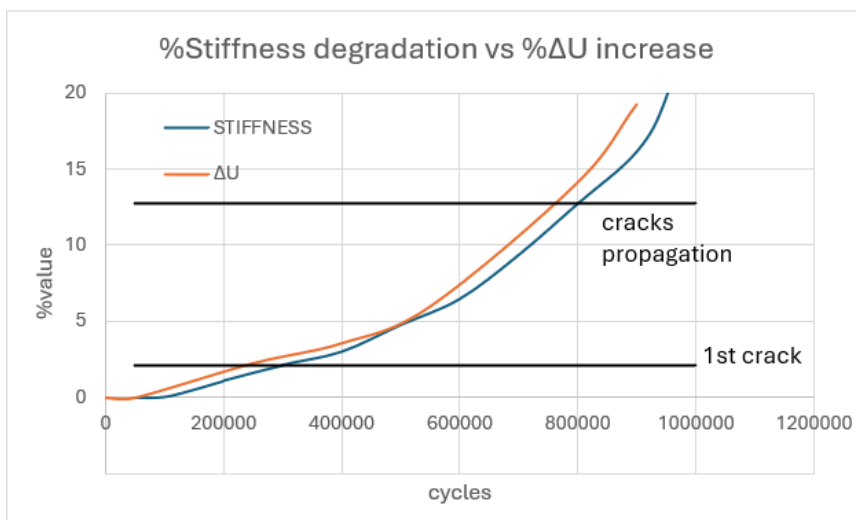


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων



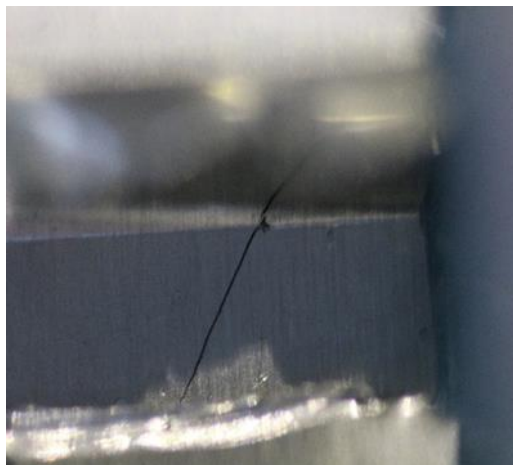
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 4 ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P-Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.1.2.5 η απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) έναντι της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU . Η συγκριτική αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων αποσκοπεί στην επαλήθευση της συνάφειας και της αμοιβαίας εξάρτησής τους, επιβεβαιώνοντας ότι οι δύο αυτές μεταβλητές κινούνται παράλληλα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.2. 5ΔΟΚΙΜΙΟ L2_P- % μείωσης δυσκαμψίας - % αύξησης ΔU

Παρακάτω παρουσιάζεται (εικόνα 4.1.2.1 – εικόνα 4.1.2.2) η εξέλιξη ρωγμών με το πέρασμα των κύκλων κόπωσης έως την τελική θραύση. Παρατηρείται πως ενώ οι ρωγμές ξεκινούν από θέσεις οπών σε προχωρημένο στάδιο κόπωσης και ενώ περνούν σε γειτονικά κελιά ο προσανατολισμός τους και η θέση τους δεν είναι συγκεκριμένες, αλλά ακολουθούν τη φορά του ρήγματος.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1.2 1 Ρωγμή σε αρχικό στάδιο



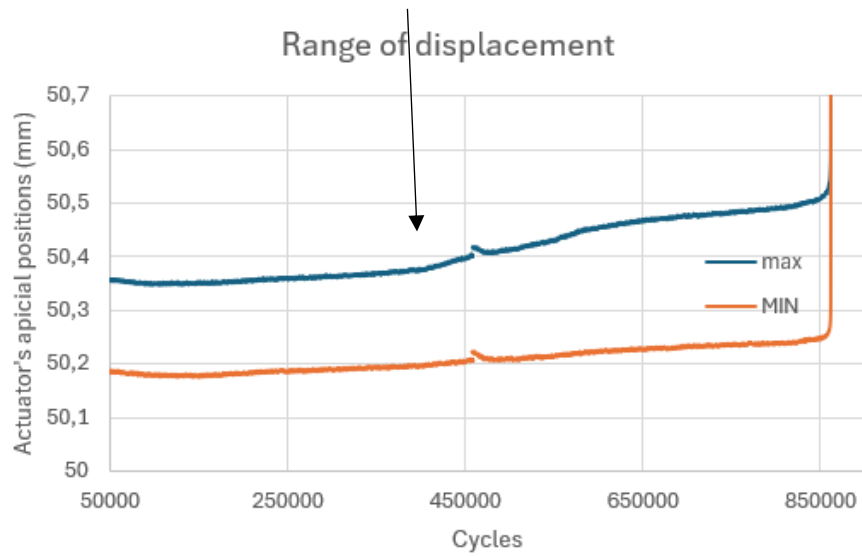
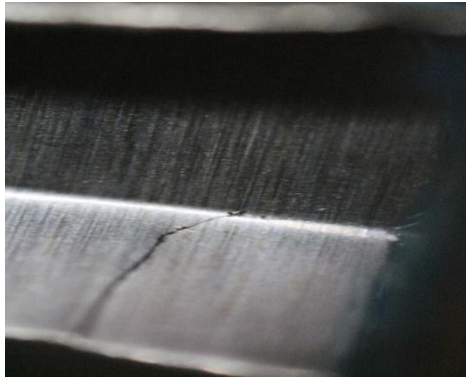
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.2 2 μετάδοση ρωγμής σε γειτονικά κελιά



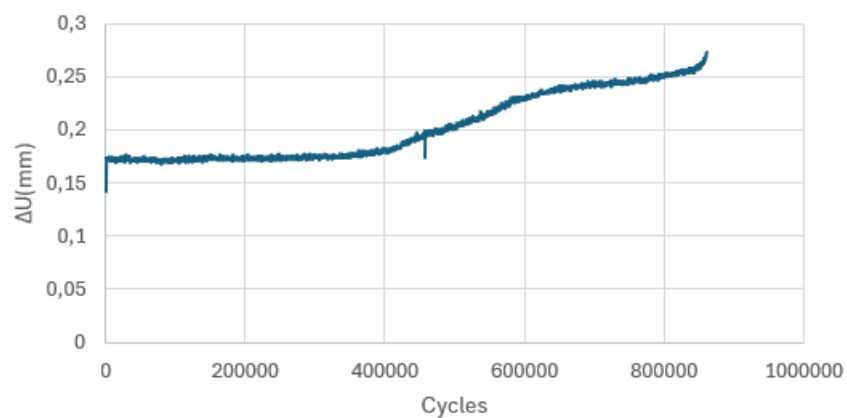
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.2 3 Τελικό στάδιο αστοχίας

4.1.3 Δοκίμιο L6_UP

Το συγκεκριμένο δοκίμιο υπεβλήθη σε εύρος φορτίων 0,45-4,5 kN σε και αστόχησε σε 855.000 κύκλους, κατά την ολοκληρωτική αστοχία παρατηρήθηκε αποκόλληση. Πρώτη ρωγμή παρατηρήθηκε κοντά στους 400.000 κύκλους και πολλαπλές ρωγμές φάνηκαν στις 600.000. Σε αντίθεση με το αντίστοιχο δοκίμιο με οπές, αυτό εμφάνισε λιγότερες και μικρότερες ρωγμές η θέση των οποίων ήταν κοντά στη διεπιφάνεια. Τέλος, την αποκόλληση είναι πιθανό να υποβοηθήσε ρωγμή στο σημείο που εκτεινόταν προς τη διεπιφάνεια κορμού— κόλλας. Η μεταβολή του εύρους μετατόπισης (Διάγραμμα 4.1.3.2) έχει πάλι αυξητική τάση υποδηλώνοντας ύπαρξη βλαβών, η πορεία των οποίων φαίνεται στις εικόνες 4.1.3.1 -4.1.3.2.

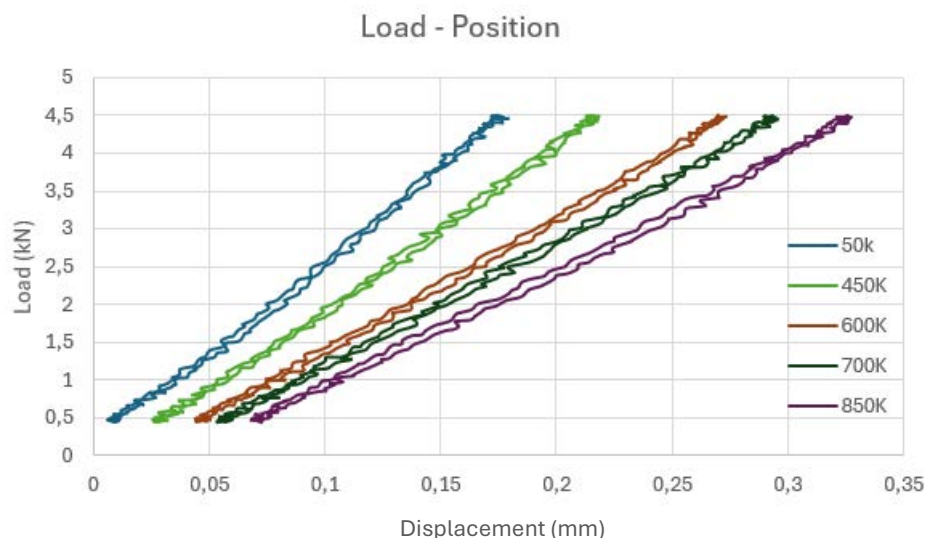


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους

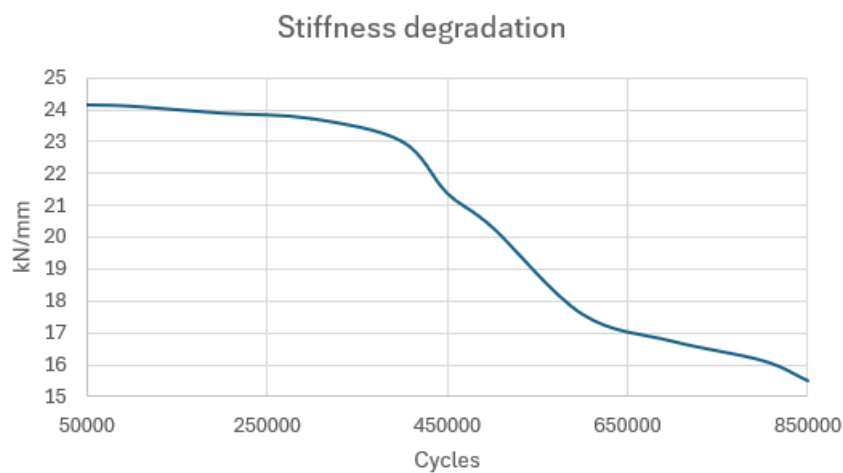


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP-Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους

Η έντονη επίδραση της εμφάνισης ρωγμών φαίνεται καθαρά στο διάγραμμα 4.1.3.4 στα σκαλοπάτι.

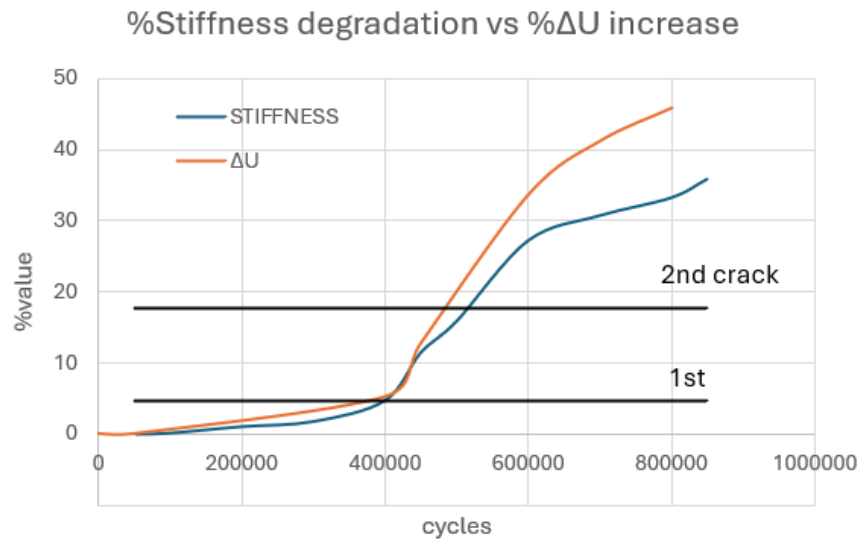


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων

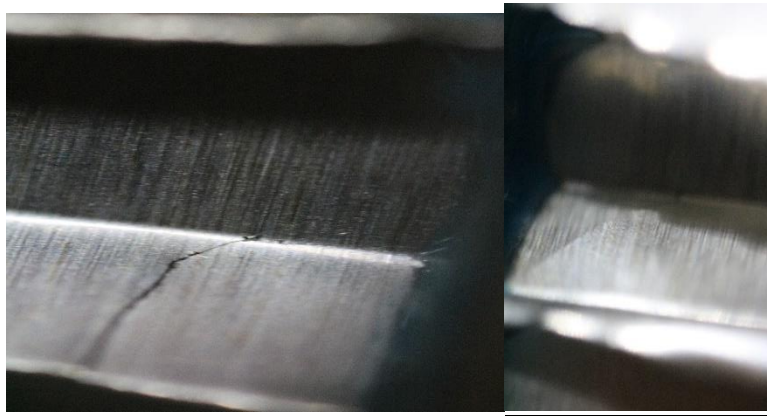


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 4-ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.3.5.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.3 5ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP(0,45-4,5 kN)- % μείωσης δυσκαμψίας % αύξησης ΔU



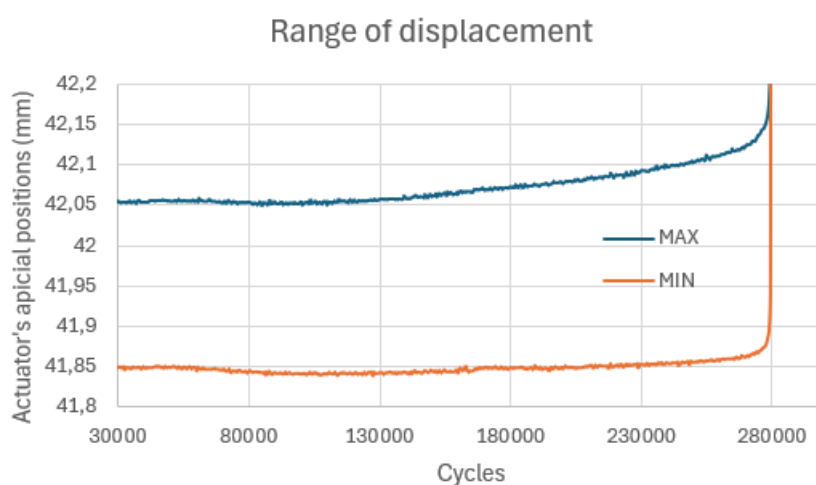
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.3 1 Ρωγμές στη δεξιά και αριστερή διεπιφάνεια



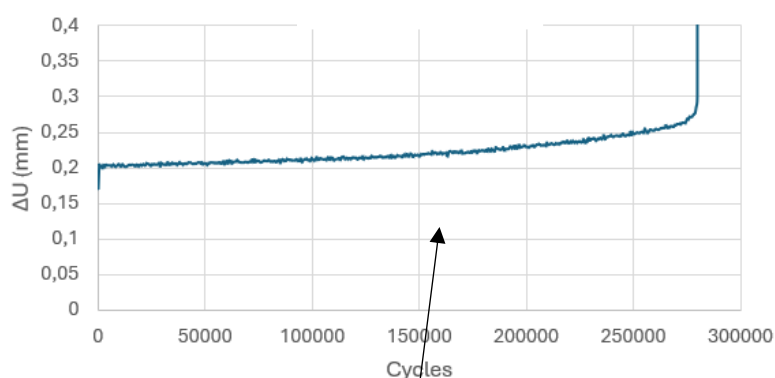
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.3 2 Τελικό στάδιο αστοχίας

4.1.4 Δοκίμιο L3_P

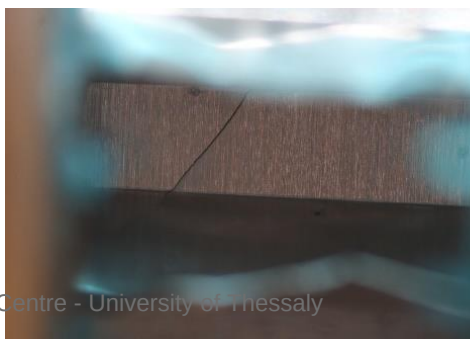
Το συγκεκριμένο δοκίμιο υπεβλήθη σε εύρος φορτίων 0,55-5,5 kN σε και αστόχησε σε 270.000 κύκλους με την πρώτη ρωγμή να εμφανίζεται στις 150.000 κύκλους. Σε αυτά τα φορτία δεν εμφανίστηκαν πληθώρα ρωγμών όμως υπήρχε πάλι προοδευτική επιμήκυνση της ρωγμής και πέρασμα σε γειτονικά κελιά (εικόνα 4.1.4.1). Τέλος, ο προσανατολισμό ήταν στις περίπου 45 μοίρες, ως προς το ribbon. Οι ακραίες θέσεις (Διάγραμμα 4.1.4.1) απομακρύνονταν και κατ' επέκταση η μεταβολή του εύρους μετατόπισης (Διάγραμμα 4.1.4.2) ήταν αυξητική υποδηλώνοντας ξανά την ύπαρξη βλαβών.



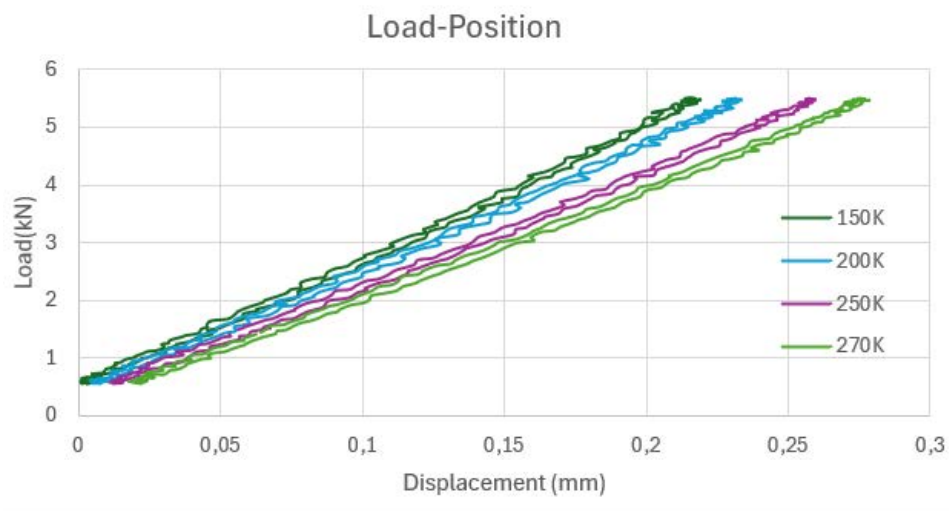
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους



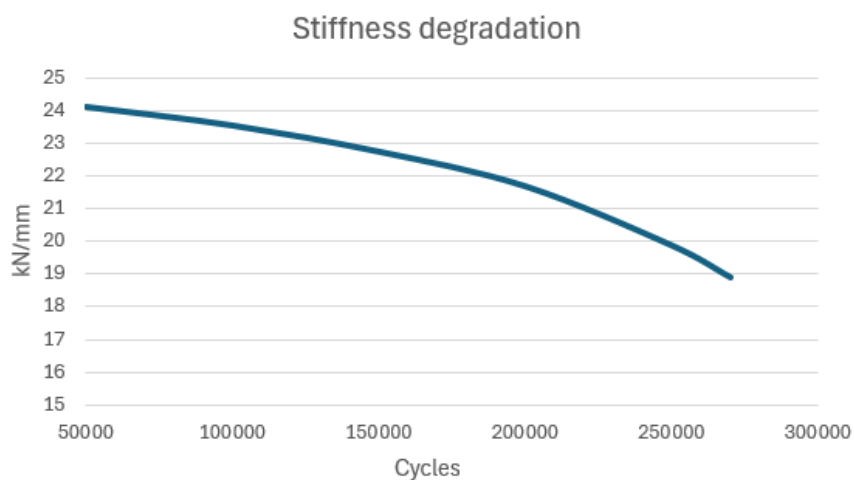
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους



Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.1.4.3) ενώ οι βλάβες προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.4.4.

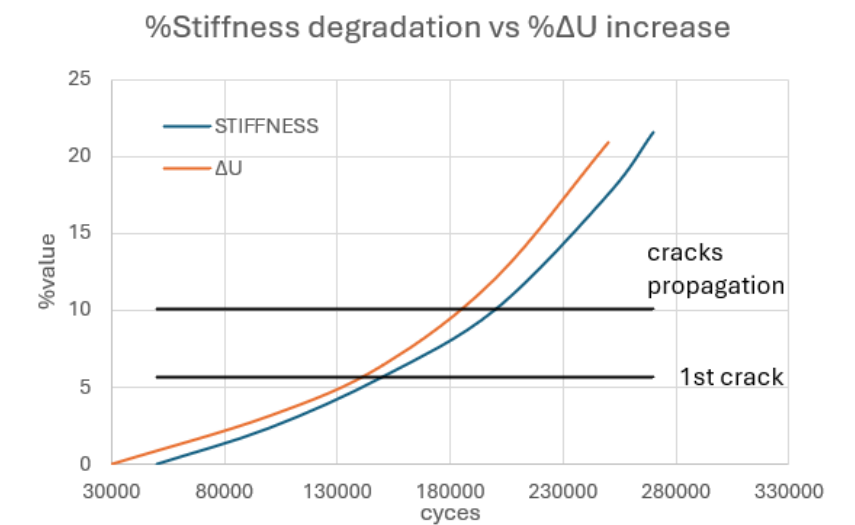


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 4 ΔΟΚΙΜΙΟ L3_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.4.5.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.4 5 ΔΟΚΙΜΙΟ L6_UP(0,45-4,5 kN)-% μείωσης δυσκαμψίας - % αύξησης ΔU



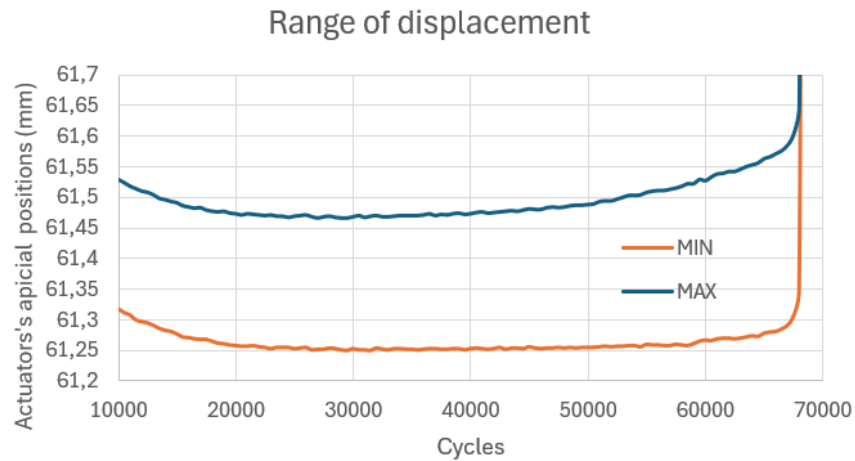
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.4. 1 Διάδοση ρωγμής



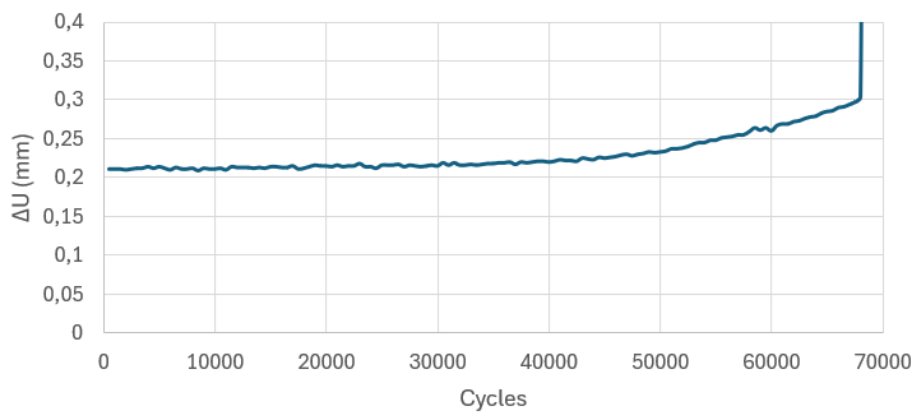
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.4. 2 Τελικό στάδιο αστοχίας

4.1.5 Δοκίμιο L5_UP

Το δοκίμιο αυτό εξετάστηκε στο εύρος 0,55-5,5 kN. Παρουσίασε ρωγμή στις 40.000 κύκλους και εκτέλεσε συνολικά 68.000. Ο ίδιος θόρυβος παρατηρήθηκε και σε αυτό το πείραμα. Η θέση της ρωγμής ήταν και πάλι προς τη διεπιφάνεια και σε εκείνο το σημείο παρατηρήθηκε μια μερική αποκόλληση προς το τέλος του πειράματος. Αυτές οι αστοχίες είχαν σαν συνέπεια την απομάκρυνση των ακραίων θέσεων (Διάγραμμα 4.1.5.1) και την αύξηση του εύρους μετατόπισης του δοκιμίου (Διάγραμμα 4.1.5.2)

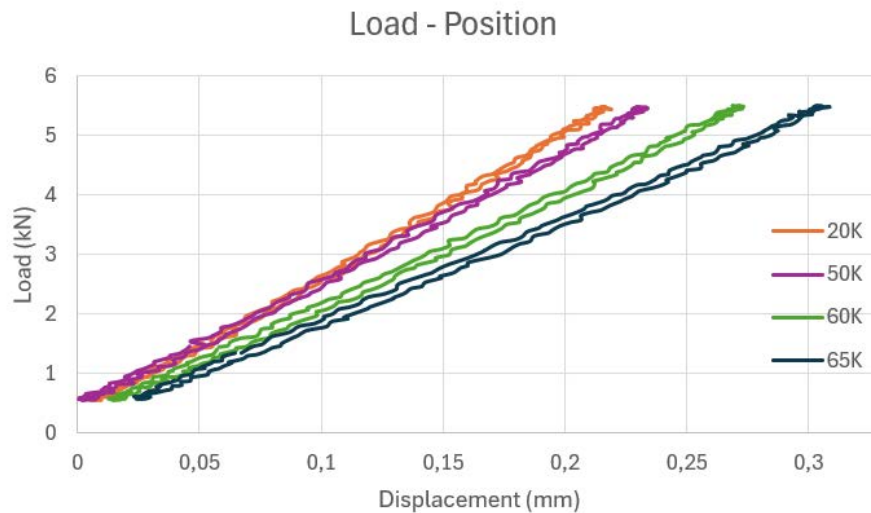


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 1 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους

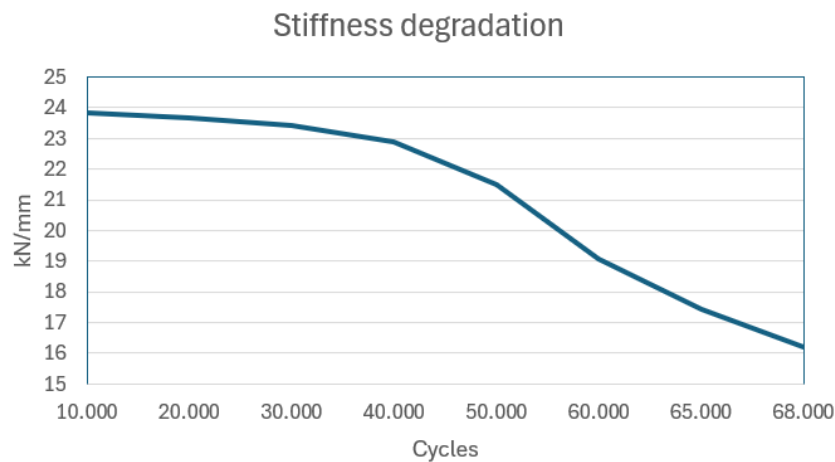


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 2 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους

Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.1.5.3) ενώ οι βλάβες (εικόνα 4.1.5.) προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.5.4.

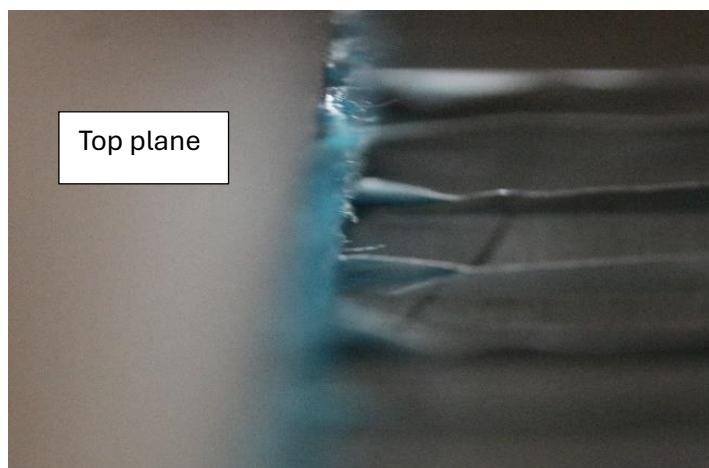


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 3 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP-Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 4 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

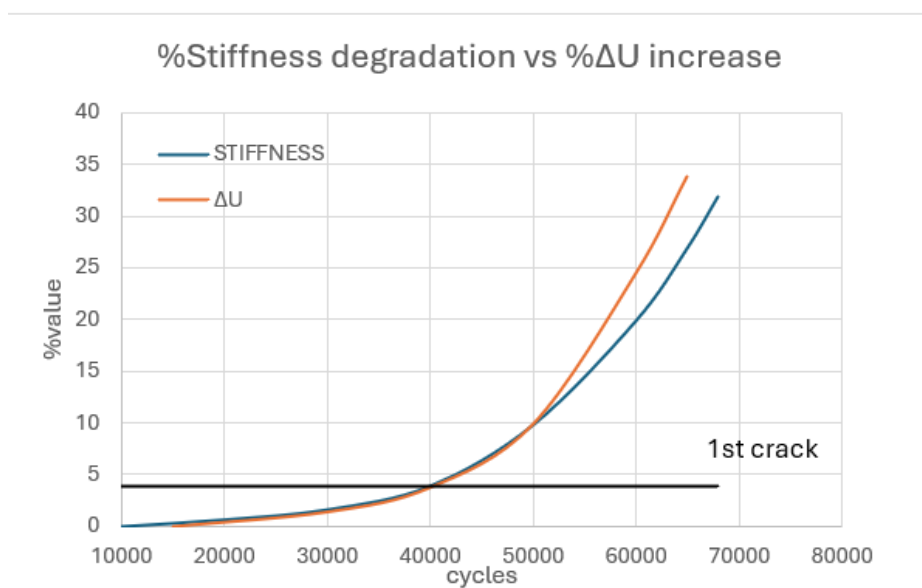
Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.1.5.5.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1.5 1 Ρωγμή στην πάνω επιφάνεια



ΕΙΚΟΝΑ 4.1.5 2 Τελικό στάδιο αστοχίας

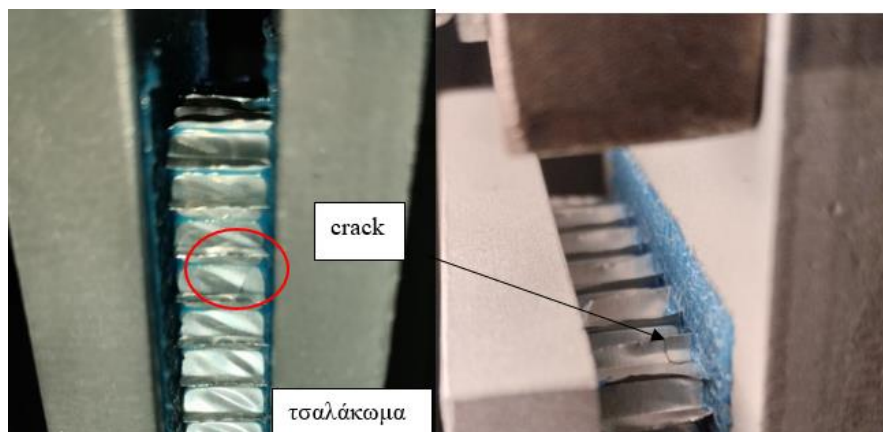


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1.5. 5 ΔΟΚΙΜΙΟ L5_UP(0,55-5,5 κN-)% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU

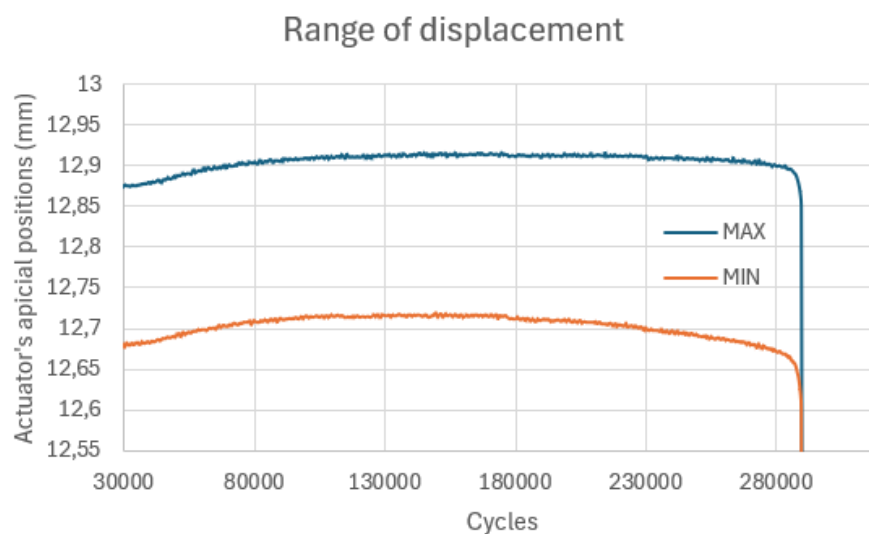
4.2 Διεύθυνση W

4.2.1 Δοκίμιο W3_UP

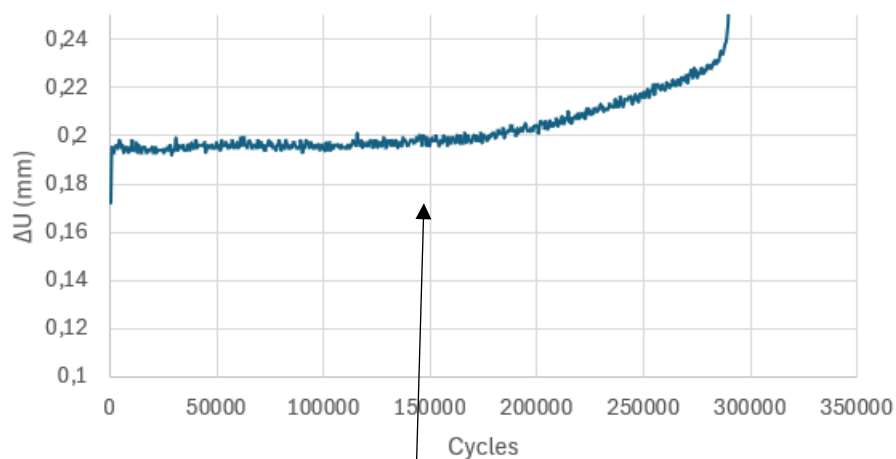
Το δοκίμιο εξετάστηκε σε εύρος φορτίων 0,45-4,5 kN και εκτέλεσε συνολικά 290.000 κύκλους. Η πρώτη ρωγμή (εικόνα 4.2.1) εμφανίστηκε στους 110.000 και δύο ακόμα σε θέσεις ribbon (εικόνα 4.2.1). Στο πείραμα υπήρχαν και εμφανή τσαλακώματα των τοιχωμάτων. Αυτές οι βλάβες μετουσιώθηκαν ποσοτικά στα διαγράμματα ακραίων θέσεων (Διάγραμμα 4.2.1.1) ,καθώς απομακρύνονταν οι θέσεις αυτές, και κατ' επέκταση στο διάγραμμα μεταβολής του εύρους μετατόπισης (Διάγραμμα 4.2.1.2) ,που παρουσίαζε αυξητική τάση, υποδηλώνοντας ξανά την ύπαρξη βλαβών.



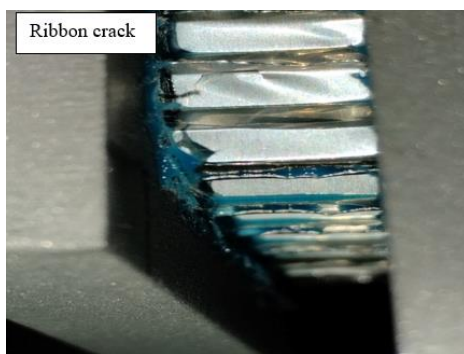
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.1 1 Πρώτη ρωγμή



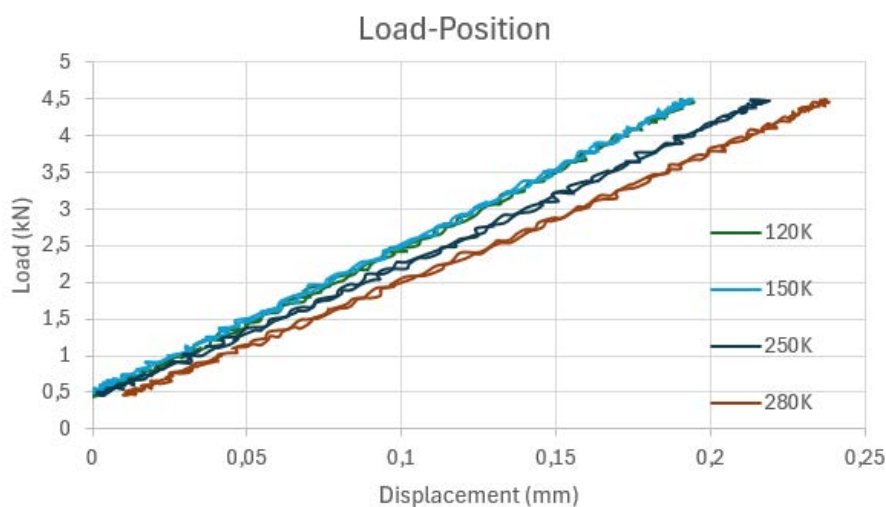
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους



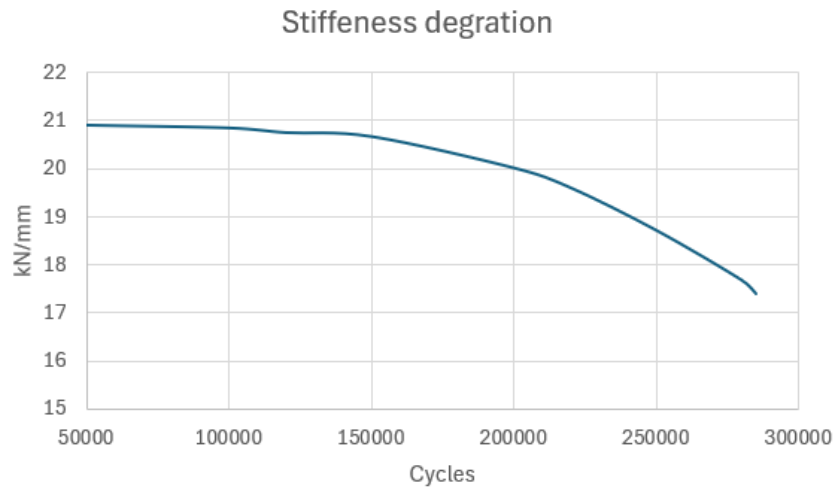
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους



Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.2.1.3) ενώ οι βλάβες προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.1.4.

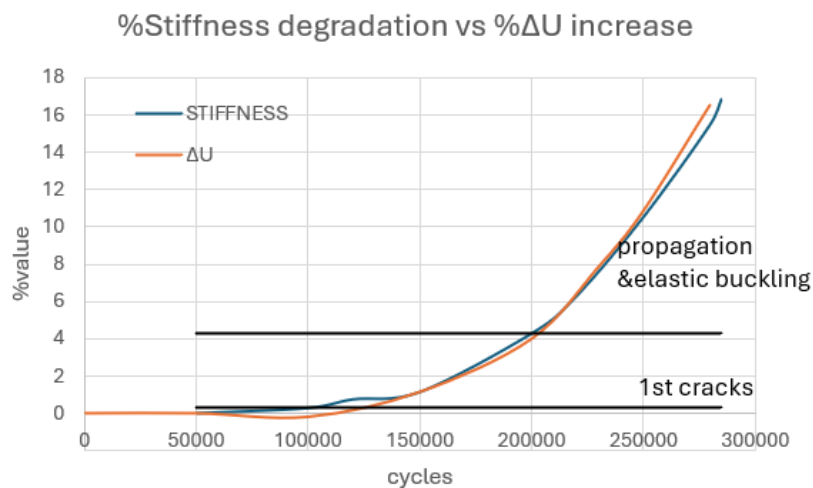


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.1.5.



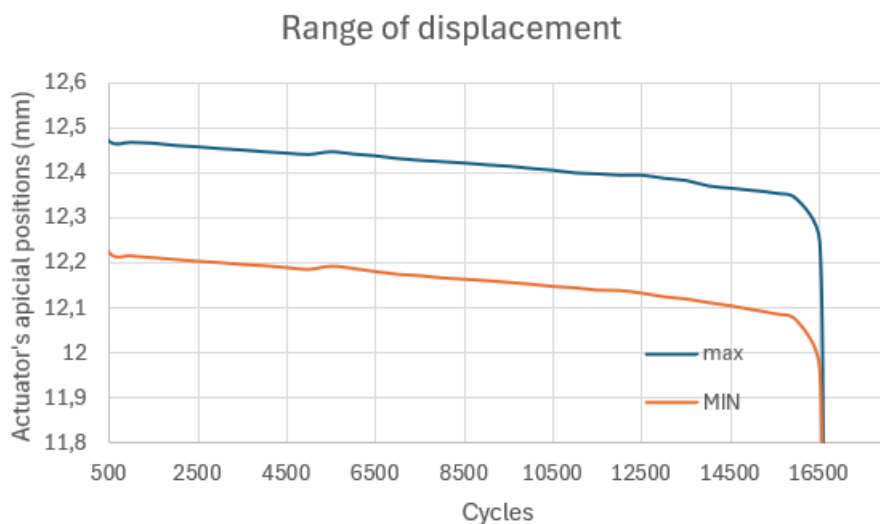
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.1 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W3_UP(0,45-4,5 kN)- % μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU



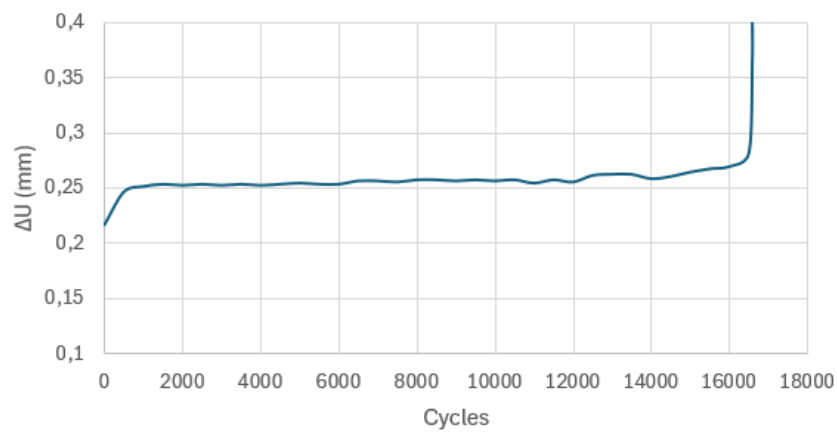
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.1 2 Τελικό στάδιο αστοχίας

4.2.2 Δοκίμιο W4_UP

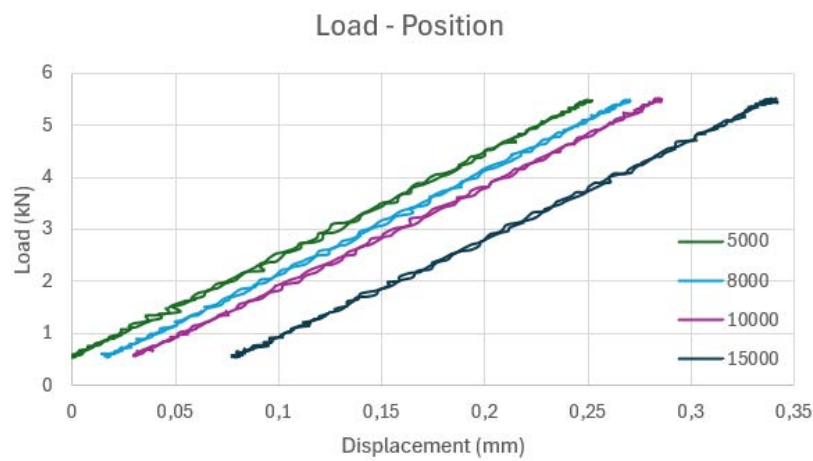
Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε εύρος φορτίων 0,55-5,5 kN και εκτέλεσε συνολικά 16.590 κύκλους. Η αστοχία του ήταν απότομη με τις ρωγμές να εμφανίζονται περίπου 2.000 κύκλους πριν την αδυναμία παραλαβής φορτίων από τη δομή. Πάλι υπήρχαν τσαλακώματα και έντονος θόρυβος (εικόνα 4.2.2.1). Εδώ παρατηρούμε και σχηματικά από τα διαγράμματα εύρους μετατόπισης (Διάγραμμα 4.2.2.1) και μεταβολής εύρους μετατόπισης (Διάγραμμα 4.2.2.2) την αιφνίδια αστοχία του δοκιμίου.



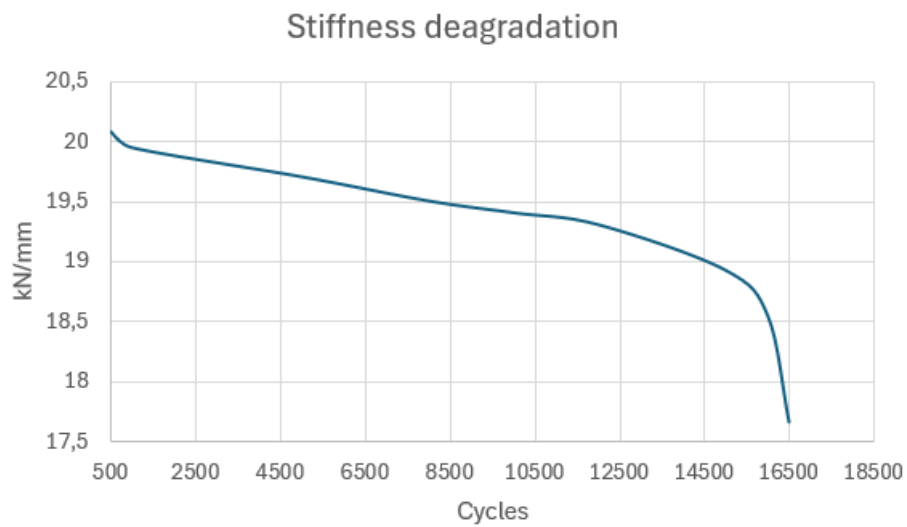
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Εύρος μετατόπισης με κύκλους



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους

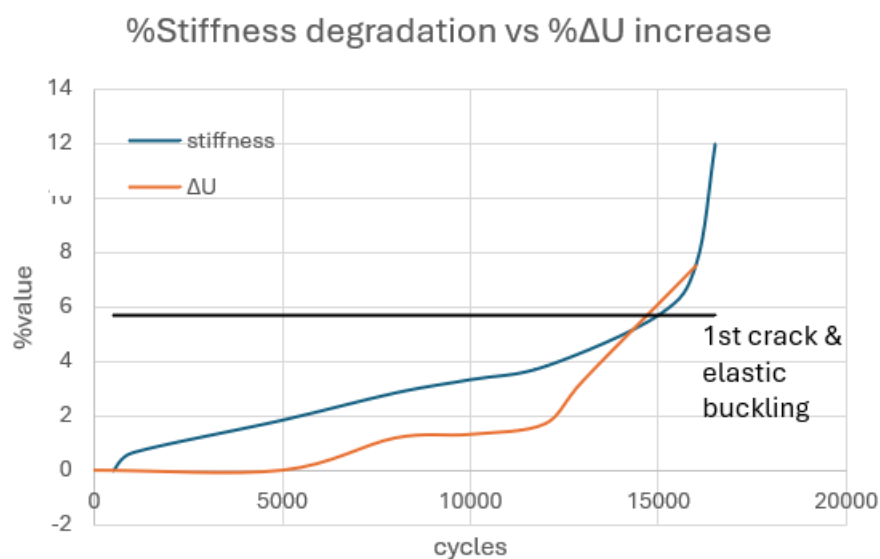


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων

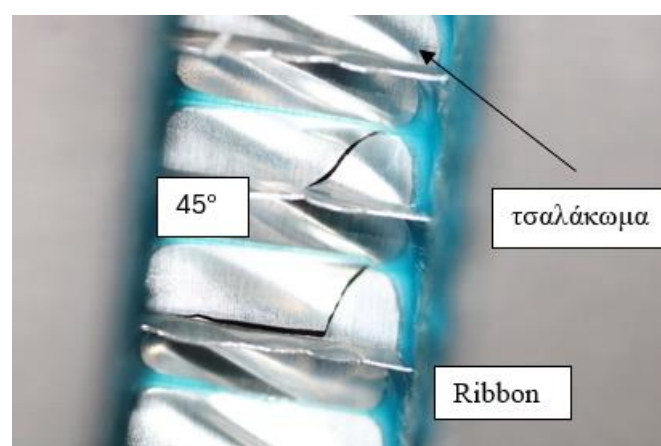


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Παρά την απότομη αστοχία του πειράματος, παρατηρείται μια ταχεία, αλλά σχετικά σταθερά μειούμενη τάση της δυσκαμψίας (Διάγραμμα 4.2.2.4) μέχρι 2.000 κύκλους πριν από την αστοχία. Η διαφορά της ποσοστιαίας μεταβολής της δυσκαμψίας με την ποσοστιαία μεταβολή του εύρους μετατόπισης παρατηρείται και στο ομώνυμο Διάγραμμα 4.2.2.5, με τις δύο καμπύλες να αποκλίνουν τόσο ξεκάθαρα για πρώτη φορά στην εργασία.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.2.5 ΔΟΚΙΜΙΟ W4_UP(0,55-5,5 kN)- % μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU

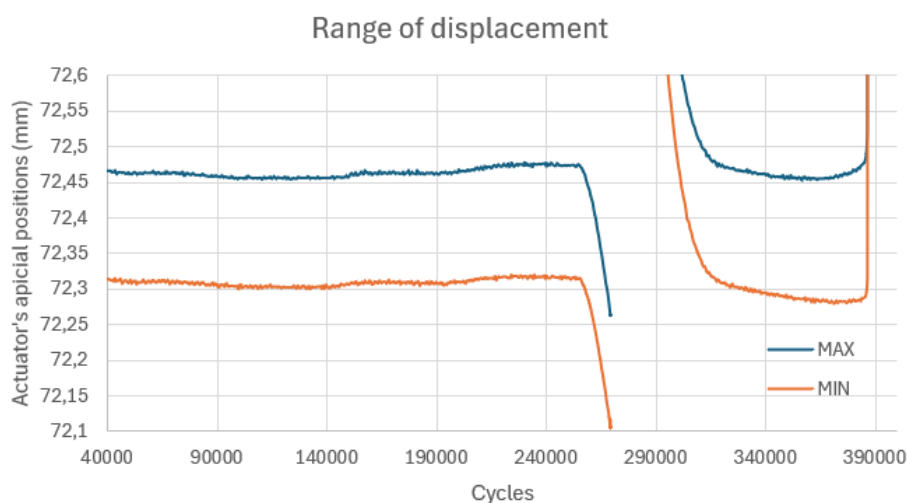


ΕΙΚΟΝΑ 4.2.2.1 Ρωγμές πριν την τελική αστοχία

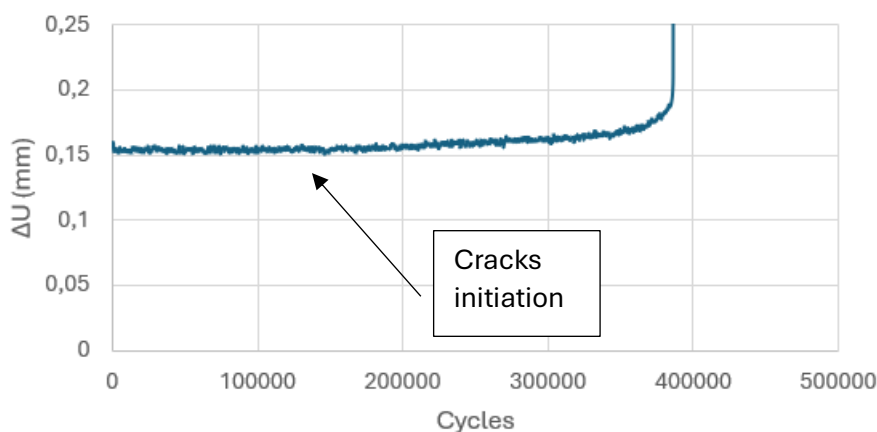
Συνεχίζοντας, παρουσιάζονται τα πειράματα σε W διεύθυνση με σπές τα οποία εκτελέστηκαν σε χαμηλότερα εύρη φόρτισης [7].

4.2.3 Δοκίμιο W1_P

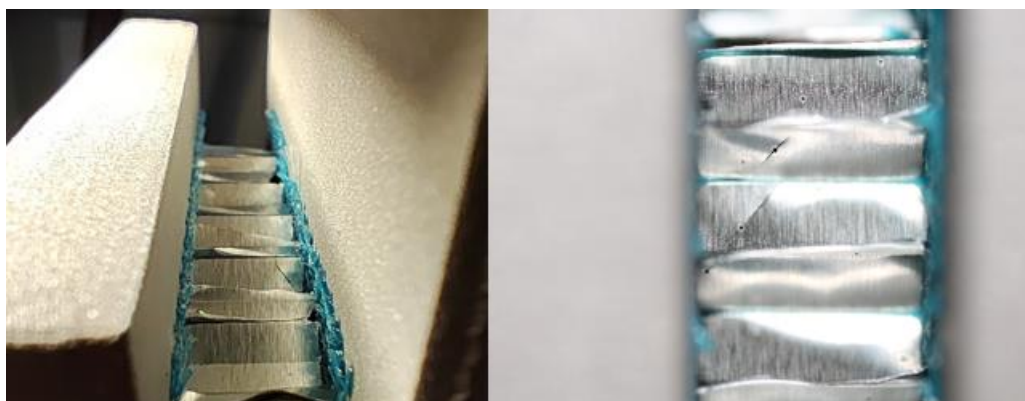
Το δοκίμιο εξετάστηκε σε εύρος 0,35-3,5 kN και αστόχησε στους 386.000 κύκλους. Πρώτες ρωγμές (εικόνα 4.2.3.1) εμφανίστηκαν στις 120.000 κύκλους ενώ εμφανίστηκε πλήθος ρωγμών (εικόνα 4.2.3.2) με το πέρασμα των κύκλων με έναρξη από θέση οπής και προσανατολισμό 45 μοιρών ως προς το ribbon. Στο Διάγραμμα 4.2.3.1, οι ακραίες θέσεις παρουσιάζουν αυτήν την συμπεριφορά λόγω διακοπής ρεύματος και δεν αποτελεί κάποια αξιοσημείωτη συμπεριφορά.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους

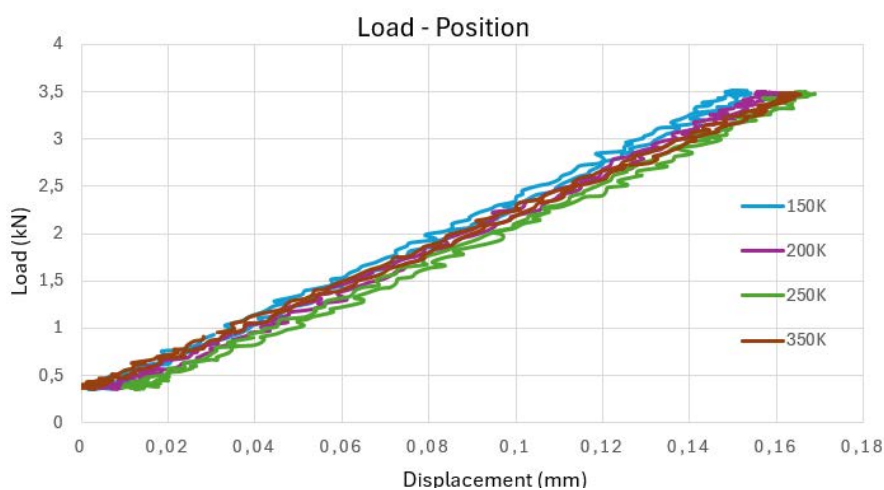


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους

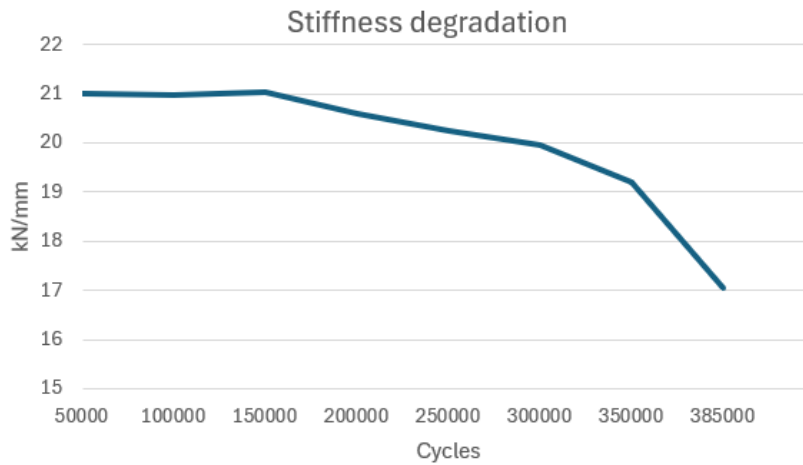


ΕΙΚΟΝΑ 4.2.3 1 Αρχικές ρωγμές

Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.2.3.3) ενώ οι βλάβες (εικόνα 4.2.3.2) προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο Διάγραμμα 4.2.3.4.

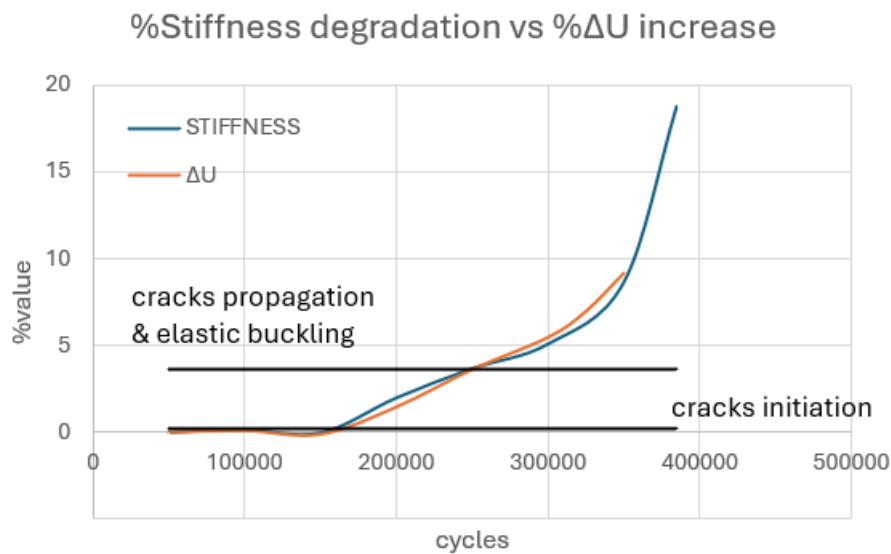


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων

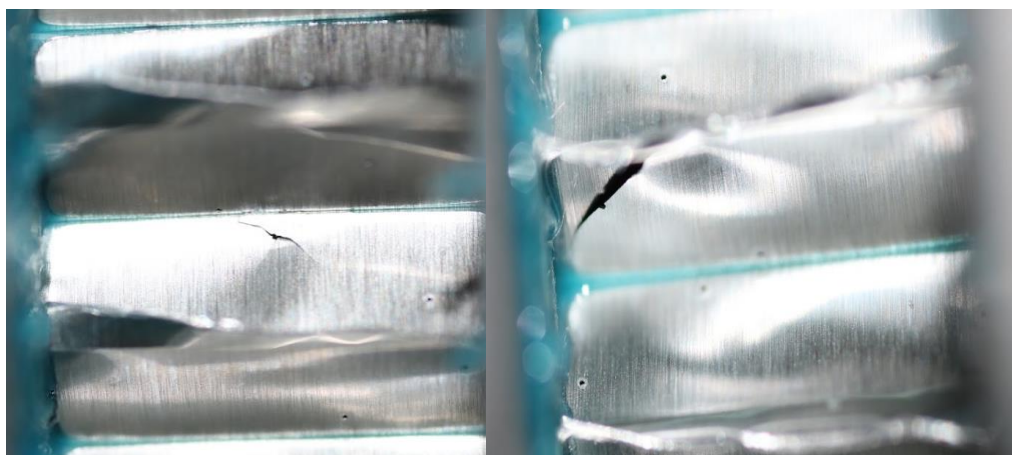


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.2.3.5.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.3 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W1_P(0,35-3,5 kN)- % μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU



ΕΙΚΟΝΑ 4.2.3 2 Ρωγμές σε σπές σε ελαστικό λυγισμό

Στην εικόνα 4.2.3.3 παρουσιάζεται το δοκίμιο μετά το τελικό στάδιο της αστοχίας, όπου φαίνεται ξεκάθαρα πώς οι ρωγμές άρχισαν να συνενώνονται.



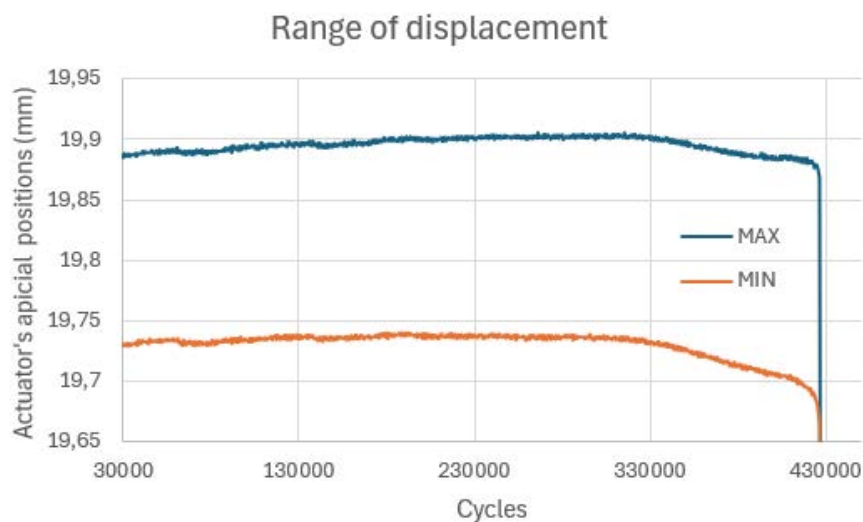
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.3 3Τελικό στάδιο αστοχίας

4.2.4 Δοκίμιο W2_P

Το δοκίμιο εξετάστηκε σε εύρος 0,35-3,5 kN και αστόχησε στους 420.000 κύκλους. Πρώτη ρωγμή εμφανίστηκε στις 120.000 κύκλους ενώ εμφανίστηκε πλήθος ρωγμών (εικόνες 4.2.4.1 , 4.2.4.2) με το πέρασμα των κύκλων με έναρξη από θέση οπής και προσανατολισμό 45 μοιρών ως προς το ribbon και πέρασαν σε γειτονικά κελιά. Αυτές οι αστοχίες είχαν σαν συνέπεια την απομάκρυνση των ακραίων θέσεων (Διάγραμμα 4.2.4.1) και την αύξηση του εύρους μετατόπισης του δοκιμίου (Διάγραμμα 4.2.4.2)



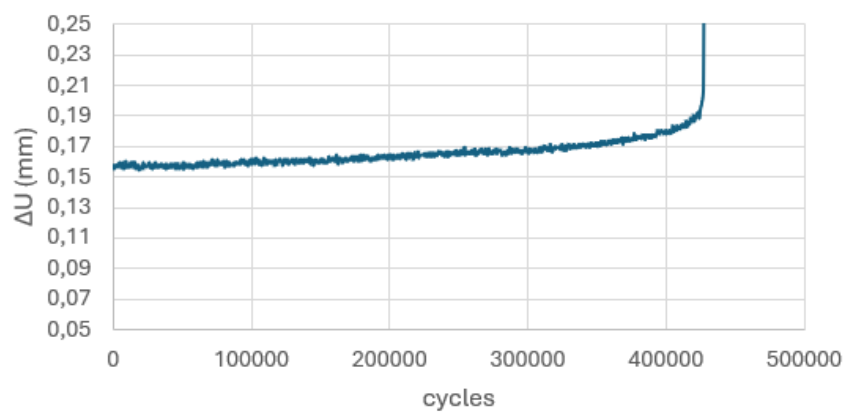
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.4 1 Ρωγμές σε γειτονικά κελιά



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους

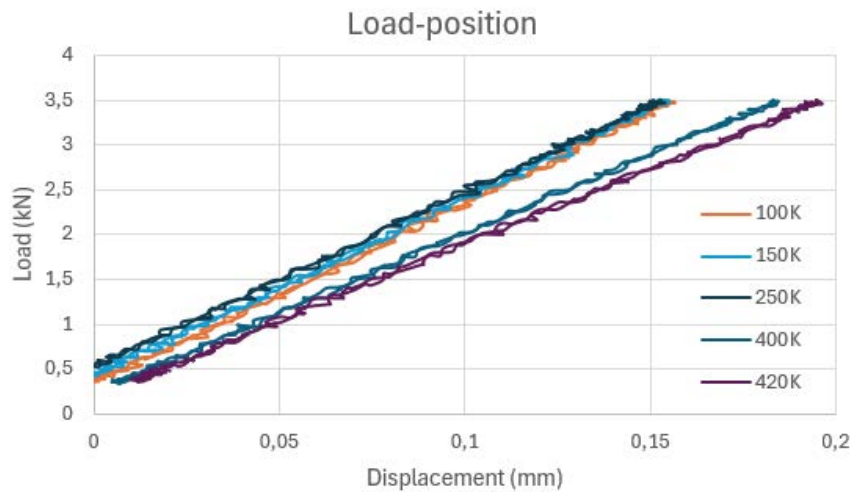


ΕΙΚΟΝΑ 4.2.4.2 Άνοιγμα ρωγμών

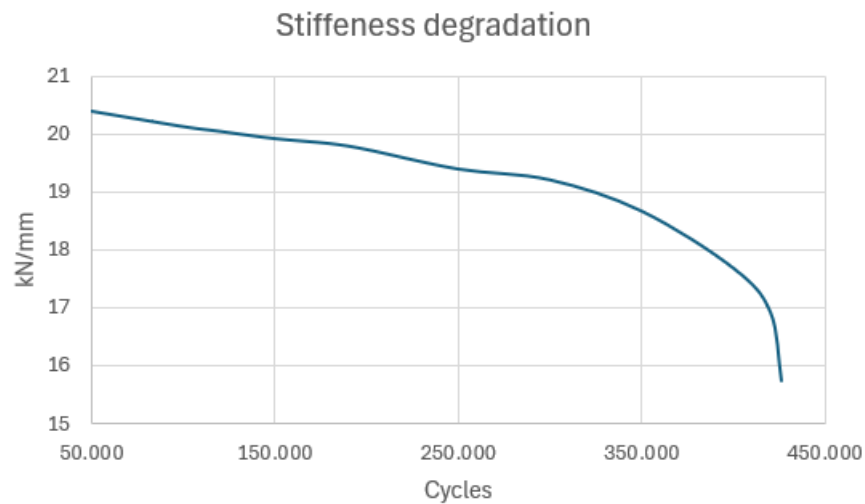


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4.2 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους

Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.2.4.3) ενώ οι βλάβες (εικόνα 4.2.4.2) προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.4.4.

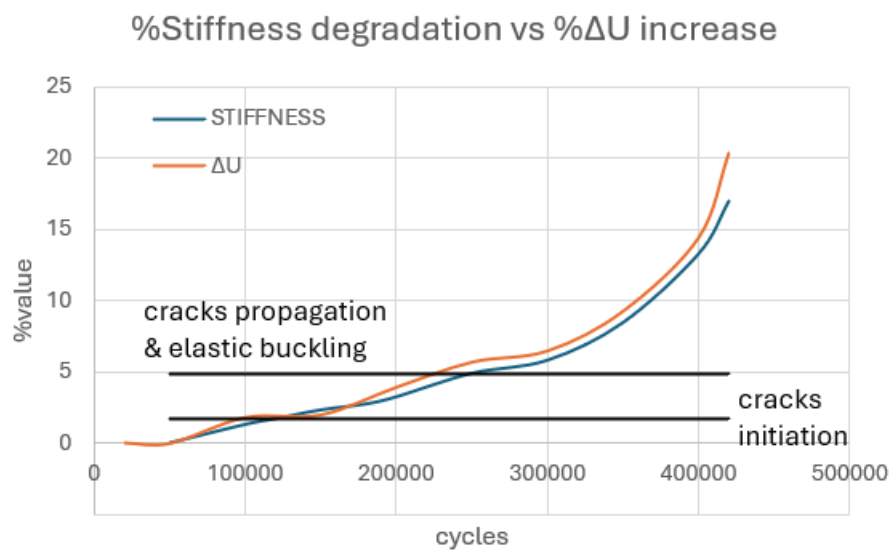


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.4.5.



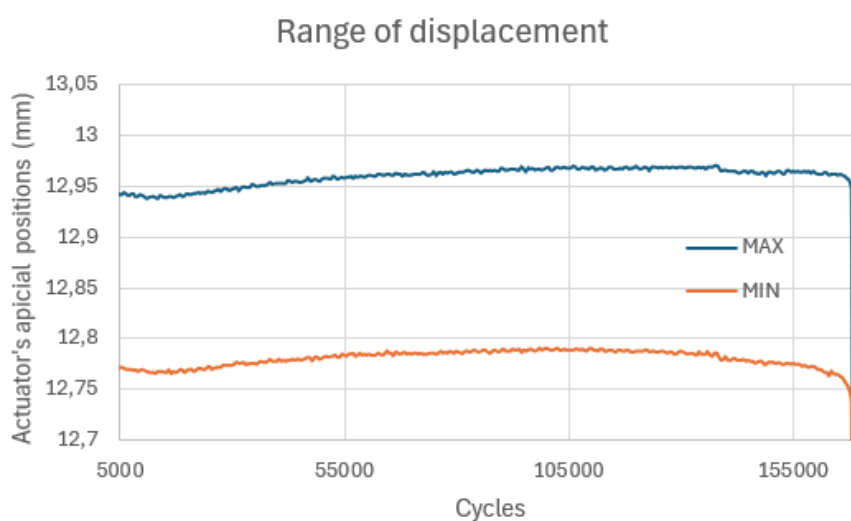
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.4 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W2_P(0,35-3,5 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU



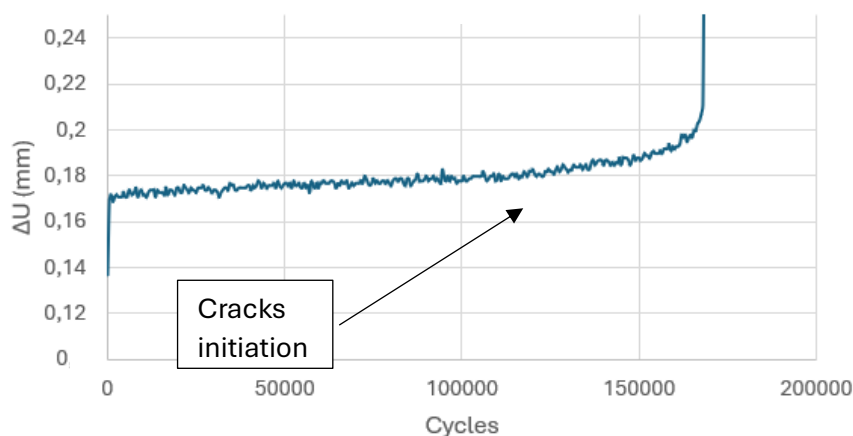
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.4 3 Τελικό στάδιο αστοχίας

4.2.5 Δοκίμιο W5_P

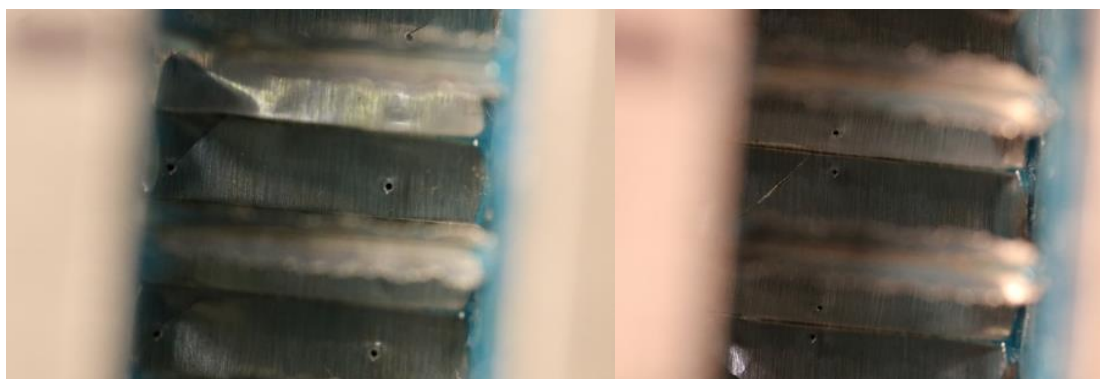
Το δοκίμιο εξετάστηκε σε εύρος 0,4-4 kN και εκτέλεσε 169.000 κύκλους με τις πρώτες ρωγμές (εικόνα 4.2.5.1) να εμφανίζονται στους 120.000 κύκλους. Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια με οπές έτσι και εδώ οι θέσεις εκκίνησης ρωγμών ήταν οπές και με το πέρασμα των κύκλων οι ρωγμές μεγάλωσαν και πέρασαν σε γειτονικά κελιά. Παρατηρήθηκε ο θόρυβος τους τσαλακώματος και εμφανίστηκαν ορατά τσαλακώματα. Αυτές οι αστοχίες είχαν σαν συνέπεια την απομάκρυνση των ακραίων θέσεων (Διάγραμμα 4.2.5.1) και την αύξηση του εύρους μετατόπισης του δοκιμίου (Διάγραμμα 4.2.5.2).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους

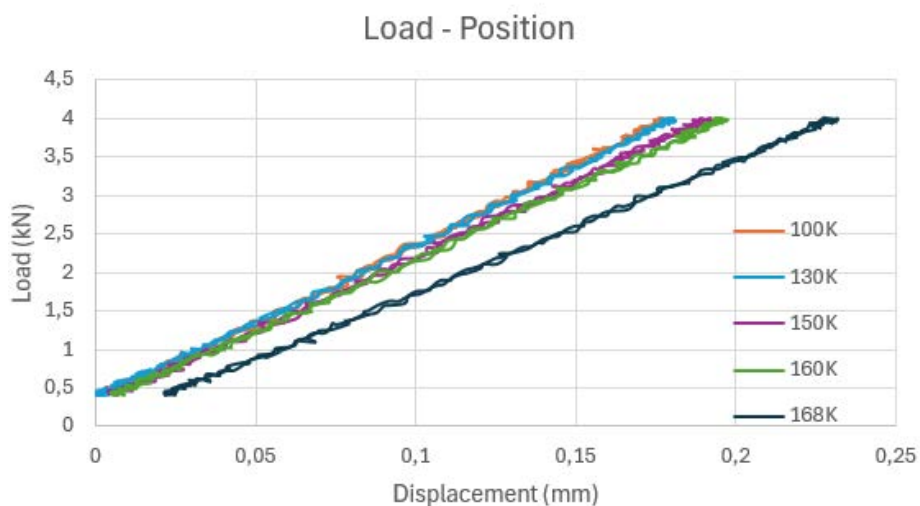


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P-Μεταβολή εύρους μετατόπισης

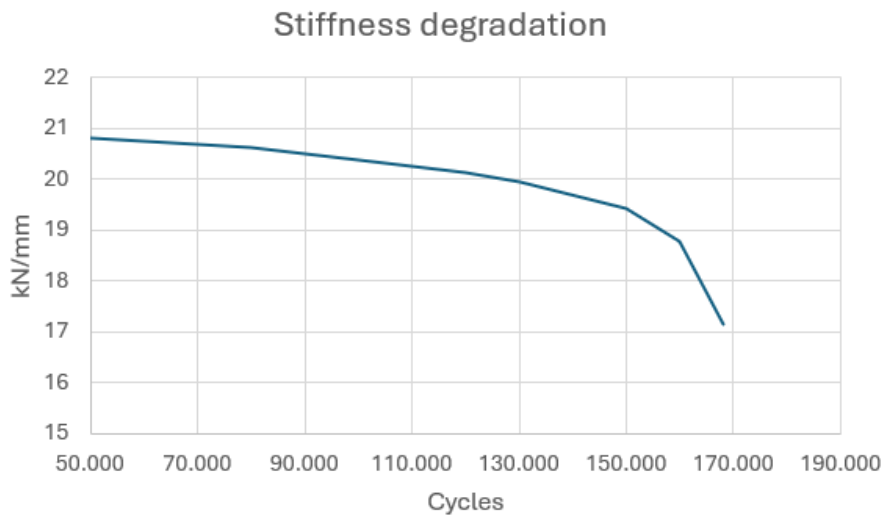


ΕΙΚΟΝΑ 4.2.5 1 Αρχικές ρωγμές

Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.2.5.3) ενώ οι βλάβες (εικόνα 4.2.5.1) προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.5.4.

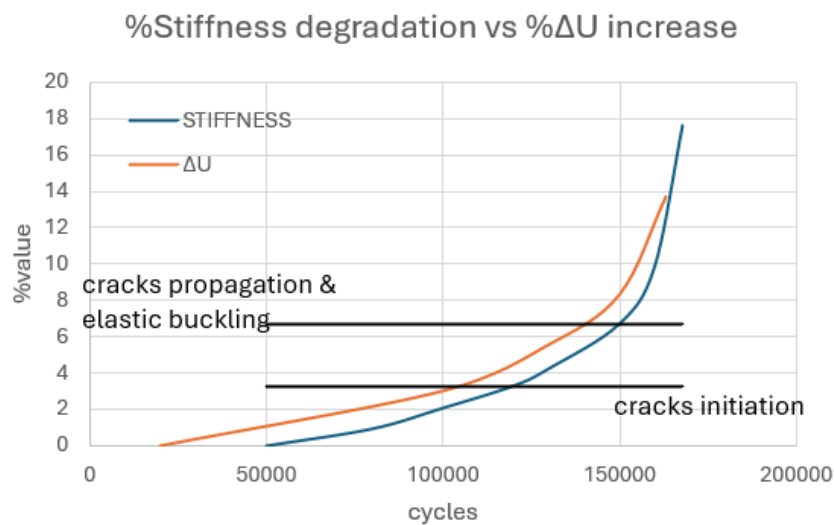


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.5.5.



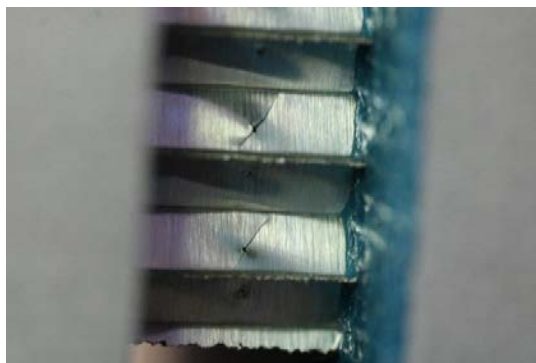
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.5 5 ΔΟΚΙΜΙΟ W5_P(0,4-4 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU

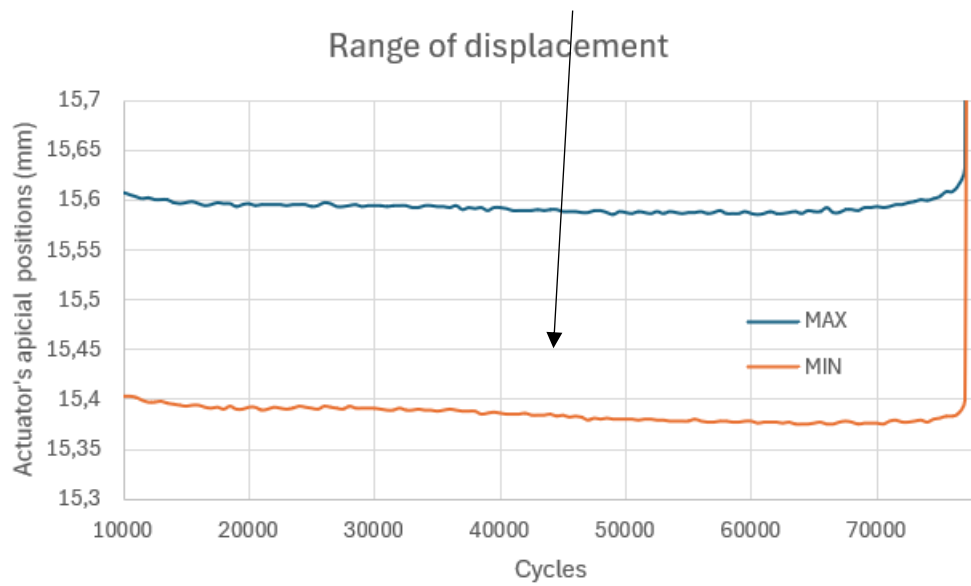


ΕΙΚΟΝΑ 4.2.5 2 Τελικό στάδιο αστοχίας

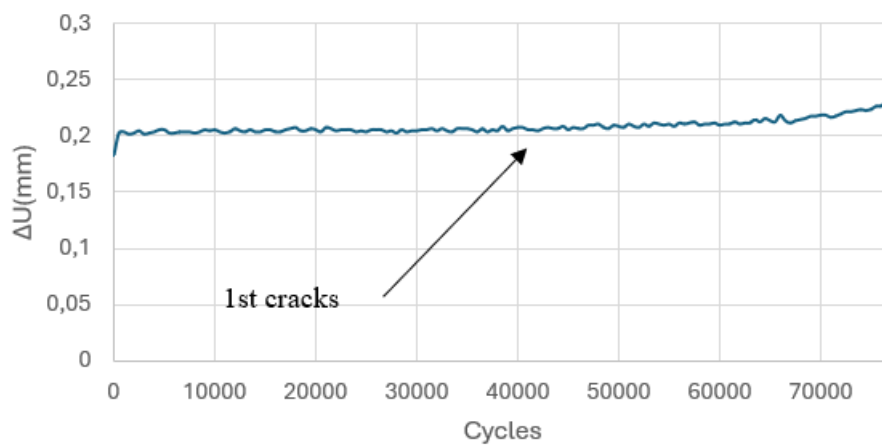
4.2.6 Δοκίμιο W9_P

Το δοκίμιο εξετάστηκε σε εύρος 0,45-4,5 kN που είναι και το εύρος σύγκρισης και για τις τέσσερις δομές. Εκτέλεσε συνολικά 77.000 κύκλους με τις ρωγμές (εικόνα 4.2.6.1) να εμφανίζονται στους 40.000 κύκλους με παρόμοια συμπεριφορά με τα προηγούμενα W με οπές. Αυτές οι αστοχίες είχαν σαν συνέπεια την απομάκρυνση των ακραίων θέσεων (Διάγραμμα 4.2.6.1) και την αύξηση του εύρους μετατόπισης του δοκιμίου (Διάγραμμα 4.2.6.2)



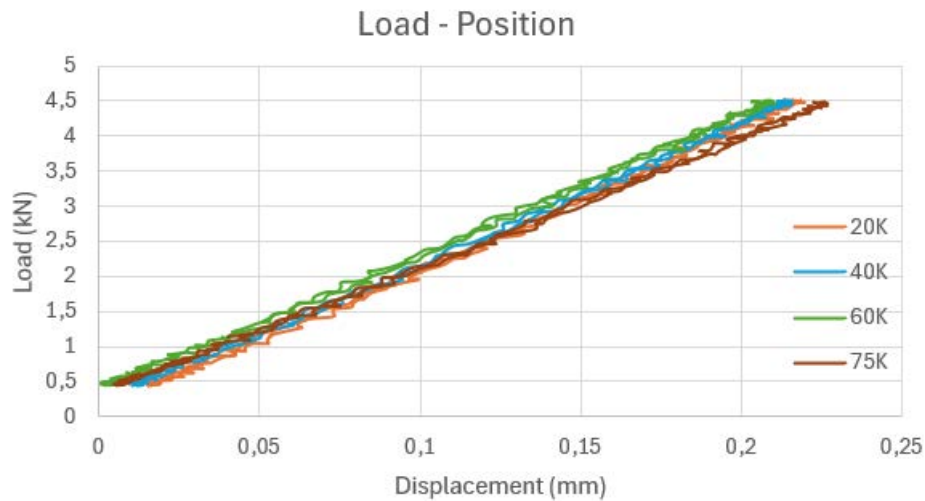


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Εύρος μετατόπισης με κύκλους

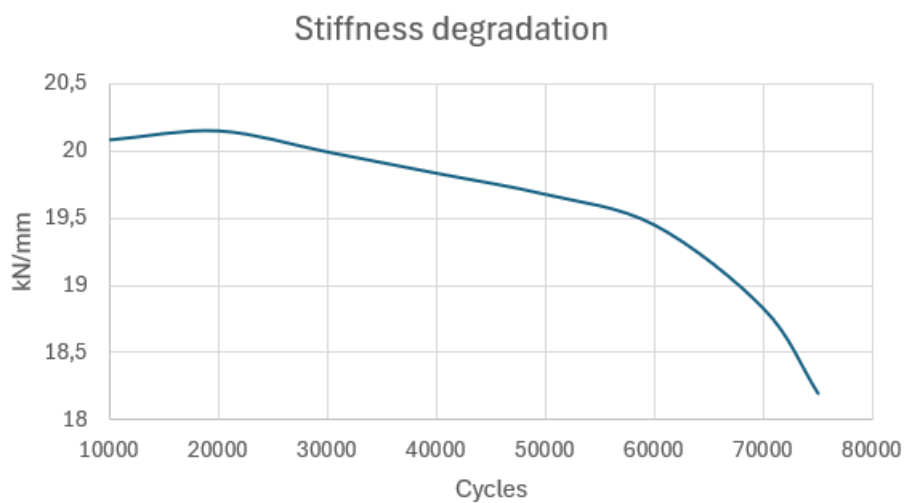


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 2 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Μεταβολή εύρους μετατόπισης με κύκλους

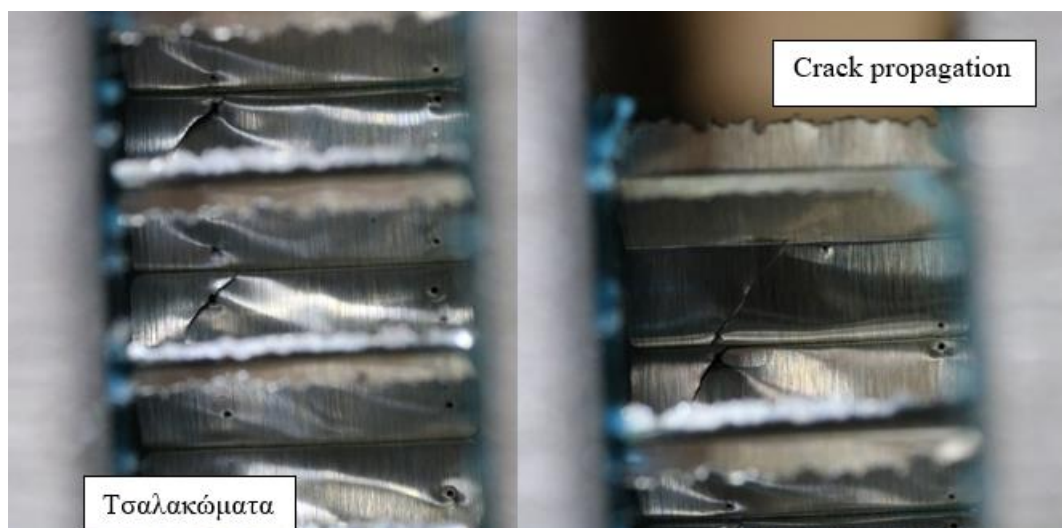
Οι βρόγχοι μεταβολής είχαν πτώση στην κλίση τους με τα πέρασμα των κύκλων (Διάγραμμα 4.2.6.2) ενώ οι βλάβες (εικόνα 4.2.6.1) προκάλεσαν υποβάθμιση της δυσκαμψίας με τρόπο που φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.6.3.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 3 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Βρόγχοι μεταβολής δύναμης-μετατόπισης σε διαφορετικό αριθμό κύκλων

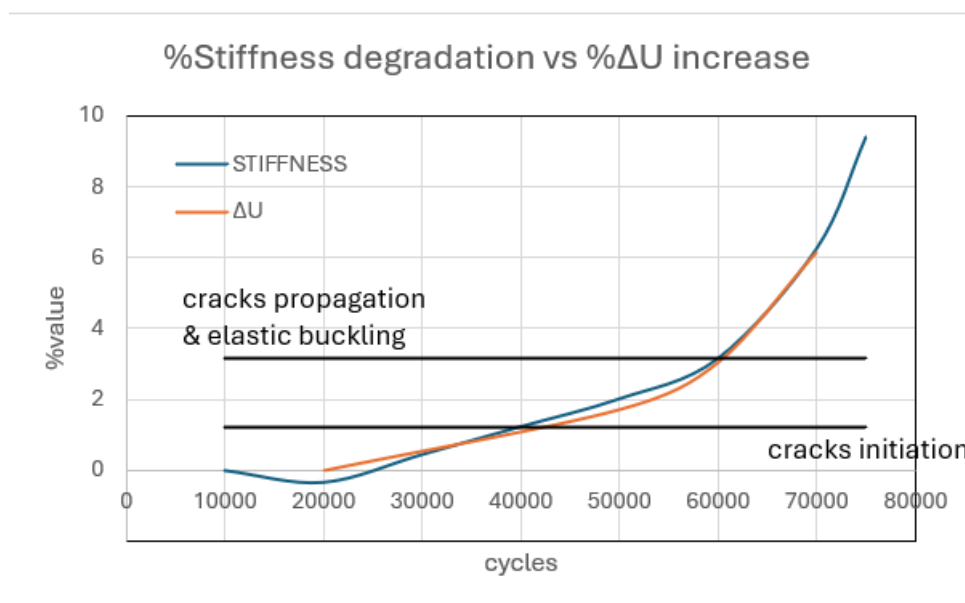


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P- Μεταβολή δυσκαμψίας με κύκλους φόρτισης



ΕΙΚΟΝΑ 4.2.6 1 Ρωγμές σε οπές και ελαστικός λυγισμός

Τέλος, πάλι παρατηρείται συμφωνία ανάμεσα στην απόλυτη ποσοστιαία μείωση της τιμής της δυσκαμψίας (stiffness) και της απόλυτης ποσοστιαίας αύξησης της τιμής ΔU , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.2.6.4.

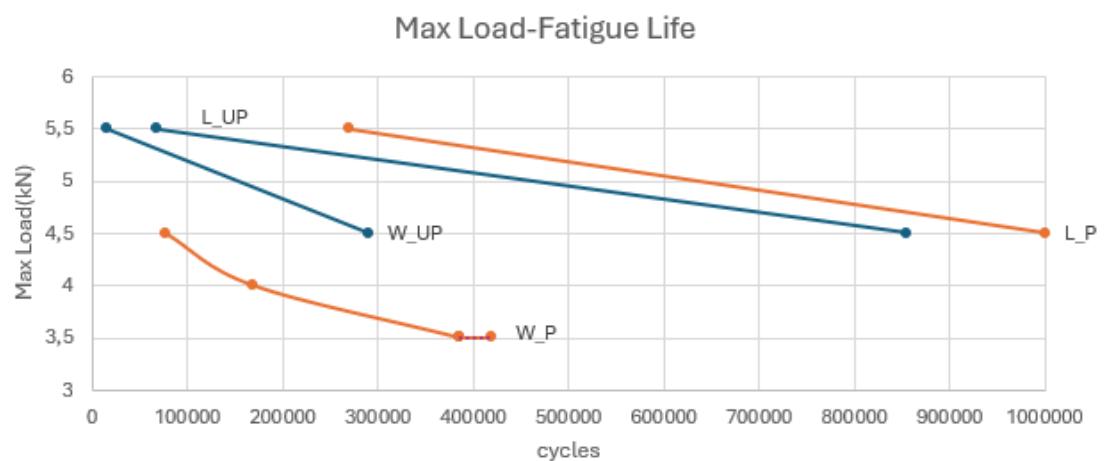


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2.6 4 ΔΟΚΙΜΙΟ W9_P(0,45-4,5 kN)-% μείωσης της δυσκαμψίας - % αύξησης του ΔU

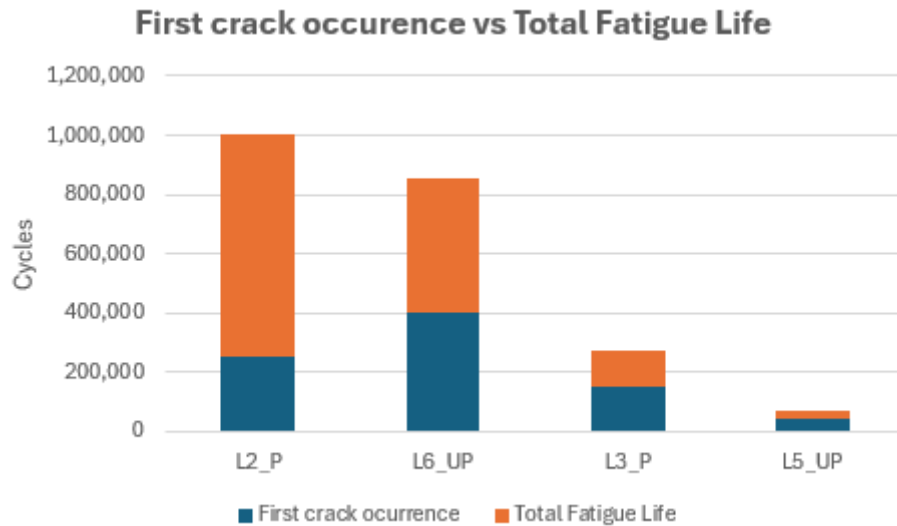


ΕΙΚΟΝΑ 4.2.6 2 Τελικό στάδιο αστοχίας

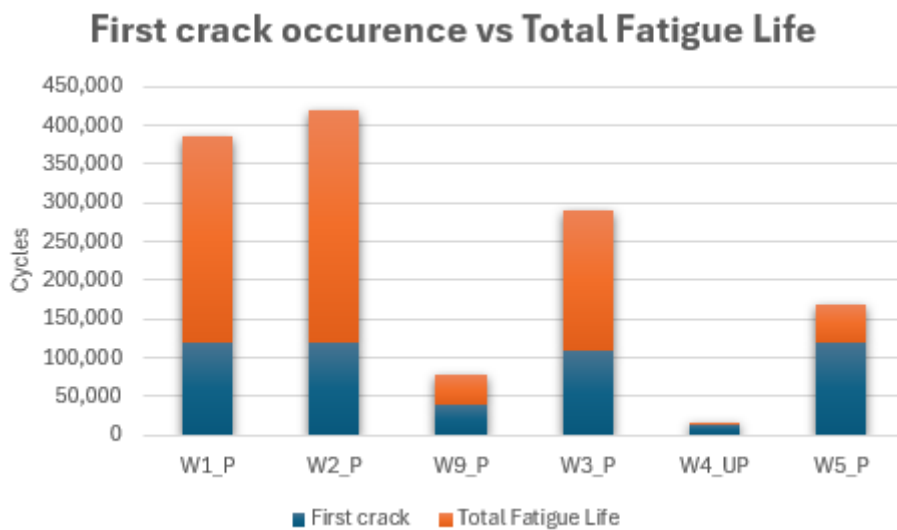
4.3 Συγκριτικά Αποτελέσματα Πειραμάτων Κόπωσης



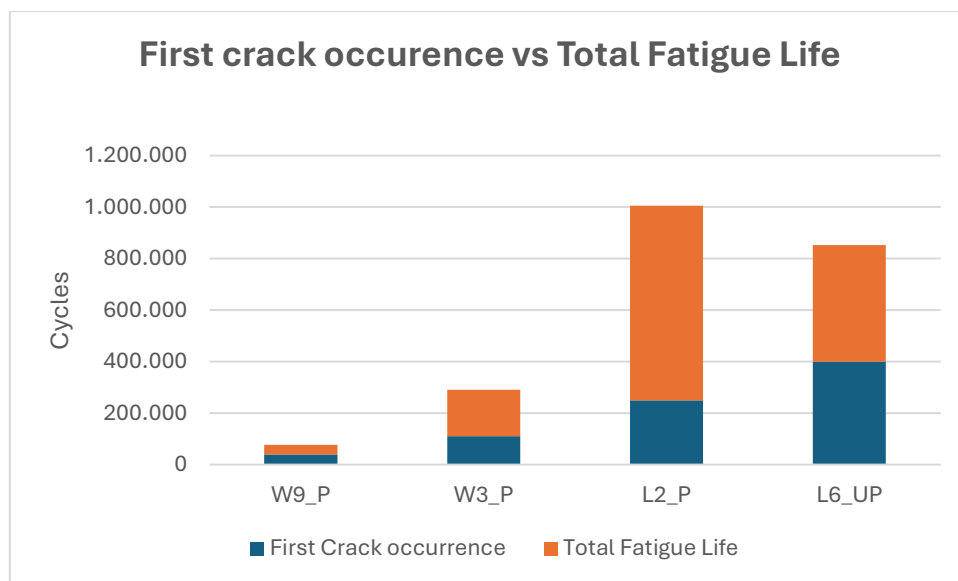
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 1 Συνολικό διάγραμμα ζωής όλων των δοκιμών



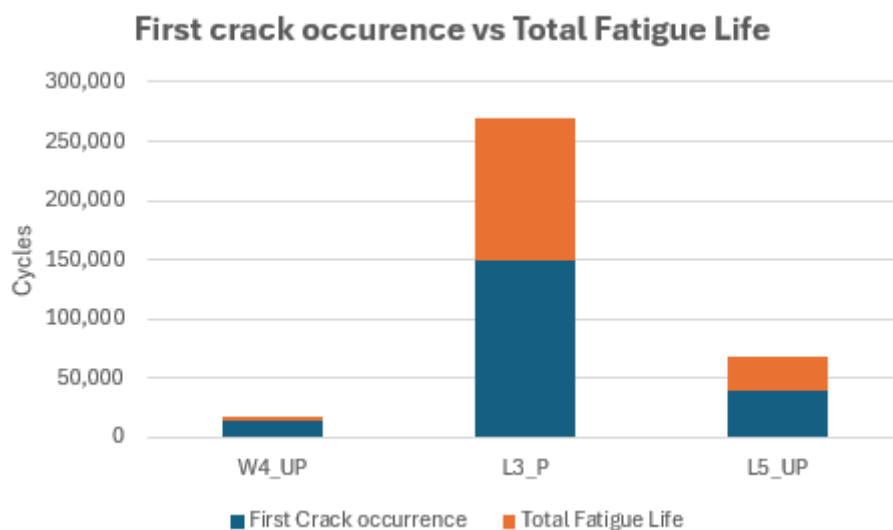
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 2 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής στα L δοκίμια



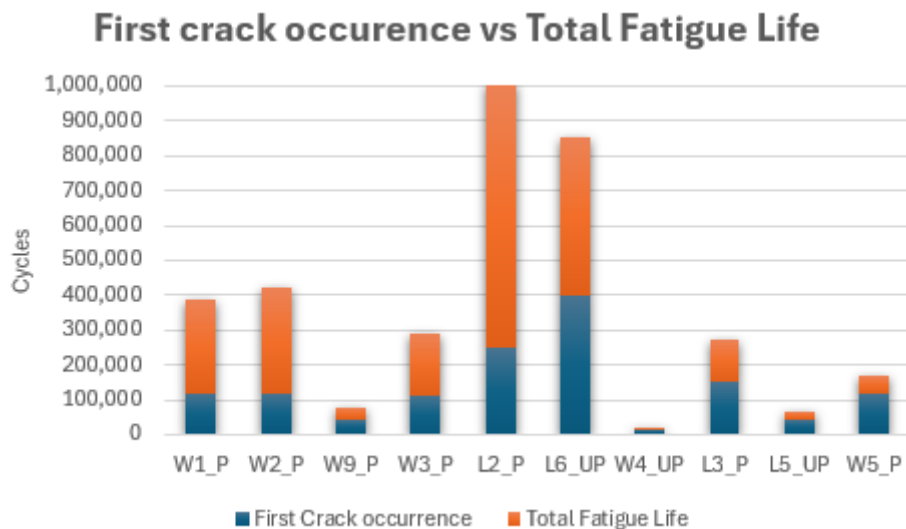
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 3 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής στα W δοκίμια



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 4 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής σε L&W δοκίμια στα 0.45-4.5 kN



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 5 Σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής σε L&W δοκίμια 0.55-5.5kN



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3 6 Συνολική σύγκριση εμφάνισης πρώτης ρωγμής/συνολικής διάρκειας ζωής

Specimen	Fatigue Life(cycles)	Total number cycles until the first crack	$x=(\text{fatigue life})/(\text{1st crack cycles})$
L2_P(0,45-4,5kN)	1.006.000	250.000	4,0
W1_P(0,35-3,5kN)	386.000	120.000	3,22
W2_P(0,35-3,5kN)	420.000	120.000	3,5
L6_UP(0,45-4,5kN)	853.000	400.000	2,31
W3_UP(0,45-4,5kN)	290.000	110.000	2,64
L3_P(0,55-5,5kN)	270.000	150.000	1,8
W5_P(0,4-4kN)	169.000	120.000	1,4
W9_P(0,45-4,5kN)	77.000	40.000	1,9
L5_UP(0,55-5,5kN)	68.000	40.000	1,7
W4_UP(0,55-5,5kN)	16.590	14.500	1,14
L4_UP(0,35-3,5kN)	3.500.000	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 1 Συνολικά αποτελέσματα διάρκειας ζωής στην κόπωση

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 4.3.1 και τα διαγράμματα 4.3.1 – 4.3.6 η διεύθυνση των τοιχωμάτων ως προς το επιβαλλόμενο φορτίο επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά σε κόπωση του υλικού honeycomb. Η διεύθυνση W έχει σημαντικά μικρότερη διάρκεια ζωής συγκριτικά με την δοκίμια στη διεύθυνση L. Παράλληλα, η ύπαρξη οπών εμφανίζει νωρίτερα ρωγμή όμως δεν επηρεάζει σημαντικά την L διεύθυνση στη διάρκεια ζωής, αντιθέτως δοκίμια στην L με οπές έχουν λίγο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αντίθετα, στην W διεύθυνση μειώνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Κεφάλαιο 5: Πειράματα Απομένουσας Αντοχής

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων απομένουσας αντοχής που έγιναν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Θα γίνει πλήρης αναφορά στις συνθήκες των δοκιμών και στα αποτελέσματα που προέκυψαν. Η ονοματολογία και τα χαρακτηριστικά του κάθε δοκιμίου παρουσιάζονται στην ενότητα 5.1.

5.1 Περιγραφή δοκιμών Απομένουσας Αντοχής

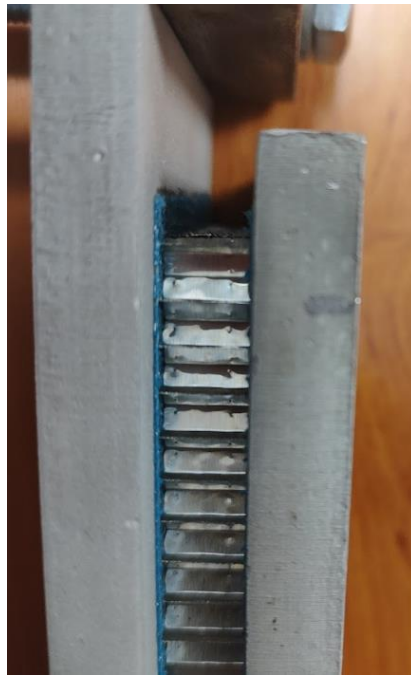
Όλα τα δοκίμια είχαν ίδιες διαστάσεις με τα δοκίμια της κόπωσης 120x50x10 (μήκος x πλάτος x πάχος), είχαν προσανατολισμό W και οπές και η κόπωση που προηγήθηκε για τον υποβιβασμό της ακεραιότητας της δομής έγινε σε εύρος φόρτισης 0.35-3.5kN. Η διαδικασία της κόπωσης σταμάτησε σε διαφορετικές περιόδους και είχε να κάνει με την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής σε σχέση με τα δεδομένα που πάρθηκαν από τα προηγούμενα πειράματα, την τελική τιμή της δυσκαμψίας εκείνη τη στιγμή και την οπτική φθορά του δοκιμίου.

Ονομασία	Τελική τιμή δυσκαμψίας S (kN/mm)
W13	No fatigue, S=20.55
W6	19.96
W8	19.55
W12	19.385
W11	18.82

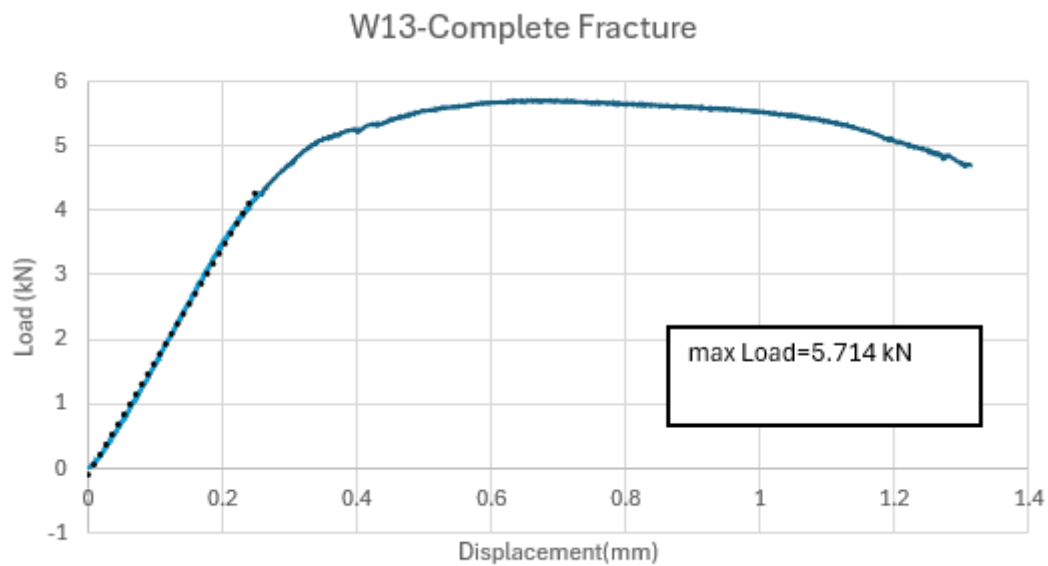
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 1 Χαρακτηριστικά δοκιμών απομένουσας αντοχής

5.2 Δοκίμιο W13

Στο δοκίμιο W13 (εικόνα 5.2.1) έγινε ένα στατικό πείραμα διάτμησης για να να προκύψει μία καμπύλη αναφοράς (δηλ. χωρίς να έχει προηγηθεί πείραμα κόπωσης στο παρακάτω δοκίμιο).



ΕΙΚΟΝΑ 5.2. 1 Κατάσταση W13 πριν τη στατική δοκιμή



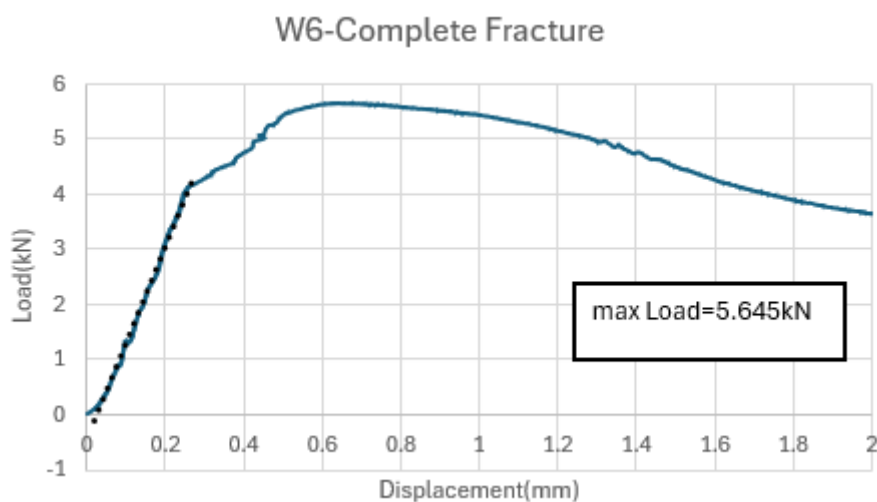
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2 1ΔΟΚΙΜΙΟ W13-Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής

5.3 Δοκίμιο W6

Το δοκίμιο W6, καταπονήθηκε για 100,000 κύκλους ζωής πριν την δοκιμή απομένουσας αντοχής σε διάτμηση (εικόνα 5.3.1). Η δυσκαμψία πριν την στατική δοκιμή διάτμησης μετρήθηκε $S=19,96 \text{ kN/mm}$. Η κόπωση του δοκιμίου δεν οδήγησε σε εμφάνιση ορατής “δια γυμνού οφθαλμού” ρωγμής, μα μίας ανεπαίσθητης που φάνηκε με έντονο ζουμ του φακού.



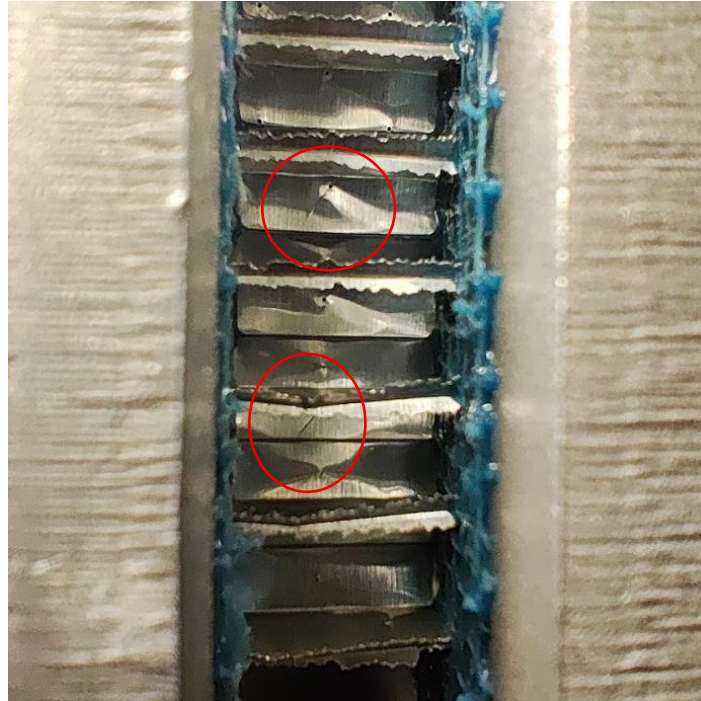
ΕΙΚΟΝΑ 5.3 1 Κατάσταση W6 πριν τη στατική δοκιμή



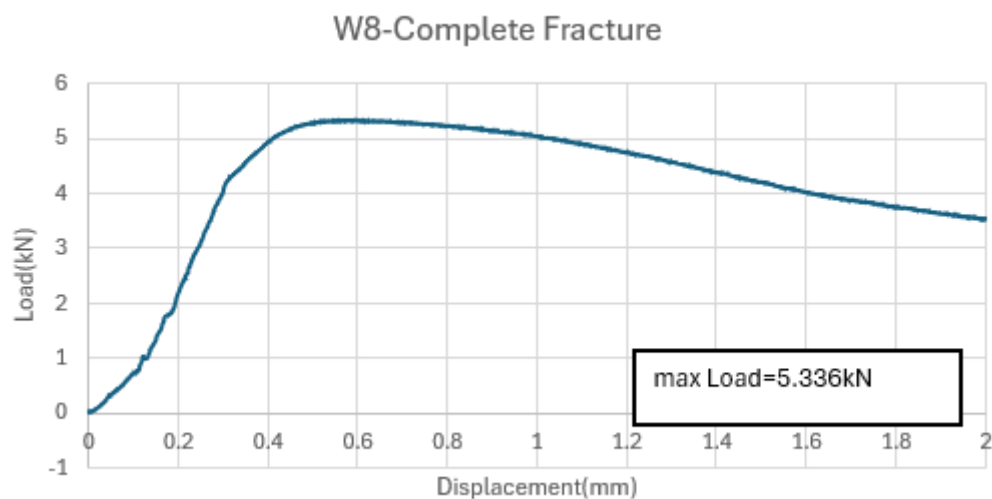
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W6- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής

5.4 Δοκίμιο W8

Το δοκίμιο W8, καταπονήθηκε για 250,000 κύκλους. Η δυσκαμψία πριν την στατική δοκιμή διάτμησης μετρήθηκε $S=19,96 \text{ kN/mm}$. Συμπληρωματικά, εμφανίστηκαν ορατές ρωγμές.



ΕΙΚΟΝΑ 5.4 1 Κατάσταση W8 πριν τη στατική δοκιμή



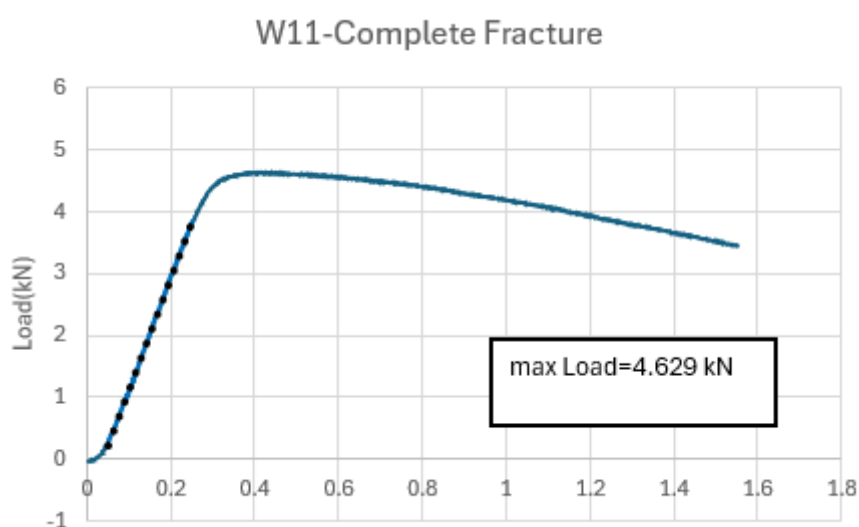
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W8- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής

5.5 Δοκίμιο W11

Το δοκίμιο W11 αποτελεί ένα επαναληπτικό πείραμα του W8 , καθώς καταπονήθηκε και αυτό για 250,000 κύκλους ζωής. Βέβαια, η υποβίβαση δυσκαμψίας που έλαβε το δοκίμιο ήταν μεγαλύτερη, καθώς η τιμή τής ήταν $S = 18,82 \text{ kN/mm}$. Αυτό το γεγονός αποτελεί απόρροια του στοχαστικού προφίλ όλων των πειραματικών διαδικασιών, καθώς στο δοκίμιο W11 υπήρξαν ρωγμές (εικόνα 5.5.1), όπως και στο δοκίμιο W8 (εικόνα 5.4.1), ωστόσο πιο ανοιχτές . Επίσης, αν και εξωτερικά η φθορά τους ήταν παρόμοια η τελική αντοχή του W11 ήταν σημαντικά μικρότερη. Συνεπώς, η απομένουσα αντοχή φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από τη δυσκαμψία και ως δευτερευόντως από εμφάνιση ρωγμών.



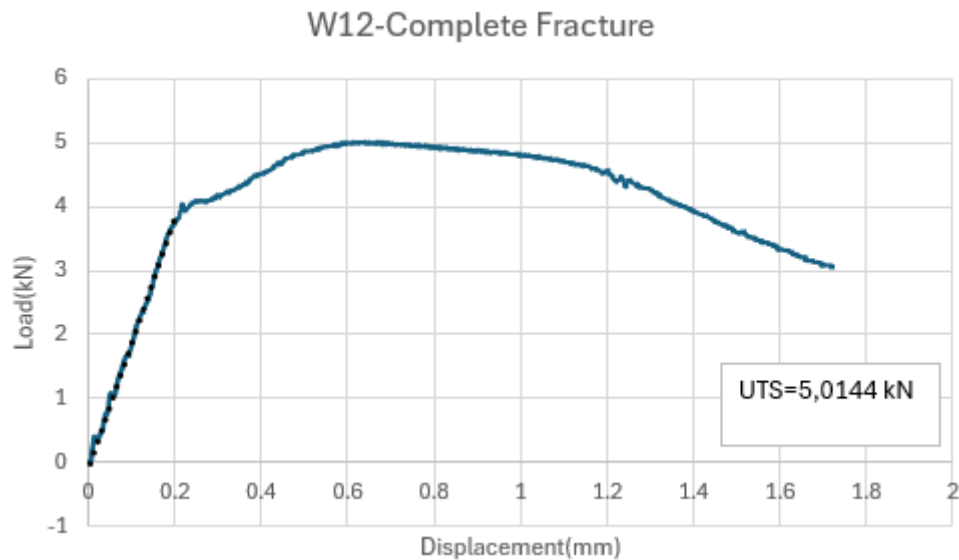
ΕΙΚΟΝΑ 5.5 1 Κατάσταση W11 πριν τη στατική δοκιμή



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.5 1 ΔΟΚΙΜΙΟ W11- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής

5.6 Δοκίμιο W12

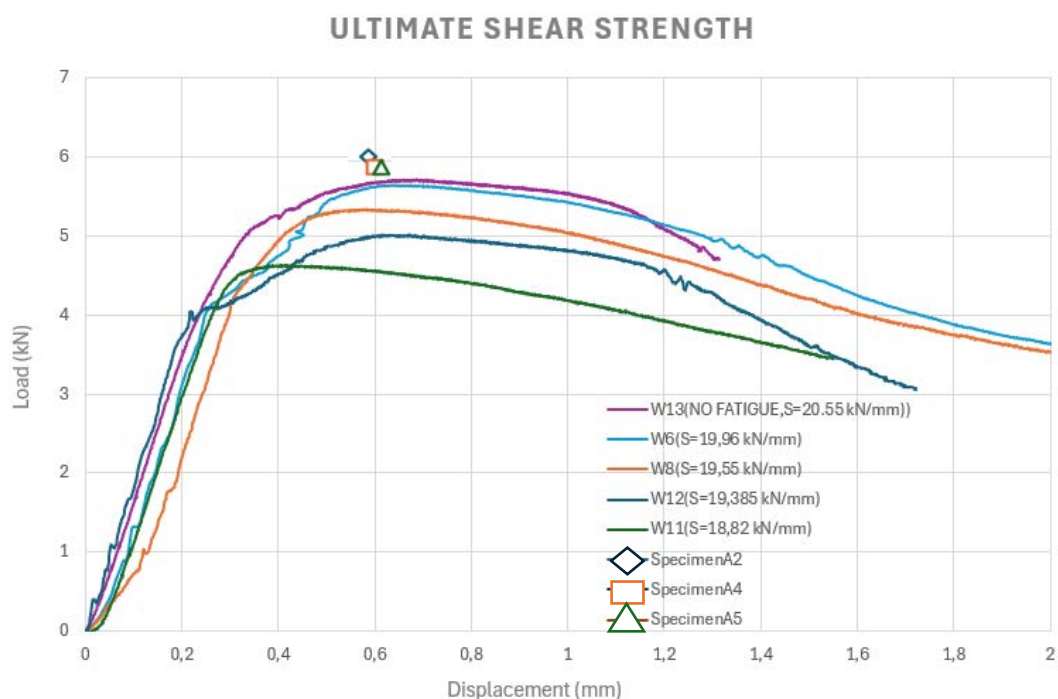
Το δοκίμιο W12, καταπονήθηκε για 410,000 κύκλους ζωής, ώστε να επιτευχθεί μια τιμή δυσκαμψίας μεταξύ των εκάστοτε τιμών δυσκαμψίας του W11 με W8 δοκιμίων. Η δυσκαμψία πριν την στατική δοκιμή διάτμησης μετρήθηκε $S=19,385 \text{ kN/mm}$ και η τελική αντοχή του ήταν και αυτή ανάμεσα στις προηγούμενες δύο. Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως η δυσκαμψίας είναι σημαντικότερη και από τη διάρκεια της κόπωσης.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.6 1ΔΟΚΙΜΙΟ W12- Πείραμα μέγιστης διατμητικής αντοχής

5.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραμάτων Απομένουσας Αντοχής

Παρακάτω παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των δοκιμών σε W-διεύθυνση με οπές από τα πειράματα απομένουσας αντοχής σε διάτμηση. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.7.1 και στον πίνακα 5.7.1, προηγηθείσα κόπωση υποβαθμίζει τη δυσκαμψία και κατ' επέκταση την απομένουσα αντοχή της δομής.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7.1 Συγκεντρωτικά πειράματα μέγιστης διατμητικής αντοχής W perforated

Ονομασία	Past loading (cycles)	Stiffness (kN/mm)	Max Load(kN)	Max Shear Stress (Mpa)
W13	No fatigue	20.55	5.714	0.952
W6	100,000	19.96	5.645	0.941
W8	250,000	19.55	5.336	0.889
W11	250,000	18.82	4.629	0.772
W12	410,000	19.385	5.014	0.836
SpecimenA2[7]	No fatigue	-	6.06	1.01
SpecimenA4[7]	No fatigue	-	5.94	0.99
SpecimenA5[7]	No fatigue	-	5.92	0.986

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα απομένουσας αντοχής

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη πειραματική μελέτη κυψελοειδών υλικών αλουμινίου τύπου honeycomb. Κατά τη διάρκεια της εργασίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα με στόχο την εμβάθυνση στα αποτελέσματα που εξήχθησαν από μελέτες προηγούμενων διπλωματικών εργασιών, καθώς και η διεξαγωγή εξ' ολοκλήρου νέων πειραμάτων που δεν είχαν μελετηθεί στο παρελθόν. Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων πάρθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η διεύθυνση L παρουσιάζει καλύτερη αντοχή σε όλα τα εύρη φορτίσεων των πειραμάτων κόπωσης συγκριτικά με την διεύθυνση W εκτελώντας μεγαλύτερο αριθμό κύκλων μέχρι την αστοχία
- Θέσεις έναρξης ρωγμών κόπωσης στα δοκίμια αποτελούν οι οπές, ενώ στα δοκίμια χωρίς οπές οι ρωγμές εμφανίζονται πάνω στο τοίχωμα και τα εξωτερικά ribbon
- Η διεύθυνση των ρωγμών είναι στις 45 μοίρες, ως προς το ribbon, ή κατά μήκος του ribbon. Στα δοκίμια με οπές μεταφέρονται σε γειτονικά κελιά ακολουθώντας τη φορά του ρήγματος και μπορεί να υπάρξει συνένωση σε μεγαλύτερες ρωγμές
- Η ύπαρξη οπών βοηθά την αντοχή σε κόπωση στη διεύθυνση L, αλλά την υποβαθμίζει στην διεύθυνση W
- Στη διεύθυνση L, τα δοκίμια χωρίς οπές παρουσιάζουν απότομη πτώση της δυσκαμψίας ("σκαλοπάτι") μετά την πρώτη ρωγμή, υποδεικνύοντας πιο έντονη υποβάθμιση, ενώ τα δοκίμια με οπές εμφανίζουν πιο ομαλή μείωση. Αντίθετα, τα δοκίμια στη διεύθυνση W παρουσιάζουν πάντα ομαλή μείωση της δυσκαμψίας, ανεξάρτητα από την ύπαρξη οπών
- Οποιαδήποτε κυκλική καταπόνηση υποβαθμίζει την στατική αντοχή της δομής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hales, T. The Honeycomb Conjecture. Discrete Comput Geom 25, 1–22 (2001)
<https://doi.org/10.1007/s004540010071>
- [2] L. J. Gibson and M. F. Ashby, (1997), Cellular solids: structure and properties, 2nd ed. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- [3] HexBond 609 modified epoxy film adhesive, Datasheet from HEXCEL
https://www.imatec.it/wp-content/uploads/2021/02/HexBond_609_DataSheet_eu.pdf
- [4] Standard, A. S. T. M. (2013). Standard test method for shear properties of sandwich core materials. ASTM Int, 1-7, p2.
- [5] Rupani, Shubham & Jani, Shivang & Acharya, Dr. (2017). Design, Modelling and Manufacturing aspects of Honeycomb Sandwich Structures: A Review. International Journal of Science & Engineering Development Research, 2, p. 526-532.
<http://doi.one/10.1712/ijsdr.17013>
- [6] Vahedi, Masoud. Development of Wall Material for Shelters
- [7] Πικιλίδης, Γιάννης Κ., (2023), Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς κόπωσης με διάτμηση κυψελοειδών δομών αλουμινίου
<http://hdl.handle.net/11615/82860>
- [8] Bruno CASTANIE, Christophe BOUVET, Malo Ginot, Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, Composites Part C: Open Access, Volume 1, August 2020, 100004
<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
- [9] Hamzah, Hudhaifa & Jasim, Laith & Alkhabbaz, Ali & Sahin, Besir. (2021). Role of Honeycomb in Improving Subsonic Wind Tunnel Flow Quality: Numerical Study Based on Orthogonal Grid. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 44. 352-369.
- [10] Aluminium honeycomb core applications
<https://corex-honeycomb.com/applications/>

[11] Hasan M. Hameed, Hamad M. Hasan, Exploring honeycomb structures: A review of their types, general applications, and role in vibration damping and structural stability, Structures Volume 76, June 2025, 108837

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108837>

[12] Jiang, Caigui & Wang, Jun & Wallner, Johannes & Pottmann, Helmut. (2014). Freeform Honeycomb Structures. Computer Graphics Forum. 33.

DOI:[10.1111/cgf.12444](https://doi.org/10.1111/cgf.12444)

[13] Shenghua Li, Rui Yang, Shiyong Sun, Bin Niu, Advances in the analysis of honeycomb structures: A comprehensive review, Composites Part B: Engineering, Volume 296, 1 May 2025, 112208

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112208>

[14] Yang Zhao, Meng Ge, Wenlai Ma, The effective in-plane elastic properties of hexagonal honeycombs with consideration for geometric nonlinearity, Composite Structures Volume 234, 15 February 2020, 111749

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111749>

[15] Wahl L, Maas S, Waldmann D, Zürbes A, Frères P. Shear stresses in honeycomb sandwich plates: Analytical solution, finite element method and experimental verification. Journal of Sandwich Structures & Materials. 2012;14(4):449-468.

[10.1177/1099636212444655](https://doi.org/10.1177/1099636212444655)

[16] Gabriel Bianchi & Guglielmo S. Aglietti & Guy Richardson, Static and Fatigue Behaviour of Hexagonal Honeycomb Cores under In-plane Shear Loads, Appl Compos Mater (2012) 19:97–115

<https://doi.org/10.1007/s10443-010-9184-5>

[17] Alexis T Kermanidis, Markus Gastens, Ioannis Pikilidis, Antonis Tsirigotis, Athanassios Dafnis, George N Labeas and Kai-Uwe Schröder, Journal of Sandwich Structures & Materials 2025, Vol. 0(0) 1–28

<https://doi.org/10.1177/10996362251337832>

[18] QingZhou, RobertR.Mayer, CharacterizationofAluminum Honeycomb Material Failure in Large Deformation Compression, Shear, and Tearing, J. Eng. Mater. Technol. Oct 2002, 124(4): 412-420

<https://doi.org/10.1115/1.1491575>

[19] Lee, H.S., Hong, S.H., Lee, J.R. et al. Mechanical behavior and failure process during compressive and shear deformation of honeycomb composite at elevated temperatures. Journal of Materials Science 37, 1265–1272 (2002).

<https://doi.org/10.1023/A:1014344228141>

[20] Shi-Dong Pan , Lin-Zhi Wu, Yu-Guo Sun, Zheng-Gong Zhou, Jia-Lin Qu, Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores, Composite Structures 72 (2006) 42–46

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.10.011>

[21] Ψηλός Ε., (2020), Πειραματική μελέτη της επίδρασης του πάχους κόλλησης και του ύψους κυψελίδας στη συμπεριφορά κόπωσης με διάτμηση κυψελοειδών δομών από αλουμίνιο, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

<http://hdl.handle.net/11615/54781>

[22]PAMG-XR1 5052 Aluminum Honeycomb, Datasheet from PLASCORE

[<https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/aluminum/pamg-xr1-5052-aluminum-honeycomb/> , Ανακτήθηκε 20.07.2022]

[23] Δόσης Χ., Βατσάκης Γ. ,(2021), Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε διάτμηση κυψελοειδών δομών αλουμινίου, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

<http://hdl.handle.net/11615/57389>

[24] Instron Floor standing Fatigue Testing Systems

<https://www.instron.com/en/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/servohydraulic-fatigue/8801-8802/>

[25] MTS 810 Material Test System

<https://www.mts.com/en/industries/materials/>

[26] Τσόγιας Δ. , (2022), Πειραματική διερεύνηση του ορίου ελαστικότητας σε διάτμηση κυψελοειδών δομών αλουμινίου, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

<http://hdl.handle.net/11615/59585>