

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

**Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε
διάτμηση κυψελοειδών δομών αλουμινίου**

Από

Χρήστος Δόσης

Γεώργιος Βατσάκης

Διπλωματική Εργασία

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

Βόλος, 2021

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής :

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Κερμανίδης Αλέξης
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (Επιβλέπων)

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Αράβας
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη για την ευκαιρία ενασχόλησης με αυτή την διπλωματική εργασία καθώς και για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης αυτής. Ακόμα θέλουμε να ευχαριστήσουμε τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητή κ.Νικόλαο Αράβα και Καθηγητή κ.Γρηγόριο Χαϊδεμενόπουλο για την εξέταση της διπλωματικής εργασίας μας. Επιπροσθέτως θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ.Προσβολίτη Χρήστο για την αποτελεσματική καθοδήγηση και εκμάθηση στην χρήση των συστημάτων μηχανικών δοκιμών του εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών. Επιπλέον θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον κ.Χαϊδεμενόπουλο για την βοήθεια στην εκμάθηση του ατμοσφαιρικού φούρνου. Θέλουμε τέλος να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας και τους φίλους μας για την στήριξη και την αγάπη τους κατά την διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς σε διάτμηση κυψελοειδών δομών αλουμινίου

ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΟΣΗΣ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΑΤΣΑΚΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Κερμανίδης Αλέξης,
Αναπληρωτής Καθηγητής

Περίληψη

Οι κυψελοειδείς δομές (honeycomb structures) από αλουμίνιο χρησιμοποιούνται συχνά ως πυρήνας για τα σύνθετα υλικά τύπου “sandwich” με πάρα πολλές εφαρμογές στο σύγχρονο κόσμο όπως στην αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή πλοίων, ανεμογεννητριών και τρένων. Επίσης χρησιμοποιούνται στον τομέα της αρχιτεκτονικής, καθώς και στην κατασκευή κτιρίων και εξαερισμών. Ο λόγος που έχει τόσο μεγάλη χρήση είναι ότι το σύνθετο αυτό υλικό συνδυάζει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία με ελάχιστο βάρος.

Ο πυρήνας τύπου honeycomb, ενώ συμμετέχει σε τέτοιου τύπου υλικά κυρίως για τα χαρακτηριστικά της ελαφριάς δομής του, αλλά και της απόσβεσης ενέργειας, καλείται επίσης να παραλάβει εφελκυστικά, καμπτικά ή διατμητικά φορτία ως δευτερεύουσα δομή (όχι φέρουσα). Επομένως η μηχανική του συμπεριφορά παρουσιάζει ενδιαφέρον μελέτης ώστε να μπορεί μέσω σχεδιασμού να επεκταθεί και σε πιο κύριες εφαρμογές όσον αφορά την παραλαβή και μεταφορά φορτίων.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι συνθήκες (μέθοδος κόλλησης, γήρανση κόλλας, τρόπος άσκησης πίεσης) με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί ένα αξιόπιστος τρόπος κόλλησης μεταλλικών επιφανειών honeycomb και συμπαγούς πλάκας αλουμινίου προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δοκίμιο διάτμησης στο πλαίσιο της προδιαγραφής ASTM C273. Με βάση τις συνθήκες κόλλησης που επιτεύχθηκαν, διενεργήθηκαν δοκιμές διάτμησης για την μελέτη της συμπεριφοράς διάτμησης πυρήνα honeycomb αλουμινίου 5052 σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C273.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Error! Bookmark not defined.1

1.1 Error! Bookmark not defined.1

1.2 Error! Bookmark not defined.

1

Κεφάλαιο 2.Βιβλιογραφική Μελέτη 3

2.1 Μέθοδοι παραγωγής υλικών κυψελοειδούς δομής 3

2.2 Χαρακτηριστικά κυψελίδας και ιδιότητες 4

2.3 Τεχνολογικές εφαρμογές Error! Bookmark not defined.6

2.4 Μηχανική Συμπεριφορά πυρήνων honeycomb-Βιβλιογραφική ανασκόπηση 10

Κεφάλαιο 3. Κεφάλαιο 3 Πειραματική μελέτη καταπόνησης σε διάτμηση 12

3.1 3.1 Υλικο Error! Bookmark not defined.12

3.2 Ιδιοσυσκευή Πειράματος Διάτμησης 13

3.2.1 Μηχανική του Προβλήματος Διάτμησης 16

3.3 Σχεδιασμός Ελασμάτων 18

3.3.1 Επιλογή Υλικού Ελασμάτων 18

3.3.2 Σχεδιασμός Ελασμάτων 19

3.4 Επιλογή κόλλας 20

3.4.1 Υπολογισμός απαιτούμενης πίεσης στα δοκίμια 23

3.4.2 Σύστημα Εξάσκησης Πιέσεως. 25

3.4.3 Θερμική Κατεργασία Διάταξης Πειράματος. 26

3.5 Κοπή και προετοιμασία Δοκιμίων 28

3.5.1 Διαδικασία κόλλησης Δοκιμίων 28

3.5.2 Συνθήκες κόλλησης δοκιμίων 31

3.6 Χρήση εξοπλισμού για δοκιμές διάτμησης 35

<u>Κεφάλαιο 4. Πειραματικά αποτελέσματα</u>	37
<u>4.1</u> <u>Στατικά Πειράματα</u> Error! Bookmark not defined.	37
<u>4.2</u> <u>Μακροσκοπικές παρατηρήσεις επιφανειών αστοχίας</u>	44
<u>Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα</u>	51
<u>Κεφάλαιο 6. Error! Bookmark not defined.</u>	54

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1 Μέθοδος παραγωγής κυψελοειδούς δομής μέσω τραβήγματος.....	3
Εικόνα 2-2 Μέθοδος παραγωγής κυψελοειδούς δομής μέσω κυματοειδούς διαμόρφωσης.....	4
Εικόνα 2-3 Βασικά χαρακτηριστικά εξαγωνικής κυψελοειδής δομής	4
Εικόνα 2-4 Χαρακτηριστικές διευθύνσεις πλέγματος.....	5
Εικόνα 2-4α Πάνω όψη πυρήνα κυψελοειδούς μορφής με διευκρίνιση της ribbon διεύθυνσης	5
Εικόνα 2-5 (α)και(β) Αεροσκάφος XB 70, (c)τυπική δομή αλουμινίου με κυψελοειδή μορφή, (d) βελτιωμένη σχεδίαση για περίβλημα αεροσκαφών.....	6
Εικόνα 2-6 Σχέδιο θερμικής προστασίας (NALT).....	7
Εικόνα 2-7 Η γέφυρα Uyllander Bridge και προσομοίωση δυνάμεων στις δομές τύπου Sandwich.....	7
Εικόνα 2-8 Σώμα τρένου από υλικό τύπου Sandwich.....	8
Εικόνα 2-9 Διπολική κεραία γραφενίου με υλικό κυψελοειδής μορφής.....	8
Εικόνα 2-10 Σκελετός άρματος τύπου Leopard I MBT με κυψελοειδή μορφή.....	9
Εικόνα 3-1 Δοκίμιο εγκάρσιας (W) διεύθυνσης κυψελίδων στην x-γ διεύθυνση.....	10
Εικόνα 3-2 Προτεινόμενη ιδιοσυσκευή για την εκτέλεση δοκιμής διάτμησης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C273.....	14
Εικόνα 3-3 Σχέδιο βάσης συσκευής	15
Εικόνα 3-4 Σχέδιο άρθρωσης συσκευής	15
Εικόνα 3-5 Κατασκευή ιδιοσυσκευής.....	16
Εικόνα 3-6 Διατμητική τάση στις επιφάνειες της διάταξης.....	17
Εικόνα 3-7 Παραμορφωμένη κατάσταση πυρήνα honeycomb λόγω διάτμησης.....	17
Εικόνα 3-8 Γεωμετρία πλακιδίου αλουμινίου 5052-H32, πάχους 5mm.....	19

Εικόνα 3-9 Γεωμετρία πλακιδίου αλουμινίου 5052-H32, πάχους 10mm.....	20
Εικόνα 3-10 Δομή κόλλας Hexbond 609 (Μορφολογία ινών).....	21
Εικόνα 3-11 Πείραμα μέτρησης μετατόπισης δοκιμίων.....	23
Εικόνα 3-12 Μέθοδος σύσφιξης της διάταξης με κοχλίες.	25
Εικόνα 3-13 Μέθοδος σύσφιξης της διάταξης με σφιγκτήρες.	26
Εικόνα 3-14 Ατμοσφαιρικός Φούρνος	27
Εικόνα 3-15 Καθαρισμός Πλακών Αλουμινίου	28
Εικόνα 3-16 Καθαρισμός Πλακών Αλουμινίου με αέρα.....	29
Εικόνα 3-17 Διαγραμμίσεις στην Πλάκα αλουμινίου	29
Εικόνα 3-18 Τοποθέτηση φιλμ Κόλλας	30
Εικόνα 3-19 Δύο πλάκες αλουμινίου και το honeycomb στο εσωτερικό τους	30
Εικόνα 3-20 Θέρμανσης της διάταξης με θερμοπίστολο για να υπολογιστεί η χαλάρωση των σφιγκτήρων.....	32
Εικόνα 3-21 μορφοποιημένοι σφιγκτήρες	32
Εικόνα 3-22 Μηχανή θλίψης/εφελκυσμού MTS 810 Material Test System (a), δοκίμιο πάνω στην μηχανή εφελκυσμού(β).....	35
Εικόνα 4-1 Περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης (περιοχή που φαίνεται το αλουμίνιο) του δοκιμίου 9.....	44
Εικόνα 4-2 Περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης (περιοχή που φαίνεται το αλουμίνιο) του δοκιμίου 7.....	45
Εικόνα 4-3 Περιοχή μικρής πλαστικής παραμόρφωσης (κομματια όπου διακρίνεται το μπλε χρώμα της κόλλας).....	46
Εικόνα 4-4 Περιοχές με αποκόλληση κόλλας στο δοκίμιο 10.....	47
Εικόνα 4-5 περιοχές με αποκόλληση κόλλας στο δοκίμιο 12.....	47
Εικόνα 4-6 επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 7.....	48
Εικόνα 4-7 επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 9	48
Εικόνα 4-8 επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 10.....	49
Εικόνα 4-9 επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 11.....	49
Εικόνα 4-10 επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 12.....	50

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες Honeycomb 5052.....	13
Πίνακας 3.2 Σύσταση Υλικού αλουμινίου 5052-H32.....	18

Πίνακας 3.3 Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες υλικού αλουμινίου 5052-H32.....	19
Πίνακας 3.4 Μηχανικές Ιδιότητες Εποξικής Κόλλας Hexbond 609.....	22
Πίνακας 3.5 Μηχανικές Ιδιότητες Εποξικής Κόλλας Redux 312.....	22
Πίνακας 3.6 Παράμετροι Θερμικής Κατεργασίας	26
Πίνακας 3.7 Χαρακτηριστικά Δοκιμών.....	33
Πίνακας 3.8 Παράμετροι της διαδικασίας κόλλησης για κάθε δοκίμιο.....	34
Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα Πειραματικών Διαδικασιών.....	52

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Πίεσης – Μετατόπισης Δοκιμίου 3, Πειράματος Καθορισμού Παραμόρφωσης.....	24
Διάγραμμα 2 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 7.....	38
Διάγραμμα 3 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 7. (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2MM ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)	38
Διάγραμμα 4 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 9.....	39
Διάγραμμα 5 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 9. (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2MM ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ).....	39
Διάγραμμα 6 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 10.....	40
Διάγραμμα 7 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 10. (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2MM ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)	40
Διάγραμμα 8 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 11.....	41
Διάγραμμα 9 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 11. (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2MM ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)	42
Διάγραμμα 10 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 11.....	43
Διάγραμμα 11 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Δοκιμίου 12. (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2MM ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)	43
Διάγραμμα 12 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Όλων Των Δοκιμών.....	51
Διάγραμμα 13 Διατμητικής Δύναμης-Μετατόπισης Όλων Των Δοκιμών- Έμφαση Στην Ελαστική Περιοχή.....	52

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή προβλήματος

Τα σύνθετα υλικά τύπου sandwich με δομή πυρήνα honeycomb χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε πάρα πολλές μηχανολογικές εφαρμογές ως ελκυστικά υλικά που παρέχουν υψηλή δυσκαμψία και καλή αντοχή σε συνδυασμό με μία ελαφριά δομή. Η δομή του πυρήνα είναι αυτή που προσδίδει χαμηλό βάρος ενώ οι πλάκες επικάλυψης προσδίδουν την δυσκαμψία. Σε ένα τομέα όπου έχει μελετηθεί ελάχιστα, η μηχανική συμπεριφορά των honeycomb υλικών επιβεβαιώνει όλα τα παραπάνω και η μελέτη της αποτελεί μεγάλο ενδιαφέρον. Γνωρίζοντας την μηχανική συμπεριφορά τέτοιων υλικών γίνεται στοχευμένη η εφαρμογή τους σε όλο και περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές.

Η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη κυψελοειδών δομών αλουμινίου 5052 σε στατική καταπόνηση με καθαρή διάτμηση και παροχή αποτελεσμάτων. Λόγω της ιδιαίτερης δυσκολίας που υπεισέρχεται στην πειραματική μελέτη του υλικού honeycomb από την φύση της δομής του και την πολύ χαμηλή του δυσκαμψία, διερευνήθηκε στην παρούσα εργασία η ανάπτυξη ενός τρόπου για τον μηχανικό έλεγχο της δομής αυτής σε διατμητικά φορτία. Ο τρόπος που επιλέχθηκε για την διενέργεια των μηχανικών δοκιμών ήταν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM, στην οποία όμως δεν διευκρινίζονται οι ακριβείς συνθήκες με τις οποίες γίνεται η συναρμογή-κόλληση της honeycomb δομής επάνω στην μεταλλική επιφάνεια. Οι τρόποι αυτοί, διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία λεπτομερώς. Μελετήθηκαν έτσι παράμετροι όπως η χρήση ειδικού μέσου κόλλησης, το πάχος των πλακών κόλλησης, ο χρόνος γήρανσης της κόλλας και οι τρόποι εξασφάλισης ομοιόμορφης κατανομής πίεσης στο δοκίμιο ώστε να έχουμε ικανοποιητική κόλληση και ικανοποιητικά πειραματικά αποτελέσματα.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην έρευνα της συμπεριφοράς του υλικού τύπου honeycomb σε διάτμηση και διερεύνηση συγκεκριμένων παραγόντων που την επηρεάζουν. Η δομή που επιλέχθηκε για την εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια.

- Στο Κεφάλαιο 1, περιγράφεται το θέμα της διπλωματικής εργασίας και αναλύεται η συνεισφορά της βασικής έρευνας στις δομές αλουμινίου με κυψελοειδή μορφή.
- Στο Κεφάλαιο 2, αναφέρονται οι τρόποι παραγωγής του κυψελοειδούς εξαγωνικού πλέγματος και τα βασικά χαρακτηριστικά του μαζί με

τεχνολογικές εφαρμογές αυτού στην βιομηχανία ενώ γίνεται αναφορά σε μελέτες πάνω σε τέτοιου είδους δομές.

- Στο Κεφάλαιο 3, γίνεται αναφορά στο υλικό, τις ιδιότητές του και στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τις δοκιμές διάτμησης.
- Στο Κεφάλαιο 4, παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, μαζί με την μακροσκοπική παρατήρηση των επιφανειών θραύσης τους.
- Στο Κεφάλαιο 5, συνοψίζονται τα συμπεράσματα των πειραμάτων της εργασίας.
- Τέλος στο Κεφάλαιο 6, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές αναφορές της εργασίας.

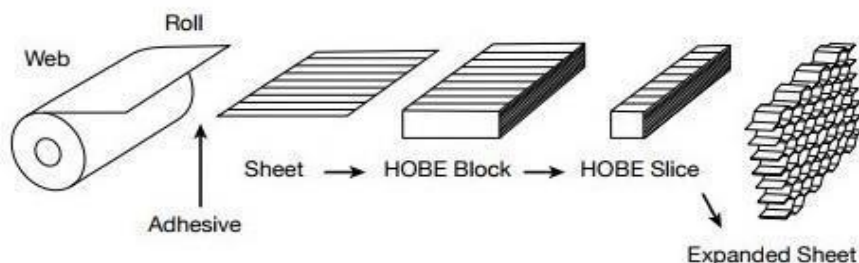
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Μελέτη

2.1 Μέθοδοι παραγωγής

Τα συνηθέστερα υλικά για την παραγωγή κυψελοειδών πυρήνων στην αεροναυπηγική, είναι το αλουμίνιο και το υλικό Aramid (π.χ. Nomex™). Το υλικό Aramid είναι μια υποκατηγορία υλικών με συνθετικές ίνες με θερμική αντοχή και σκληρό σώμα. Σύμφωνα βέβαια με τους Aktay, Johnson και Kröplin [1], το Aramid προτιμάται από το αλουμίνιο διότι το δεύτερο έχει ευαισθησία στην διάβρωση αν υπάρχει εισροή υγρασίας. Παρόλα αυτά σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με κυψελοειδείς δομές αλουμινίου. Στην περίπτωση των κυψελοειδών δομών αλουμινίου, ο πυρήνας συνήθως παράγεται με μια από τις δύο μεθόδους που παρουσιάζονται παρακάτω.

1^{ος} τρόπος παραγωγής κυψελοειδούς δομής

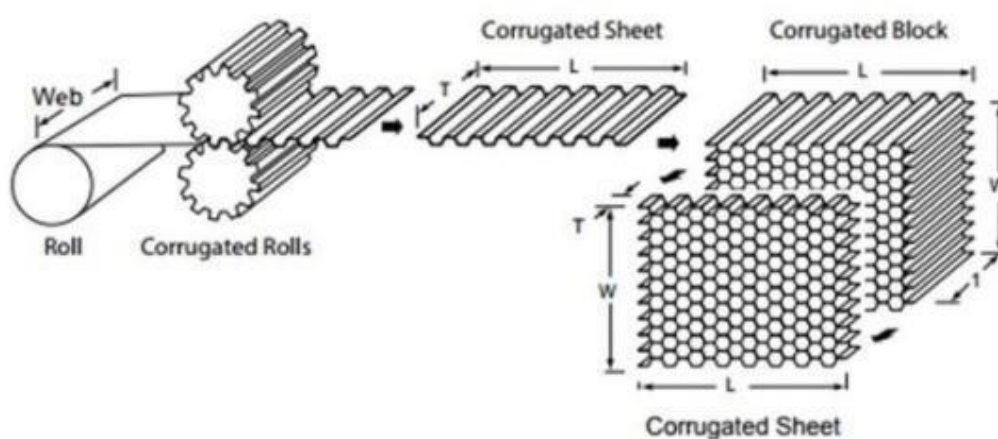
Αρχικά, η μέθοδος παραγωγής μέσω τραβήγματος. Το υλικό που σε αυτή την περίπτωση είναι το αλουμίνιο είναι σαν λεπτό φύλλο με το εκάστοτε ζητούμενο πάχος τυλιγμένο σε μορφή κουλούρας. Το φύλλο αυτό περνάει μέσα από ένα εκτυπωτή ώστε να εκτυπωθούν κολλητικές γραμμές. Όταν αυτές οι γραμμές τυπωθούν, το ρολό κόβεται σε κομμάτια τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω από το άλλο με την βοήθεια μηχανημάτων. Αυτά τα κομμάτια συμπιέζονται από υδραυλική πρέσα και παράλληλα θερμαίνεται σε σταθερή θερμοκρασία για ένα χρονικό διάστημα ώστε οι κολλητικές γραμμές να κολλήσουν και να δημιουργήσουν ένα μπλοκ honeycomb. Στις περισσότερες περιπτώσεις το αλουμίνιο έχει υποστεί κάποια χημική κατεργασία, ώστε να μην διαβρώνεται. Στην συνέχεια, αυτό το μπλοκ κόβεται σε φέτες σε πάχος ανάλογα με τις απαιτήσεις του αγοραστή. Τέλος το honeycomb τραβιέται δημιουργώντας το τελικό προϊόν. Όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 2-1.



Εικόνα 2-1 Μέθοδος παραγωγής κυψελοειδούς δομής μέσω τραβήγματος [2]

2^{ος} τρόπος παραγωγής κυψελοειδής δομής

Μια εναλλακτική μέθοδος περιλαμβάνει την τροφοδοσία του φύλλου αλουμινίου τυλιγμένο σε ρολό, ανάμεσα από κατάλληλα ράουλα και σχηματίζεται η κυματοειδής διαμόρφωση στο ρολό που φαίνεται στην εικόνα 2-2. Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την τοποθέτηση κόλλας στις επίπεδες επιφάνειες του ρολό με κυματοειδή πλέον μορφή και ενώνουν αυτές τις επιφάνειες κάθε φύλλου μέχρι να κολλήσουν. Αυτή η διαδικασία συνήθως εκτελείται για μεγέθη κυψελών με μικρό μέγεθος. Οι δύο παραπάνω διαδικασίες δημιουργούν κυψέλες με διπλό τοίχωμα.

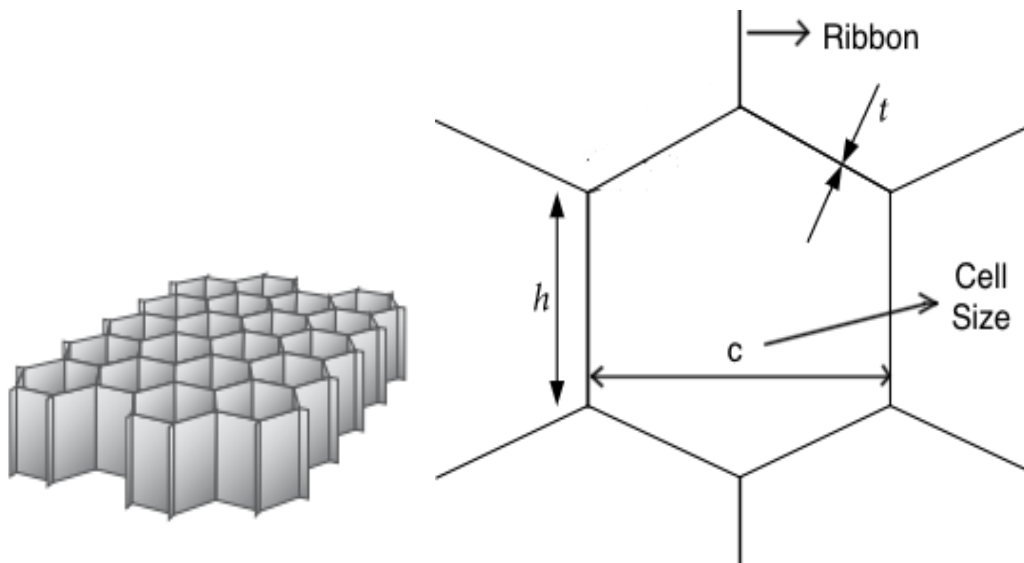


Εικόνα 2-2 Μέθοδος παραγωγής κυψελοειδούς δομής μέσω κυματοειδούς διαμόρφωσης [2]

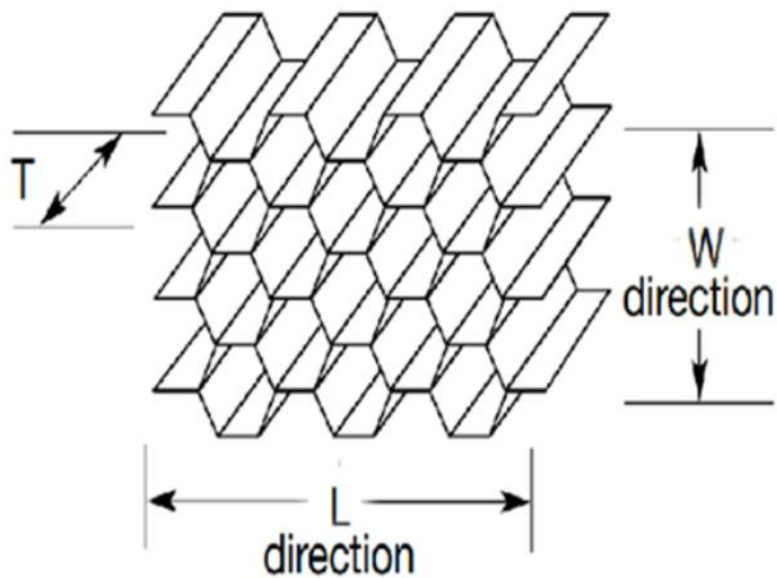
2.2 Χαρακτηριστικά κυψελίδας και ιδιότητες του υλικού

Η κυψελίδα του honeycomb που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 6 πλευρές όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-3. Το μήκος πλευράς τοιχώματος στην κυψελίδα μας είναι $h = 3\text{mm}$. Το πάχος τοιχώματος είναι $t = 0,0254\text{mm}$ και τέλος ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι το μέγεθος κελιού c , το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο παράλληλων πλευρών και στην περίπτωση μας έχουμε $c = 4,9\text{mm}$. Στην εικόνα 2-4 υπάρχουν τρεις διευθύνσεις, L η οποία είναι παράλληλη με το μήκος του honeycomb, η διεύθυνση W η οποία είναι παράλληλη με το πλάτος του honeycomb και τέλος T το πάχος του honeycomb. Στα πειράματα που θα ακολουθήσουν χρησιμοποιήθηκαν honeycomb αλουμινίου με πάχος $T = 10\text{mm}$,

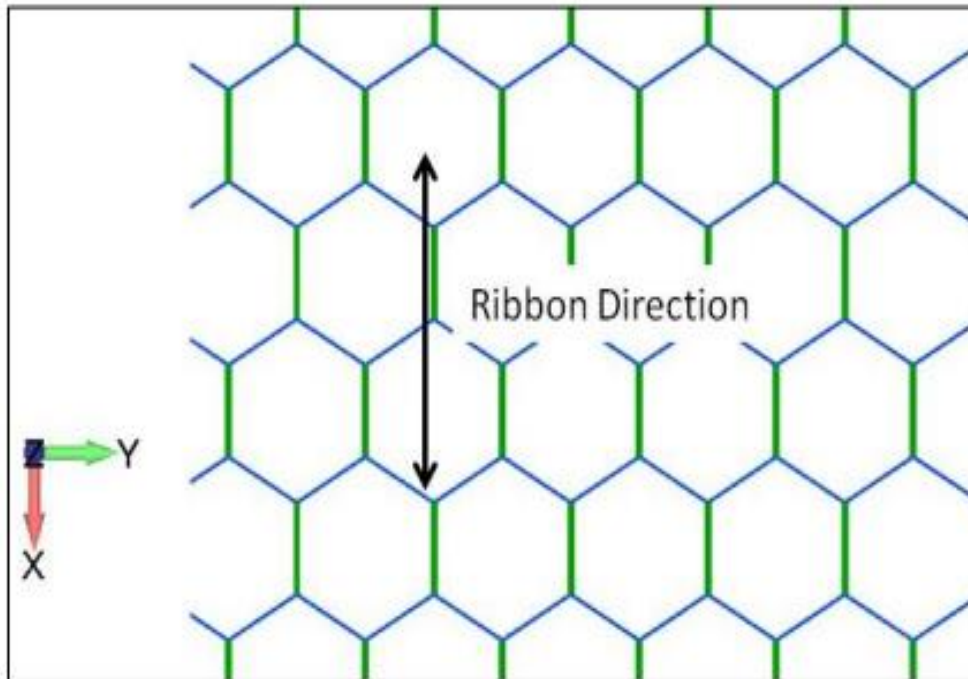
μήκος $Y=120\text{mm}$ και πλάτος $X=50\text{mm}$. Τα δοκίμια στην συγκεκριμένη εργασία κόπηκαν με την διεύθυνση της μεγάλης πλευράς, κάθετη στην ribbon πλευρά. Η διεύθυνση της ribbon πλευράς διευκρινίζεται στην εικόνα 2-4α.



Εικόνα 2-3 Βασικά χαρακτηριστικά εξαγωνικής κυψελοειδής δομής [3],[4]



Εικόνα 2-4 Χαρακτηριστικές διευθύνσεις πλέγματος [5]



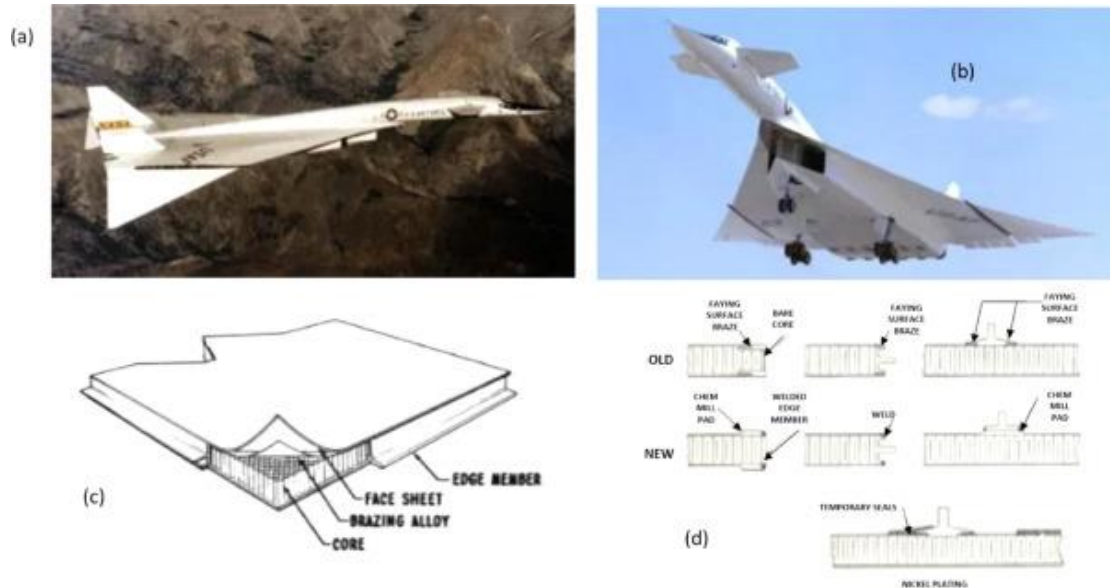
Εικόνα 2-4α Πάνω όψη πυρήνα κυψελοειδούς μορφής με διευκρίνιση της ribbon διεύθυνσης [6]

2.3 Τεχνολογικές εφαρμογές

Τα σύνθετα υλικά τύπου sandwich με δομή πυρήνα honeycomb, παρουσιάζονται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές που απαιτείται ο συνδυασμός ικανοποιητικής δυσκαμψίας και ελαφριάς δομής. Αξίζει να αναφερθούν οι εφαρμογές στην αεροδιαστημική, σε κτιριακές κατασκευές, σε κατασκευές μεταφορών όπως τρένα, πλοία καθώς και στην βιοϊατρική. Παραδείγματα κάθε τομέα θα αναφερθούν στην συνέχεια της παραγράφου.

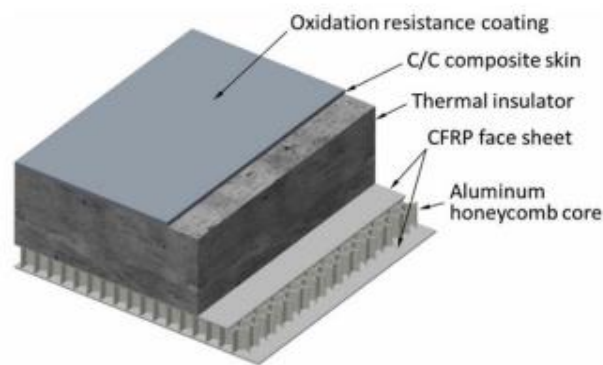
Οι δομές αλουμινίου με κυψελοειδή μορφή συμβάλλουν επίσης στην μείωση της μετάδοσης θορύβου. Λαμβάνοντας και αυτό υπόψιν, βρήκε εφαρμογή στην κατασκευή οροφών ελικοπτέρων, τρένων τόσο για την μείωση θορύβου όσο και για

την αντοχή τους στις υψηλές θερμοκρασίες.



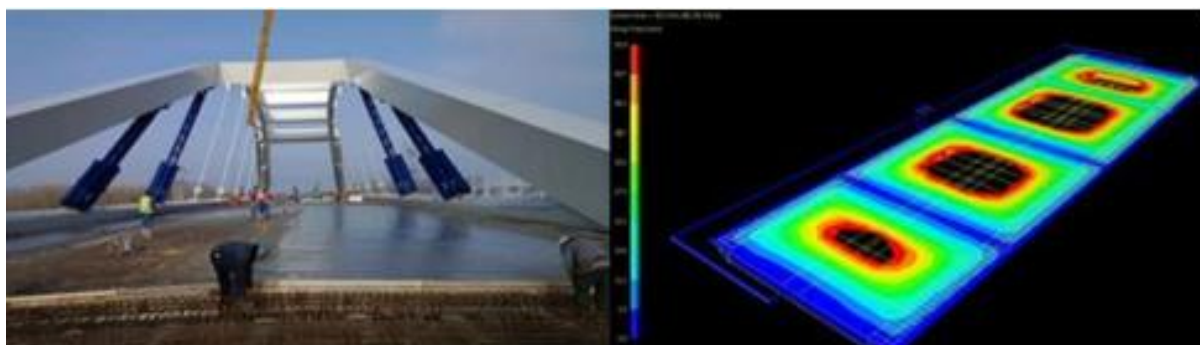
Εικόνα 2-5 (α)και(β) Αεροσκάφος XB 70, (γ)τυπική δομή αλουμινίου με κυψελοειδή μορφή, (δ) βελτιωμένη σχεδίαση για περίβλημα αεροσκαφών [8]

Επιπλέον το project (NALT) (βλέπε Εικόνα 2-6) η ιδέα ενός μη μεταβλητού ελαφρού συστήματος θερμικής προστασίας θα χρησιμοποιηθεί από την Κίνα για την επίσκεψη διαστημόπλοιων στον Άρη Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-6 Σχέδιο θερμικής προστασίας (NALT) [5]

Στον τομέα του πολιτικού μηχανικού, χρησιμοποιούνται σε οροφές κατασκευών καθώς και στο πάτωμα, προσφέροντας μόνωση, αδιαβροχοποίηση και αντοχή στην συγκράτηση φορτίου (βλέπε εικόνα 2-7).



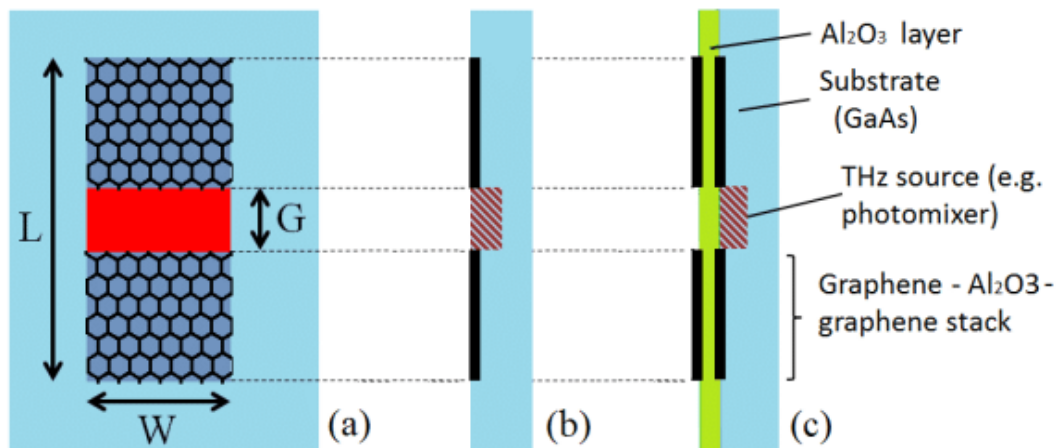
Εικόνα 2-7 Η γέφυρα Uyllander Bridge και προσομοίωση δυνάμεων στις δομές τύπου Sandwich [8]

Λόγω του χαμηλού τους βάρους, βρίσκουν εφαρμογή σε μέσα μαζικής μεταφοράς (βλέπε εικόνα 2-8) καθώς και σε διασωστικά οχήματα [9],[10]. Καθώς και στην ναυτιλία βρίσκουν εφαρμογές στην καρίνα των πλοίων.



Εικόνα 2-8 Σώμα τρένου από υλικό τύπου Sandwich [11]

Μεταξύ των πιο πρόσφατων εφαρμογών δομών sandwich με θερμοπλαστικό πυρήνα μελετήθηκε για εφαρμογή σε κεραία ραδιοσυχνότητας (βλέπε εικόνα 2-9). Επιπλέον, χρησιμοποιείται ως συλλέκτης ενέργειας λόγω της δυνατότητας λυγισμού και της μορφής του.



Εικόνα 2-9 Διπολική κεραία γραφενίου με υλικό κυψελοειδής μορφής [12]

Τέλος, δομές αλουμινίου με κυψελοειδή μορφή βρήκαν χρήση και στα άρματα μάχης. Η αντικατάσταση του μεταλλικού πατώματος και σκελετού με υλικό κυψελοειδούς μορφής έκανε εφικτή την μείωση του βάρους κατά 3,36% δηλαδή 1426 Kg στο Leopard I MBT(όχημα μάχης)(βλέπε Εικόνα 2-10) .



Εικόνα 2-10 Σκελετός άρματος τύπου Leopard I MBT με κυψελοειδή μορφή. [13]

2.4 Μηχανική Συμπεριφορά πυρήνων honeycomb -Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών κυψελοειδών δομών τύπου honeycomb μελετάται τα τελευταία χρόνια στην διεθνή βιβλιογραφία. Οι μελετητές Shi-Dong et al. [14] πραγματοποίησαν πειράματα διάτμησης σε κυψελοειδής δομές προκειμένου να μελετήσουν πως αυτό το υλικό παραμορφώνεται και αστοχεί. Χρησιμοποίησαν εξαγωνικής δομής Honeycomb αλουμινίου 5056. Βρέθηκε ότι η παραμόρφωση κατηγοριοποιείται σε τέσσερα στάδια: την ελαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων, την πλαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων, την αστοχία των επικλινών τοιχωμάτων και απόσχιση του πυρήνα του honeycomb.

Οι Bianchi Gabriel et al. [15] πραγματοποίησαν στατικά πειράματα αλλά και πειράματα κοπώσεως σε διάτμηση σε δομές εξαγωνικής κυψελίδας. Επίσης έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης της δομής σε υπολογιστικό περιβάλλον. Βρέθηκε ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ της αντοχής διατμήσεως και του επιβαλλόμενου φορτίου. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η διεύθυνση φόρτισης W δεν αποτελεί την αδύναμη διεύθυνση φόρτισης. Στα πειράματα κόπωσης βρέθηκε ότι η διεύθυνση φόρτισης L έχει περισσότερη διάρκεια ζωής από ότι στην W κατεύθυνση.

Οι Hodge et al. [16] εξέτασαν την αντοχή σε διάτμηση κυψελοειδών δομών με μεγάλο πάχος. Την μελέτη αυτή πραγματοποίησαν με τρεις τρόπους δοκιμών. Με πείραμα κρούσης, πείραμα κάμψεως και πείραμα καθαρής διάτμησης. Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξανόταν η ενέργεια κρούσης τόσο η αντοχή της δομής μίκραινε. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε διάτμηση κατά της δοκιμής με κάμψη ήταν μεγαλύτερη από ότι στην δοκιμή καθαρής διάτμησης.

Οι Liu et al. [17] προσέγγισαν το πρόβλημα της διάτμησης τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά. Παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα της αναλυτικής διαδικασίας συμφωνούν με την πειραματική. Επίσης αποδείχθηκε ότι το μέτρο διατμήσεως στην οριζόντια διεύθυνση είναι 1.667 φορές παραπάνω σε σχέση με την διαμήκη.

Οι Francois Cote et al. [18] κατασκεύασαν και εξέτασαν την αντοχή σε διάτμηση τετραγωνικών δομών honeycomb. Παρατηρήθηκε ότι η δομή αυτή έχει ισότροπη συμπεριφορά. Επίσης υπήρχε διαφορά στην αντοχή σε διάτμηση όταν άλλαζαν οι διαστάσεις της κυψελίδας οπότε εξήχθη το συμπέρασμα ότι επηρεάζεται η αντοχή σε σχέση με τον λόγο διαστάσεων.

Οι Yang et al. [19] εξέτασαν την αντοχή δομών honeycomb σε συνθήκες θλίψης. Το συμπέρασμα που εξήχθη ήταν ότι σε συνθήκες πλήρους ευθείας σύνθλιψης το υλικό μπορεί να θεωρηθεί ελαστικά τέλειο- πλαστικό υλικό, ενώ σε συνθήκες μερικής σύνθλιψης το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικό- πλαστικό υλικό που σκληραίνει.

Οι Solmaz et al. [20] μελέτησαν την συμπεριφορά του honeycomb υλικού σε συνθήκες κάμψεως και κρούσης. Παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας το πάχος του εξωτερικού πλακιδίου αυξανόταν η αντοχή της διάταξης σε κάμψη. Επίσης όταν το φορτίο ξεπερνούσε μια συγκεκριμένη τιμή, υπήρχε αποκόλληση του πυρήνα από τα τοιχώματα της διάταξης.

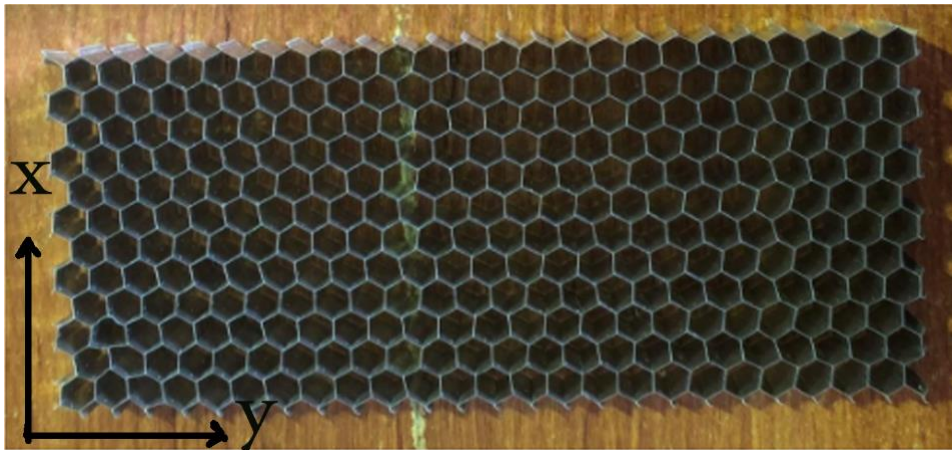
Οι Wahl Laurent et al. [21] εξέτασαν τους τύπους αστοχίας εξαγωνικών δομών honeycomb. Ο πρώτος τύπος αστοχίας ήταν μέσω διατμητικών τάσεων και ο δεύτερος μέσω εσοχής στα τοιχώματα του πυρήνα. Με την προϋπάρχουσα εσοχή προκαλείται λυγισμός και στα τοιχώματα που δεν έχουν αρχική βλάβη κατά την επιβολή φορτίου.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν περιορισμένες μελέτες που εξετάζουν την μηχανική συμπεριφορά σε στατικά φορτία διάτμησης πάνω στις κυψελοειδούς δομές με πυρήνα honeycomb. Για αυτό τον λόγο κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη των δομών αυτών με τον συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης, καθώς και εξερεύνηση καλύτερης μεθοδολογίας προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη, πιο εύκολη και αποτελεσματικότερη κόλληση της διάταξης του πειράματος.

Κεφάλαιο 3. Πειραματική Διαδικασία

3.1 Υλικό

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε honeycomb τύπου PAMG-XR1 5052. Το PAMG-XR1 5052 honeycomb είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο 5052 και ικανοποιεί τις προϋποθέσεις (υλικά πυρήνα αλουμινίου για κατασκευή σύνθετου τύπου sandwich) της προδιαγραφής AMS C7438 Rev A. Το υλικό που επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία είναι αλουμίνιο 5052. Το υλικό αλουμινίου παραλήφθηκε σε πλάκες μεγάλων διαστάσεων από το Ινστιτούτο Μηχανικής και Ελαφρών Κατασκευών (Institut für Strukturmechanik und Leichtbau) του Πανεπιστημίου του Aachen (RWTH Aachen). Αυτά τα φύλλα κόπηκαν στην συνέχεια στις διαστάσεις που μας εξυπηρετούσαν για τα ζητούμενα του πειράματος διάτμησης. Τα δοκίμια αλουμινίου τύπου honeycomb έχουν κατασκευαστεί με την μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης, όπου προτιμήθηκε ως κατάλληλη για κοπή λεπτών τοιχωμάτων. Η διαδικασία κοπής δοκιμίων honeycomb διαστάσεων 120mm ύψος, 50mm πλάτος και 10mm πάχος έγινε στο Πανεπιστήμιο Πατρών στο Μηχανουργείο Υποστήριξης Ερευνητικών Δραστηριοτήτων-ΜΥΕΔ. Επίσης, Ο πυρήνας στην παρούσα εργασία έχει εξαγωνική διάταξη και η διεύθυνση της ribbon πλευράς είναι παράλληλη στην W διεύθυνση του honeycomb, παράλληλη στην x διεύθυνση όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1. Επίσης είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο 5052.



Εικόνα 3-1 Δοκίμιο εγκαρσίας (W) διεύθυνσης κυψελίδων στην x-y διεύθυνση

Το βάρος του δοκιμίου διαστάσεων 120mm*50mm*10mm υπολογίζεται από την πυκνότητα του υλικού καθώς και από τις διαστάσεις του, χρησιμοποιώντας τον τύπο $\text{πυκνότητα} = \frac{\text{μάζα του υλικού}}{\text{όγκος του υλικού}}$. Κάποια επιπρόσθετα χαρακτηριστικά σχετικά με το PAMG-XR1 5052 honeycomb παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα

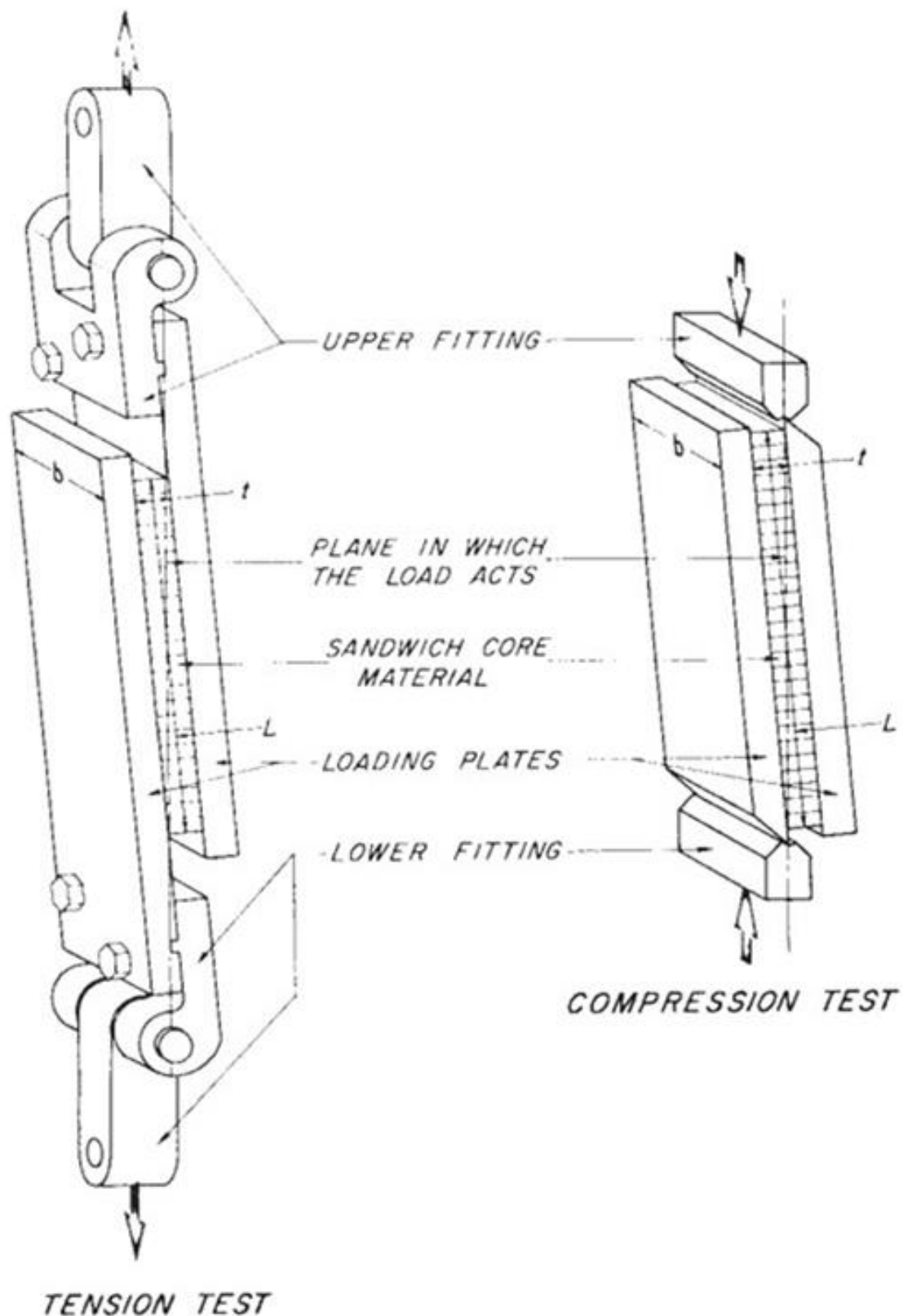
συγκεκριμένα δεδομένα αφορούν την διεύθυνση γ σύμφωνα με την Εικόνα 3-1, όπου εφαρμόζεται και η δύναμη στην πειραματική διαδικασία.

Ονομαστική Πυκνότητα (kN/m ³)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (KSI)	Αντοχή σε διάτμηση (MPa)	Μέτρο διάτμησης (KSI)
0,4869	1.862	75	1.448	45

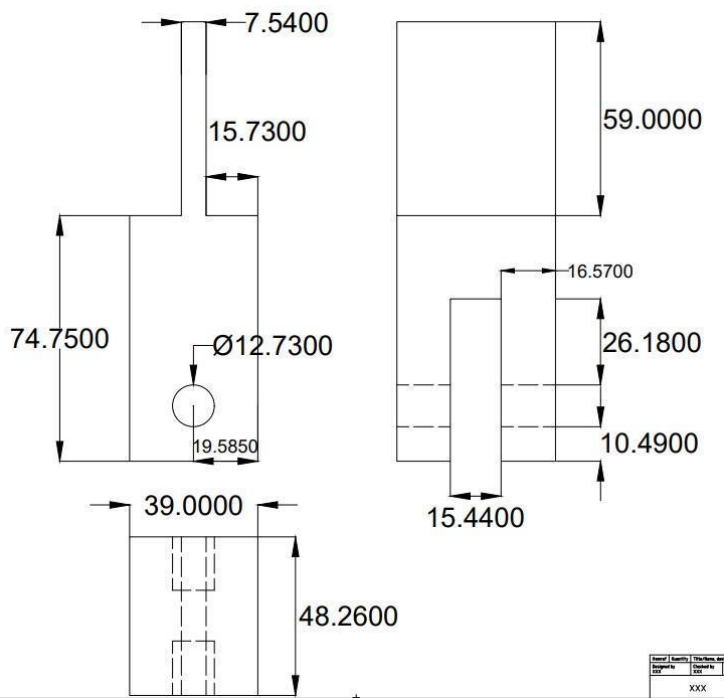
Πίνακας 3.1 ιδιοτήτων Honeycomb 5052 [22]

3.2 Ιδιοσυσκευή Πειράματος Διάτμησης

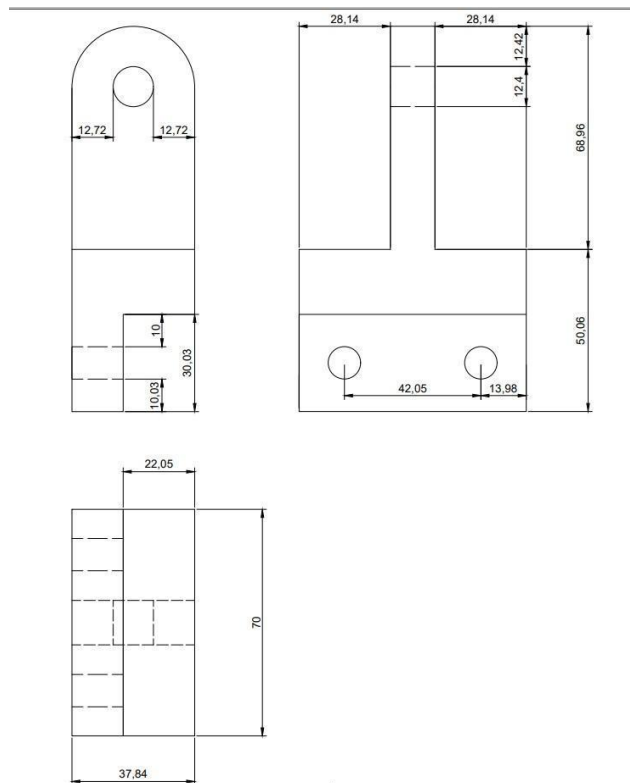
Ο σχεδιασμός της ιδιοσυσκευής διάτμησης (βλέπε Εικόνα 3-3,3-4) έγινε με το πρότυπο της προδιαγραφής ASTM C273 Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials [23]. Ακολουθώντας το συγκεκριμένο πρότυπο, το πλάτος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 50mm και το μήκος του τουλάχιστον 12 φορές το πάχος του. Η ιδιοσυσκευή ή οι αρθρώσεις (βλέπε Εικόνα 3-5), χρειάζονται και εξυπηρετούν στην τοποθέτηση του δοκιμίου στην μηχανή εφελκυσμού για την διεξαγωγή του πειράματος διάτμησης. Η ύπαρξη αρθρώσεων εξυπηρετεί επίσης, στην διαφοροποίηση του πειράματος από ένα απλό πείραμα εφελκυσμού αλλά η διεύθυνση όπου ασκείται η εφελκυστική δύναμη πρέπει να περνάει από τη διαγώνιο του πυρήνα honeycomb όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-2. Για να υπάρξει καθαρή διάτμηση η γωνία της διαγώνιου πρέπει να είναι πολύ μικρή ώστε να είναι όσο το δυνατό παράλληλη στην αξονική διεύθυνση. Παρατίθενται επίσης κάποιες φωτογραφίες με τα σχέδια της ιδιοσυσκευής.



Εικόνα 3-2 Προτεινόμενη ιδιοσυσκευή για την εκτέλεση δοκιμής διάτμησης σύμφωνα με το πρότυπο σε πυρήνες honeycomb [23]



Εικόνα 3-3 Σχέδιο βάσης συσκευής



Εικόνα 3-4 Σχέδιο άρθρωσης συσκευής



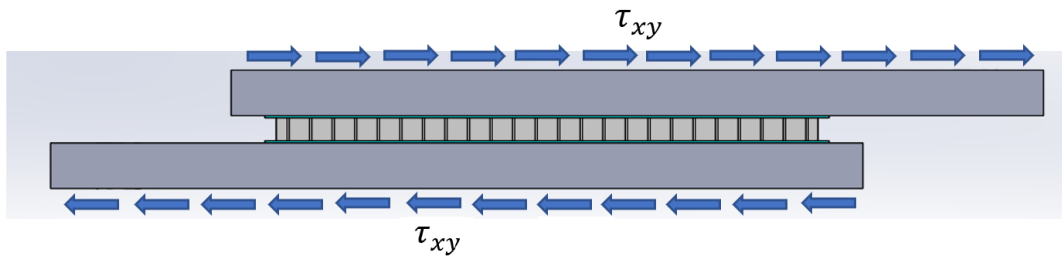
Εικόνα 3-5 Κατασκευή ιδιοσυσκευής[27]

3.2.1 Διάτμηση κυψελοειδών υλικών τύπου honeycomb.

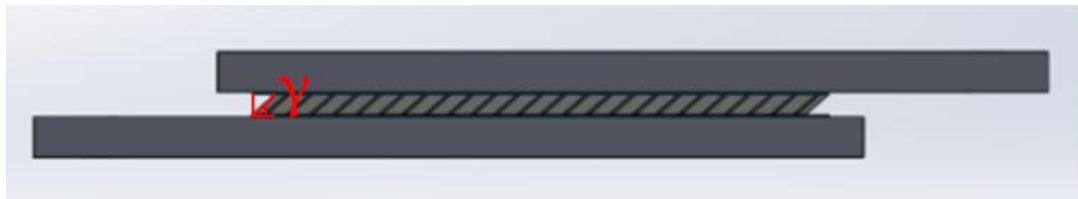
Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε προτείνεται από το πρότυπο ASTM C273 (βλέπε Εικόνα 3-2), για την τοποθέτηση της δομής αλουμινίου με πυρήνα κυψελοειδής μορφής και την διεξαγωγή του πειράματος διάτμησης. Η δύναμη μεταφέρεται από την ιδιοσυσκευή στις πλάκες αλουμινίου που είναι συνδεδεμένες με αυτή με κοχλίες. Η μηχανή του εφελκυσμού εφελκύει το κάθε ένα πλακίδιο ξεχωριστά. Σύμφωνα με το πρότυπο της προδιαγραφής ASTM C273 το μήκος των πλακών καθώς και η απόσταση μεταξύ των δύο μερών της ιδιοσυσκευής, είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται καθαρή διάτμηση. Η διεύθυνση της ασκούμενης δύναμης λόγω του αρκετά μεγαλύτερο μήκος από ότι πλάτος πυρήνα honeycomb θεωρείται ως αξονική. Εξαιτίας του μικρού πάχους του πυρήνα δεν δημιουργούνται σημαντικές εκκεντρότητες, από τις επιβολές φορτίων εκτός του κεντρικού επιπέδου της διάταξης. Έτσι καμπτικά φορτία, ροπές και ορθές τάσεις είναι αμελητέες σε σύγκριση με τα διατμητικά φορτία. Η ιδιοσυσκευή της Εικόνα 3-5 τοποθετείται στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού- Θλίψης όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο προηγούμενης διπλωματικής εργασίας [27].

Παρακάτω φαίνεται η διεύθυνση της διατμητικής τάσης πάνω στην διάταξη του πειράματος (Εικόνα 3-6). Η τάση αυτή μεταφέρεται από τις πλάκες αλουμινίου, μέσω της κόλλας, στο honeycomb υλικό. Δεν απεικονίζονται ορθές τάσεις, η καμπτικές ροπές στο σχήμα επειδή έχουν αμελητέα συνεισφορά. Τέλος στην

εικόνα 3-7 φαίνεται η παραμορφωμένη κατάσταση της διάταξης honeycomb καθώς και η γωνία διάτμησης γ .



Εικόνα 3-6 Διατμητική τάση στις επιφάνειες της διάταξης.



Εικόνα 3-7 Παραμορφωμένη κατάσταση πυρήνα Honeycomb λόγω διάτμησης.

Η αναλυτική προσέγγιση του προβλήματος υποστηρίζει ότι οι δυνάμεις διάτμησης κατανέμονται, στα παράλληλα και με κλίση τοιχώματα των κυψελίδων. Μια απλοποίηση που μπορεί να γίνει στο πρόβλημα είναι να θεωρηθεί ο πυρήνας του honeycomb υλικού ως ενιαία πλάκα αλουμινίου. Έτσι η μέση ενεργός διατμητική τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο $\tau_{eff} = F/A$, όπου F η δύναμη διάτμησης που επενεργεί στα πλακίδια εξαιτίας της ιδιοσυσκευής και A είναι η επιφάνεια του Honeycomb. Αυτή η θεώρηση έχει αποδειχθεί από πειραματικές διαδικασίες ότι προσεγγίζει επαρκώς την μηχανική του προβλήματος.

3.3 Σχεδιασμός Ελασμάτων

3.3.1 Επιλογή Υλικού Ελασμάτων

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η πειραματική διαδικασία έπρεπε να γίνει επιλογή υλικού και σχεδιασμός των πλακιδίων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα πλακίδια ήταν αλουμίνιο σειράς 5000 και πιο συγκεκριμένα αλουμίνιο 5052-H32. Η επιλογή αλουμινίου για το υλικό έγινε για δύο λόγους. Αφενός γιατί η προδιαγραφή της κόλλας ορίζει ότι μπορεί να γίνει αποτελεσματική κόλληση μεταξύ αλουμινένιων επιφανειών και αφετέρου για την αποφυγή τυχόν προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν από την κόλληση διαφορετικών μετάλλων στο φούρνο. Έτσι καθώς το honeycomb ήταν από το ίδιο υλικό, είχε σαν αποτέλεσμα όταν η διάταξη τοποθετούνταν στον φούρνο, εξαιτίας του ίδιου βαθμού θερμικής διαστολής, τα δυο μέταλλα της κυψελίδας και των πλακιδίων να διαστέλλονται ή να συστέλλονται στον ίδιο βαθμό. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει χαλάρωση των σφικτήρων και επίσης να μην δημιουργούνται θερμικές παραμένουσες τάσεις. Τέλος οι καλές μηχανικές του ιδιότητες ήταν καθοριστικές στην επιλογή του αλουμινίου σειράς 5052- H32, καθώς συμφωνούσαν με την απαιτήσεις του πειράματος. Παρακάτω παρατίθεται στους πίνακες 3.2,3.3, η σύσταση του συγκεκριμένου υλικού και επιπλέον οι μηχανικές και θερμικές του ιδιότητες.

Συστατικά	Ποσοστά συστατικών στο τελικό μέταλλο
Αλουμίνιο Al	95.7-97.7%
Χρώμιο Cr	0.15-0.35%
Χαλκός Cu	<=0.1%
Σίδηρος Fe	<=0.4%
Μαγνήσιο Mg	2.2-2.8%
Μαγγάνιο Mn	<=0.1%
Πυρίτιο Si	<=0.05%
Ψευδάργυρος Zn	<=0.15%
Λοιπά μέταλλα (ξεχωριστά)	<=0.25%
Λοιπά μέταλλα (συνολικά)	<=0.1%

Πίνακας 3.2 Σύσταση υλικού αλουμινίου 5052-H32 [24]

Ιδιότητα	Τιμή
Όριο διαρροής	193 MPA
Όριο Θραύσης	228 MPA
Μέτρο ελαστικότητας	70.3 GPA
Μέτρο διάτμησης	25.9 GPA
Όριο διάτμησης	138 MPA
Σκληρότητα Brinell	60 HB
Σκληρότητα Vickers	68 HV
Πυκνότητα	2.68 g/m ³
Επιμήκυνση κατά την θραύση	12%
Συντελεστής θερμικής διαστολής	138 W/mK
Θερμική παραμόρφωση (20-100 °C)	23.8 μm/m°C
Θερμική παραμόρφωση (20-200 °C)	24.8 μm/m°C

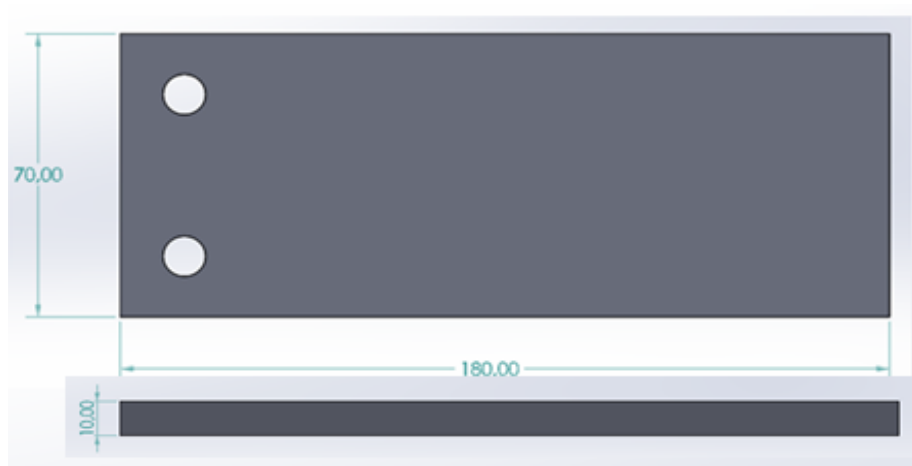
Πίνακας 3.3 Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες υλικού αλουμινίου 5052-H32 [24]

3.3.2 Σχεδιασμός Ελασμάτων

Μετά την επιλογή του υλικού σειρά είχε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας τους. Ο σχεδιασμός έγινε σύμφωνα με τους περιορισμούς που έθεσε η ιδιοσκευηή συγκράτησης του πειράματος. Αρχικά σχεδιάστηκαν πλακίδια πάχους 5mm ορθογωνικής επιφάνειας όπως φαίνεται στην εικόνα 3-8. Στην συνέχεια διαπιστώθηκε ότι το παραπάνω πάχος πλακιδίων δεν εξασφάλιζε την απαραίτητη καμπτική δυσκαμψία ώστε να παραλάβει την απαιτούμενη θλιπτική πίεση για την κόλληση στο φούρνο θερμικών κατεργασιών, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ανεπιθύμητες καμπτικές παραμορφώσεις. Προκειμένου να υπάρχει καλύτερη κατανομή της πίεσης κατά την διάρκεια της σύσφιξης, αυτό το πάχος διαμορφώθηκε στα 10mm, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-9. Ένας άλλος παράγοντας που λήφθηκε υπόψιν κατά τον σχεδιασμό, ήταν κατά την φόρτιση του δοκιμίου, οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις να διέρχονται όσο το δυνατόν πιο κοντά από το κέντρο βάρους της διάταξης.



Εικόνα 3-8 Γεωμετρία πλακιδίου αλουμινίου 5052-H32 πάχους 5mm.



Εικόνα 3-9 Γεωμετρία πλακιδίου αλουμινίου 5052-H32 πάχους 10mm.

3.4 Επιλογή κόλλας

Μετά την επιλογή και σχεδιασμό των πλακιδίων για το πείραμα, έπρεπε να γίνει επιλογή της κόλλας η οποία θα συνδέσει την τελική διάταξη προκειμένου να είναι έτοιμη για την πειραματική διαδικασία. Μελετώντας προηγούμενες διπλωματικές εργασίες και μελέτες που είχαν γίνει πάνω στην συγκεκριμένη διάταξη, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα φιλμ εποξικής κόλλας έναντι της εποξικής κόλλας δύο συστατικών Araldite 2011. Αυτή η επιλογή έγινε αρχικά έτσι ώστε να υπάρχει ένα ομοιόμορφο στρώμα κόλλας σε ολόκληρη την επιφάνεια και έπειτα λόγω του τρόπου εφαρμογής του φιλμ κόλλας, να συστηματοποιήσουμε την διαδικασία και να γίνεται πιο εύκολα, πιο γρήγορα και μειώνοντας τις πιθανότητες λάθους στο ελάχιστο. Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν με την χρήση της κόλλας δύο συστατικών κατά την εισχώρηση της κόλλας ήταν ότι αυτή παρεμπόδιζε τα τοιχώματα από το να παραμορφωθούν και δημιουργούσε αλλοίωση στο φαινόμενο της διάτμησης.

Αυτά τα προβλήματα λύθηκαν με την καινούρια κόλλα και τον τρόπο κόλλησης που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία των πειραμάτων. Στην αρχή έγιναν πειράματα με την κόλλα HexBond 609 της εταιρία HEXCEL. Η κόλλα αυτή παραδίδεται από τον κατασκευαστή σε μορφή φιλμ και αποτελείται από την κύρια εποξική κόλλα η οποία περιέχει ίνες κατά το μήκος και πάχος της (εικόνα 3-10), προκειμένου να εξασφαλίσει ομοιόμορφο πάχος σε όλη την επιφάνεια της κόλλας και δύο προστατευτικές στρώσεις πάνω και κάτω για να αποτρέψουν την αλλοίωση της.



Εικόνα 3-10 Δομή κόλλας Hexbond 609 (Μορφολογία ινών)[25]

Στο πάνω μέρος είναι τοποθετημένο ένα στρώμα πολυαιθυλενίου που δεν αφήνει την κόλλα να αλληλοεπιδράσει με το περιβάλλον και στο κάτω μέρος ένα προστατευτικό χαρτί που διευκολύνει την διαχείριση της. Επίσης για να μελετηθεί και η επίδραση του τύπου κόλλας στα αποτελέσματα των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε και φιλμ κόλλας χωρίς ενίσχυση η Redux 312 [26] της εταιρίας HEXCEL. Η διαφορά της από την προηγούμενη ήταν ότι δεν είχε τις ίνες μέσα στην δομή του κυρίως υλικού. Και σε αυτή την περίπτωση είχε τα δύο προστατευτικά στρώματα του πολυαιθυλενίου και του χαρτιού.

Προκειμένου οι κόλλες να λάβουν τις βέλτιστες ιδιότητες τους κατά την διάρκεια της κόλλησης έπρεπε να εφαρμοστεί πίεση στην επιφάνεια κόλλησης ίση με $140-350 \text{ KN/m}^2$. Αυτή η πίεση εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού το οποίο προβλέπεται να κολληθεί και τις συνθήκες του πειράματος. Παραπάνω πληροφορίες για τον τρόπο εφαρμογής της πίεσης θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο 3.4.1. Η θερμική κατεργασία της κόλλησης γίνεται με την ταυτόχρονη εξάσκηση της πίεσης μέσα στον φούρνο θερμικών κατεργασιών. Ο κατασκευαστής ορίζει ότι η βέλτιστη θερμική κατεργασία που πρέπει να γίνει στην διάταξη είναι στους 120°C για 60min. Περαιτέρω πληροφορίες θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 3.4.2. Ενδεικτικές μηχανικές ιδιότητες της κόλλας δίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Test	Environmental Conditioning	Test Temperature °C	HexBond™ 609 200g/m ² Supported	HexBond™ 609 300g/m ² Supported	HexBond™ 609U 300g/m ² Unsupported
Lap Shear Strength (MPa)	None	22	31	33	43
		50	31	31	
		80		24	
		100		15	
Bell Peel (N/25mm)	None	22	102	76	75
		50		110	
		80		114	
		100		136	
Climbing Drum Peel (Lower skin) (N/76mm)	None	22	141	193	308
		50		250	
		80		250	
		100		288	
Flatwise Tensile (MPa)	None	22	4.5	7	6

Πίνακας 3.4 Μηχανικές ιδιότητες εποξικής κόλλας HexBond 609.[25]

Test	Test Temperature °C	Redux® 312 70g/m ²	Redux® 312 100g/m ²	Redux® 312 150g/m ²	Redux® 312 300g/m ²	Redux® 312/5
Lap Shear Strength MPa	22	37	39	42	43	38
		33	32	38	39	29
		27	32	35	30	
				17		
Bell Peel N/25mm	22		230	245	230	245
Climbing Drum Peel N/76mm	22		190	350	710	510
Flatwise Tensile MPa	22		5.4	7.0	9.1	8.3

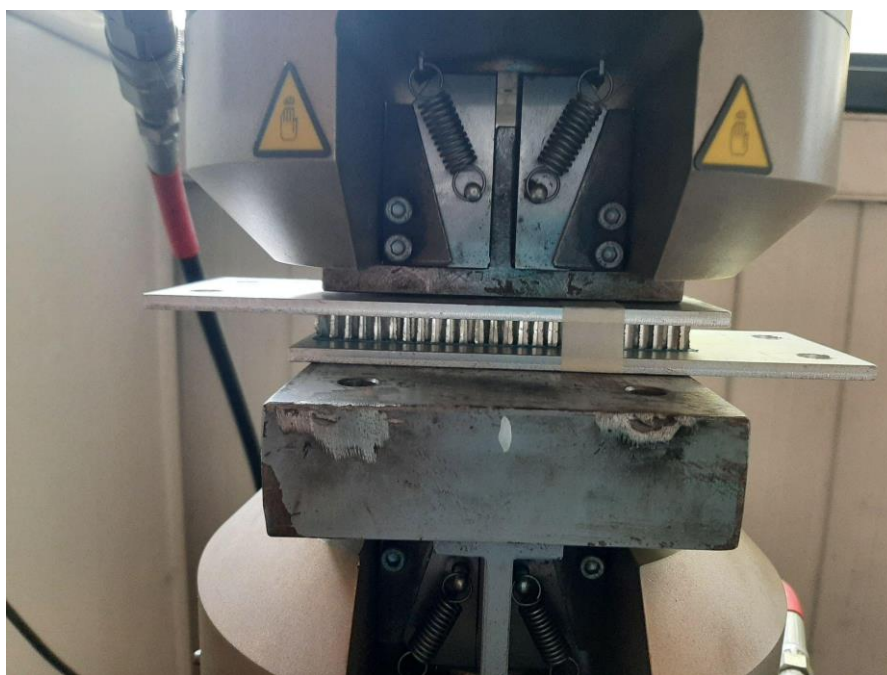
Πίνακας 3.5 Μηχανικές ιδιότητες εποξικής κόλλας Redux 312.[26]

Παρατηρείται ότι η δεύτερη κόλλα έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από την πρώτη, όμως και οι δύο καλύπτουν τις απαιτήσεις του πειράματος.

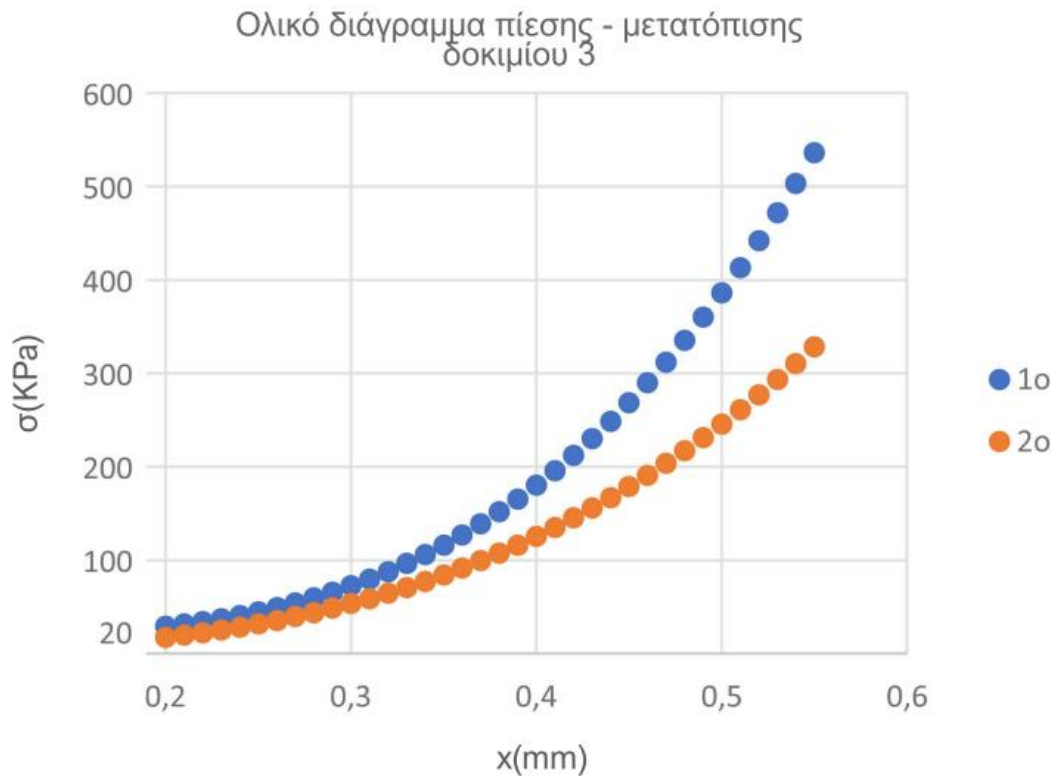
3.4.1 Υπολογισμός απαιτούμενης πίεσης στα δοκίμια

Για τον υπολογισμό της πίεσης στην διαδικασία κόλλησης χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εφελκυσμού - θλίψης. Προετοιμάστηκε δοκίμιο honeycomb, το οποίο κολλήθηκε με την βοήθεια φιλμ κόλλας με τις πλάκες αλουμινίου, και η διάταξη τοποθετήθηκε στην μηχανή (βλέπε εικόνα 3-11). Η προδιαγραφή της κόλλας ορίζει ότι η ελάχιστη πίεση είναι 140 KN/m^2 και η μέγιστη 350 KN/m^2 προκειμένου να γίνει η σωστή κόλληση των πλακιδίων. Με βάση το εμβαδόν του honeycomb δοκιμίου, υπολογίστηκε η δύναμη θλίψης που πρέπει να ασκηθεί στο σύστημα honeycomb-πλακών από την μηχανή. Έχοντας υπολογίσει την απαιτούμενη δύναμη προκειμένου η πίεση να φτάσει στα όρια που ορίζει ο κατασκευαστής, τέθηκε η μηχανή να εφαρμόσει θλιπτική δύναμη μέχρι αυτή την τιμή.

Από τα διαγράμματα θλιπτικής δύναμης - μετατόπισης που προέκυψαν για δύο διαφορετικά δοκίμια, και φαίνονται στο διάγραμμα 1, προσδιορίστηκε η απαιτούμενη θλιπτική μετατόπιση σε mm για την εφαρμογή της δύναμης που αντιστοιχεί σε κάθε επιφάνεια δοκιμίου.



Εικόνα 3-11 Πείραμα μέτρησης παραμόρφωσης δοκιμίων.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 3, ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.

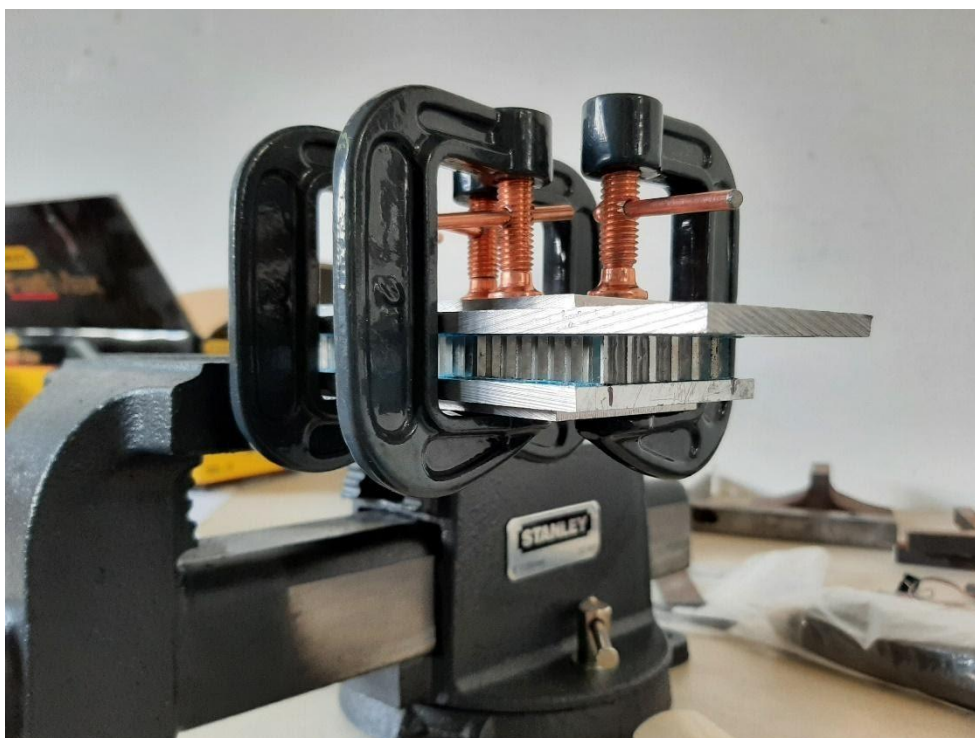
Οι τιμές βύθισης που προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα παρατίθενται στο διάγραμμα 1. Τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν στην μηχανή εφελκυσμού-θλίψης ήταν μικρότερου μεγέθους επιφάνειας από τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα υπόλοιπα πειράματα, έτσι προκειμένου να εφαρμοστεί η απαιτούμενη πίεση επιλέχθηκε να μειωθεί η βύθιση έναντι αυτής που μας δείχνει το διάγραμμα 1. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη ήταν η επιφάνεια του honeycomb υλικού, τόσο μικρότερη παραμόρφωση παρουσίαζε η διάταξη. Επίσης παρατηρήθηκαν τσαλακώματα στην πλαϊνή επιφάνεια του honeycomb σε βύθισης κοντά στα 0,5 mm. Έτσι ορίστηκε ότι, η απαιτούμενη πίεση που χρειάζεται να ασκηθεί στο δοκίμιο για να κολλήσει η διάταξη μεταξύ της , προκύπτει από παραμόρφωση της sandwich διάταξης κοντά στα 0,4 mm. Με την επιβολή παραπάνω βύθισης και κατά συνέπεια παραπάνω πίεσης, παρατηρούνταν βλάβες στο εσωτερικό και στα τοιχώματα του honeycomb.

3.4.2 Σύστημα Εξάσκησης Πίεσεως.

Για να εφαρμοστεί η απαιτούμενη πίεση που προέκυψε από το παραπάνω διάγραμμα στα δοκίμια honeycomb αρχικά δοκιμάστηκε μια διάταξη με κοχλίες (εικόνα 3-12). Παρατηρήθηκε ότι με αυτόν τον τρόπο η πίεση δεν είχε ομοιόμορφη κατανομή σε όλη την επιφάνεια των πλακιδίων και φάνηκε να υπάρχουν αποκολλήσεις τις κόλλας σε κάποια σημεία. Έτσι αυτή η τακτική εγκαταλείφθηκε και ένας διαφορετικός τρόπος σύσφιξης με σφινκτήρες πήρε την θέση της. Με αυτό τον τρόπο σύσφιξης λύθηκε το πρόβλημα των αποκολλήσεων και υπήρχε καλύτερη κατανομή της πίεσης στα δοκίμια. Χρησιμοποιήθηκαν εμπορικοί σφινκτήρες των οποίων το σώμα σύσφιξης ήταν κατασκευασμένο από χάλυβα και το στέλεχος τους από χαλκό. Λόγω του περιορισμού που υπήρχε στο χώρο που δημιουργούσε ο φούρνος για την θερμική κατεργασία, έγινε μετατροπή τους προκειμένου να εισέρχονται σε αυτόν χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα. Το στέλεχος του σφινκτήρα κόπηκε και προκειμένου να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η σύσφιξη του, δημιουργήθηκε μια οπή στο κάτω μέρος του στελέχους για να διευκολύνει την διαδικασία. Για να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις σφινκτήρες εναλλάξ ο ένας με τον άλλο οι οποίοι κάλυπταν όλο το μήκος των πλακιδίων. Η διάταξη τους φαίνεται στην εικόνα 3-13. Η απαιτούμενη τιμή της βύθισης (μέση τιμή) ελέγχθηκε με χρήση οργάνων όπως το μικρόμετρο και το παχύμετρο και οι μετρήσεις ελήφθησαν σε διαφορετικές θέσεις του honeycomb, ώστε να προκύψει σύγκριση με την μέση τιμή του διαγράμματος.



Εικόνα 3-12 Μέθοδος σύσφιξης της διάταξης με κοχλίες.



Εικόνα 3-13 Μέθοδος σύσφιξης της διάταξης με σφιγκτήρες.

3.4.3 Θερμική Κατεργασία Διάταξης Πειράματος.

Με την ολοκλήρωση της εφαρμογής της απαραίτητης πίεσης στην διάταξη, έπρεπε να επέλθει η θερμική κατεργασία των δοκιμών έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η κόλληση. Ο κατασκευαστής ορίζει ότι η βέλτιστη θερμική γήρανση που πρέπει να πραγματοποιηθεί είναι στους 120°C για 60min για την κόλλα HexBond 609 και για την κόλλα Redux 312, 120°C για 30 min. Στον πίνακα 3.6 φαίνονται εναλλακτικές επιλογές για την διάρκεια και την θερμοκρασία της θερμικής κατεργασίας όπως τις δίνει ο κατασκευαστής για την κόλλα HexBond 609.

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

Πίνακας 3.6 Παράμετροι θερμικής κατεργασίας. [26]

Η θερμική κατεργασία των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στον ατμοσφαιρικό φούρνο του Εργαστηρίου Του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ο φούρνος αυτός παρατίθεται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3-14 Ατμοσφαιρικός Φούρνος

Η προδιαγραφή της κόλλας ορίζει ότι η διάταξη με τους σφιγκτήρες πρέπει να εισέλθει στον φούρνο από θερμοκρασία δωματίου και εφόσον φτάσει στην θερμοκρασία των 120 °C αρχίζει να προσμετράτε ο χρόνος για την γήρανση των δοκιμίων. Ο ρυθμός θέρμανσης από την θερμοκρασία δωματίου μέχρι την απαιτούμενη θερμοκρασία, πρέπει να είναι 5°C/min προκειμένου να πραγματοποιηθεί σωστά η διαδικασία της κόλλησης. Εφόσον περάσει το χρονικό διάστημα που απαιτείται, η διάταξη αφήνεται να φτάσει ξανά σε θερμοκρασία δωματίου για να αφαιρεθεί η πίεση από τους σφιγκτήρες. Συντομότερη αφαίρεση της πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε ελλιπή κόλληση των δοκιμίων, είτε ολοκληρωτική αστοχία της σύνδεσης.

3.5 Προετοιμασία Δοκιμών

3.5.1 Διαδικασία κόλλησης Δοκιμών

Για την κόλληση των δειγμάτων honeycomb στις αλουμιένιες πλάκες ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

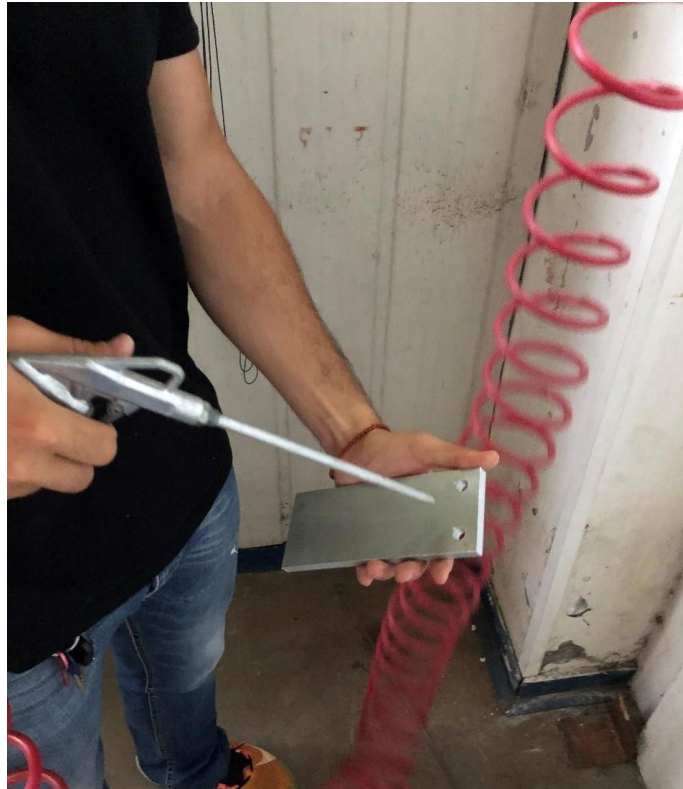
Βήμα 1^ο: Καθαρίστηκαν οι πλάκες αλουμινίου με ακετόνη και αφέθηκαν να στεγνώσουν.

Βήμα 2^ο: Οι πλάκες τρίφθηκαν με γυαλόχαρτο p240 ώστε να αφαιρεθεί το φιλμ του οξειδωμένου στρώματος που βρίσκεται στην επιφάνεια των πλακών. Το φιλμ αυτό ενώνεται με την επιφάνεια της κόλλας και δημιουργείται ένα ψαθυρό στρώμα, το οποίο με την επιβολή του φορτίου αποκολλάται και παρασύρεται πανω στην επιφάνεια του μετάλλου, υποβαθμίζοντας την ποιότητα της κόλλησης και αντίστοιχα την αντοχή της.



Εικόνα 3-15 Καθαρισμός Πλακών Αλουμινίου

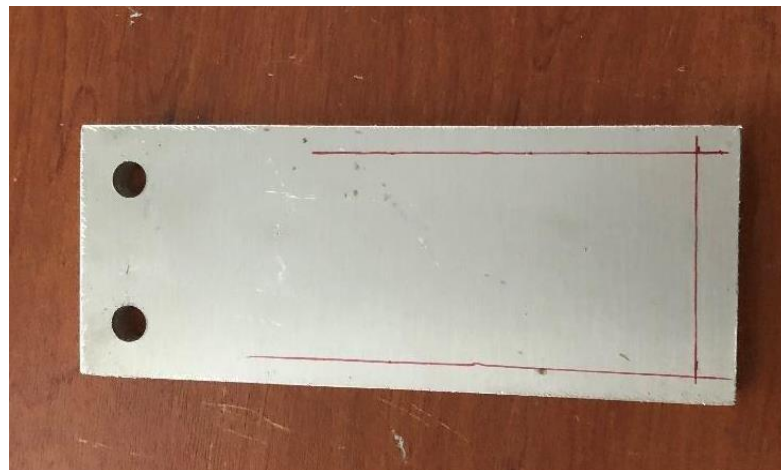
Βήμα 3^ο: Απομακρύνθηκαν τυχόν σκόνες ή ακαθαρσίες με την βοήθεια του πιστολιού αέρος που προέρχονταν από το τρίψιμο ή την αποθήκευση του δοκιμίου



Εικόνα 3-16 Καθαρισμός Πλακών Αλουμινίου με αέρα

Βήμα 4^ο: Υπολογίστηκαν και κόπηκαν δύο ορθογώνια κομμάτια κόλλας με περιθώρια 2,5 mm από τις άκρες της επιφάνειας του honeycomb, έτσι ώστε το υλικό του honeycomb να έχει κόλλα σε όλη την επιφάνεια του.

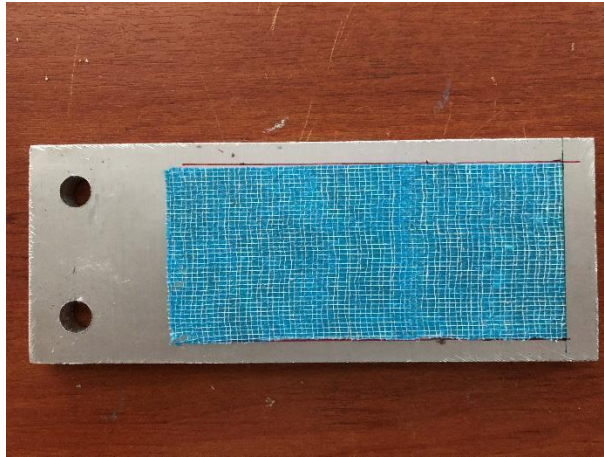
Βήμα 5^ο: Υπολογίστηκαν τα περιθώρια στις πλάκες αλουμινίου για κεντραρισμένη τοποθέτηση της κόλλας. Σημειώθηκαν και μαρκάριστηκαν πάνω στις πλάκες. Τα περιθώρια είναι 2,5 mm από τις ελεύθερες επιφάνειες των πλακών.



Εικόνα 3-17 Διαγραμμίσεις στην Πλάκα αλουμινίου

Βήμα 6^ο: Αφαιρέθηκε το προστατευτικό χαρτί από την κόλλα και προσκολλήθηκε από την συγκεκριμένη επιφάνεια στην πλάκα αλουμινίου.

Βήμα 7^ο: Υπολογίστηκαν τα περιθώρια για την τοποθέτηση και την ευθυγράμμιση του honeycomb δοκιμίου.



Εικόνα 3-18 Τοποθέτηση φιλμ Κόλλας

Βήμα 8^ο: Αφού αφαιρέθηκε η πράσινη προστατευτική ρητίνη στην πάνω επιφάνεια της κόλλας, η οποία βρίσκεται εκεί για προστασία της κόλλας από το περιβάλλον, τοποθετήθηκε στο κέντρο του honeycomb.

Βήμα 9^ο: Αφού κολλήθηκε το honeycomb με την κόλλα στην 1^η πλάκα, μεταφέρθηκαν στην μέγγενη και τοποθετήθηκε η δεύτερη πλάκα με την κόλλα από πάνω. Χρησιμοποιήθηκαν οδηγοί ώστε οι πλάκες να είναι σωστά ευθυγραμμισμένες .



Εικόνα 3-19 Δύο πλάκες αλουμινίου και το honeycomb στο εσωτερικό τους

Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία σειρά έχει η εφαρμογή της απαιτούμενης πίεσης που ορίζεται από την προδιαγραφή της κόλλας ώστε να μπει στον φούρνο για να ολοκληρωθεί η κόλληση .

Βήμα 10^ο: Τοποθετούνται στο δοκίμιο 4 σφικτήρες, δύο από την μία πλευρά και δύο από την άλλη(βλέπε Εικόνα 3-13). Με την βοήθεια των σφικκτῆρων γίνεται εφαρμογή πίεσης ώστε να εφαρμοστεί συνολική βύθιση 0,4 mm όπως φαίνεται απο το διάγραμμα 1 για να μας δώσει την απαιτούμενη πίεση. Η απαιτούμενη βύθιση επιτυγχάνεται παίρνοντας μετρήσεις με το παχύμετρο καθόλη την διάρκεια της σύσφιξης ώστε να ασκηθεί η απαιτούμενη πίεση και να είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια των πλακών και κατά συνέπεια της κόλλας .

Βήμα 11^ο: Το δοκίμιο μεταφέρεται στο φούρνο ώστε να γίνει η θερμική κατεργασία της κόλλας. Το δοκίμιο παραμένει στον φούρνο στους 120°C για μία ώρα όπως ορίζει η βέλτιστη διαδικασία γήρανσης της κόλλας απο την προδιαγραφής της [30].

Βήμα 12^ο: Τέλος, το δοκίμιο αφαιρείται από τον φούρνο χωρίς να αφαιρεθεί η ασκούμενη πίεση από τους σφικκτῆρες , ώστε να έρθει σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά από αυτή την διαδικασία το δοκίμιο είναι έτοιμο να τοποθετηθεί στην ιδιοσυσκευή και να ξεκινήσει το πείραμα. Ο ατμοσφαιρικός φούρνος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-14.

3.5.2 Συνθήκες κόλλησης δοκιμίων

Η δημιουργία κατάλληλης κόλλησης για τα δοκίμια honeycomb μεταξύ των μεταλλικών πλακών, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την διεξαγωγή μιας αξιόπιστης μηχανικής δοκιμής διάτμησης. Ταυτόχρονα, η επίτευξη κατάλληλης κόλλησης δεν είναι απλό ζήτημα, καθώς εξαρτάται από συνδυασμό συνθηκών, που περιλαμβάνουν:

- i) την κατάλληλη συντήρηση της κόλλας ώστε να μην υποβαθμίζονται οι ιδιότητές της
- ii) την σωστή ευθυγράμμιση του φιλμ κόλλας πάνω στο έλασμα αλουμινίου
- iii) την εξάσκηση κατάλληλης πίεσης μεταξύ ελασμάτων
- iv) την επιλογή ιδανικών συνθηκών θερμικής κατεργασίας (θερμοκρασίας- χρόνου) για να επιτευχθεί μέγιστη αντοχή της κόλλας

Με βάση τα παραπάνω έγινε μία παραμετρική ανάλυση όπου ελέγχθηκαν σε κάποια δείγματα διαφορετικές συνθήκες πίεσης, θερμικής κατεργασίας και στην συνέχεια ελέγχθηκε η αντοχή της κόλλησης. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι για την επίτευξη μιας κόλλησης μέγιστης αντοχής. Παρακάτω αναφέρονται οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές παραμέτρων και το αποτέλεσμα που προέκυψε σε σχέση με την καταλληλότητα της κόλλησης.

Οι σφικκτῆρες που χρησιμοποιήθηκαν για την σύσφιξη των δομών αλουμινίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-20. Η μορφοποίηση των σφικκτῆρων κρίθηκε απαραίτητη για να καταφέρουν τα δοκίμια να χωρέσουν στον φούρνο του εργαστηρίου.



Εικόνα 3-20 Μορφοποιημένοι σφιγκτήρες

Στο δοκίμιο 5, για να διευκρινιστεί η χαλάρωση των σφιγκτήρων στην σύνθετη δομή αλουμινίου με κυψελοειδή πυρήνα, πραγματοποιήθηκε θέρμανση μέσω του θερμοπίστολου γινόταν από μια απόσταση περίπου 30 cm και οι εκλυόμενη θερμοκρασία ήταν στους 450°C (βλέπε Εικόνα 3-21).



Εικόνα 3-21 Θέρμανσης της διάταξης με θερμοπίστολο για να υπολογιστεί η χαλάρωση των σφιγκτήρων

Με βάση τα πειράματα που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, έγιναν 10 στατικά πειράματα. Χαρακτηριστικά των δοκιμών στα πειράματα που έγιναν αναφέρονται στον πίνακα 3.7.

Δοκίμιο	Διεύθυνση Δοκιμίου	Τύπος Κόλλας	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος Πλακών Αλουμινίου (mm)	Αποτέλεσμα διαδικασίας κόλλησης
1	W	HexBond™ 609	42	55	5	2	Αποτυχημένη
4	W	HexBond™ 609	35	80	10	5	Αποτυχημένη
6	W	HexBond™ 609	50	120	10	5	Αποτυχημένη
7	W	HexBond™ 609	50	120	10	5	Επιτυχημένη
8	W	HexBond™ 609	50	120	10	10	Αποτυχημένη
9	W	HexBond™ 609	50	120	10	10	Επιτυχημένη
10	W	HexBond™ 609	50	120	10	10	Επιτυχημένη
11	W	HexBond™ 609	50	120	10	10	Επιτυχημένη
12	W	Redux 312	50	120	10	10	Επιτυχημένη
13	W	Redux 312	50	120	10	10	Επιτυχημένη

Πίνακας 3.7 Χαρακτηριστικά δοκιμών

Αντίστοιχα, για τα δοκίμια όπου αναφέρθηκαν προηγουμένως παραθέτονται κάποιες τιμές παραμέτρων της διαδικασίας κόλλησης τους.

Δοκίμιο	Θερμοκρασία γήρανσης της κόλλας (°C)	Χρόνος παραμονής της διάταξης στον φούρνο (min)	Βύθιση (mm)	Πίεση σύσφιξης (KPa)	Μήκος φιλμ κόλλας (mm)	Πλάτος φιλμ κόλλας (mm)
1	140	50	-	-	60	47
4	140	50	0,47	350	85	40
6	-	-	0,5	350	125	55
7	138	70	0,41	350	125	55
8	125	82	-	4,58	125	55
9	120	82	0,4	350	125	55
10	127	85	0,41	350	125	55
11	132	72	0,41	350	125	55
12	127	51	0,35	350	125	55
13	134	53	0.31	320-350	125	55

Πίνακας 3.8 Παράμετροι της διαδικασίας κόλλησης για κάθε δοκίμιο

3.6 Χρήση εξοπλισμού για δοκιμές διάτμησης

Τα πειράματα διάτμησης, πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα πειράματα έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C273, ορίζοντας σταθερό ρυθμό μετατόπιση εμβόλου της πρέσας στα πειράματα. Η μηχανή θλίψη/εφελκυσμού που χρειάστηκε για τα πειράματα είναι η MTS 810 Material Test System, η οποία θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.6.1 . Η μηχανή φαίνεται στην Εικόνα 3-22.

Για την μελέτη των δοκιμών που είχαν ετοιμαστεί χρησιμοποιήθηκε η μηχανή του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η μηχανή αυτή είναι η MTS 810 Material Test System. Αποτελεί μηχανή εφελκυσμού- Θλίψης με δυναμοκυψέλη που φτάνει τα 100KN και δυνατότητα αξιοποίησης επιμηκυνσιομέτρου. Η μηχανή του εργαστηρίου παρατίθεται στην εικόνα 3-22.



(a)



(b)

Εικόνα 3-22 Μηχανή εφελκυσμού-Θλίψης MTS 810 Material Test System(a), δοκίμιο πάνω στην μηχανή εφελκυσμού(β).

Το παραπάνω σύστημα μηχανικών δοκιμών έχει δυνατότητα μονοαξονικής επιβολής της δύναμης. Προκειμένου να μελετήσουμε την το πείραμα της διάτμησης χρησιμοποιούμε την ίδια μηχανή σε συνδυασμό με την ιδιοσυσκευή που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.2. Λόγω της γεωμετρίας της διάταξης, των συνθηκών στήριξης και των διαστάσεων των δοκιμών όπως περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM C273 το φαινόμενο του εφελκυσμού μετατρέπεται σε φαινόμενο διάτμησης χωρίς να δημιουργούνται άλλες εντατικές καταστάσεις.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τα πειράματα παρουσιάζεται παρακάτω:

1. Τοποθέτηση και σφίξιμο του δοκιμίου στην ιδιοσυσκευή της εικόνας 3-2.
2. Ευθυγράμμιση της ιδιοσυσκευής ως προς τις αρπάγες της μηχανής.
3. Τοποθέτηση ιδιοσυσκευής στις αρπάγες και κλείδωμα της.
4. Ορισμός παραμέτρων εκτέλεσης δοκιμής διάτμησης σύμφωνα με την προδιαγραφή. Η προδιαγραφή ορίζει μετατόπιση εμβόλου με ταχύτητα 0.5mm/min.
5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

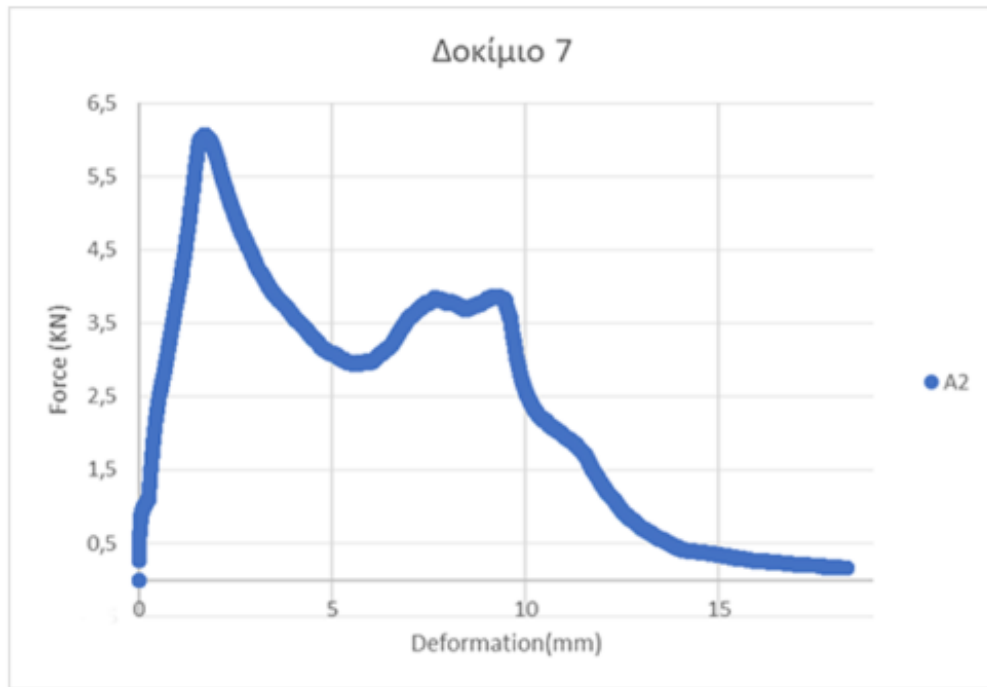
Κεφάλαιο 4. Πειραματικά αποτελέσματα

4.1 Καμπύλες διατμητικής δύναμης- μετατόπισης

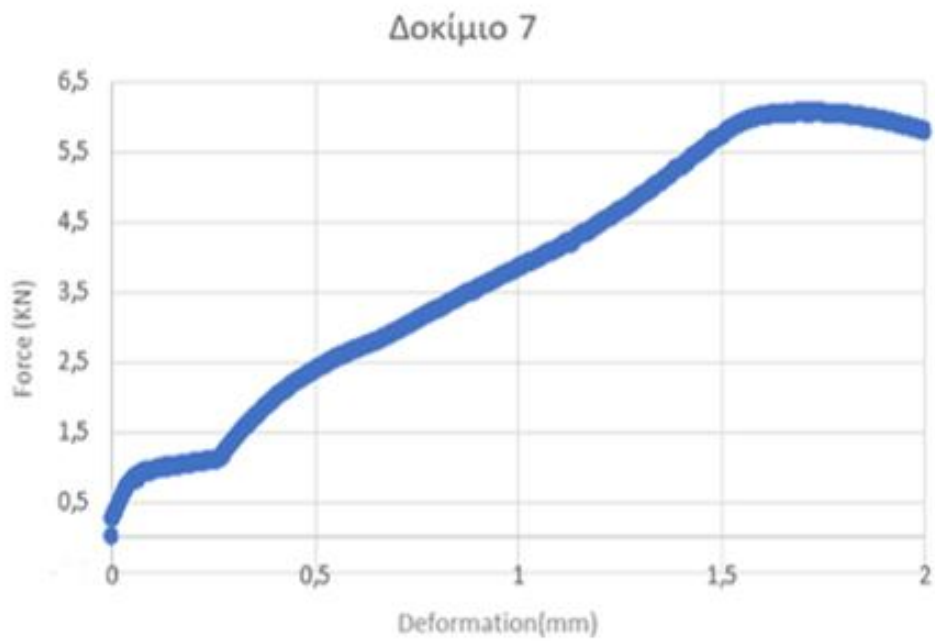
Στα πειράματα διάτμησης έγινε καταγραφή των διαγραμμάτων δύναμης-μετατόπισης των δοκιμίων μέχρι την ολοκληρωτική αποκόλληση του Honeycomb από την διεπιφάνεια. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης των δοκιμίων στα οποία επιτεύχθηκε ικανοποιητική κόλληση με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 3-7. Από τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης προσδιορίστηκε η μέγιστη ενεργή διατμητική τάση τ_{eff} το μέτρο δυσκαμψίας σε διάτμηση-και η συνολική μετατόπιση στο μέγιστο φορτίο. Η μέγιστη ενεργή διατμητική τάση υπολογίστηκε με βάση την σχέση: $\tau = \frac{P}{L*b} (1) [9]$, όπου P το μέγιστο διατμητικό φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο, L είναι το μήκος του δοκιμίου και b είναι το πάχος του δοκιμίου από τον τύπο (1).

Δοκίμιο 7

Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η καμπύλη δύναμης- μετατόπισης σε διάτμηση του δοκιμίου No 7 με παραμέτρους κόλλησης που παρατίθενται στον πίνακα 3-7. Το διάγραμμα παρουσιάζει μια μικρή γραμμική συμπεριφορά μέχρι το φορτίο του 1 kN, όπου εμφανίζεται ένα «γόνατο» που συνοδεύεται με μία μικρή αλλαγή στην κλίση, και στην συνέχεια συνεχίζεται η γραμμική συμπεριφορά μέχρι το φορτίο των 2,5 kN. Από εκεί και πέρα έχουμε μία περαιτέρω μείωση της κλίσης μέχρι το μέγιστο φορτίο των 6 kN, όπου ακολουθεί πτώση της δύναμης μέχρι την μετατόπιση των 5mm. Το φορτίο μετά την τιμή των 5 mm ανεβαίνει ξανά και στην συνέχεια πέφτει μέχρι να φτάσει σε μηδενική τιμή μετά τα 18mm μετατόπισης.



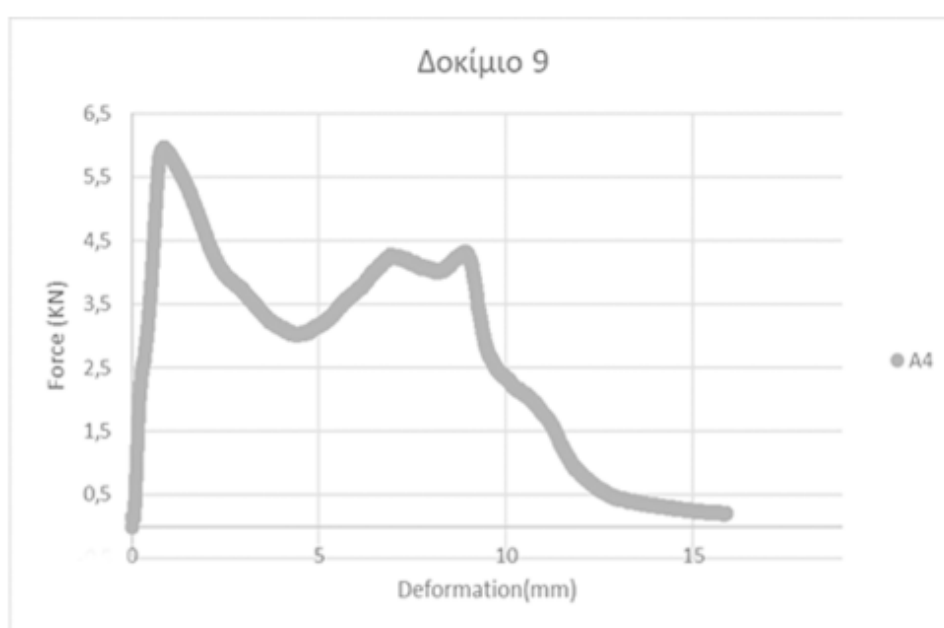
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 7.



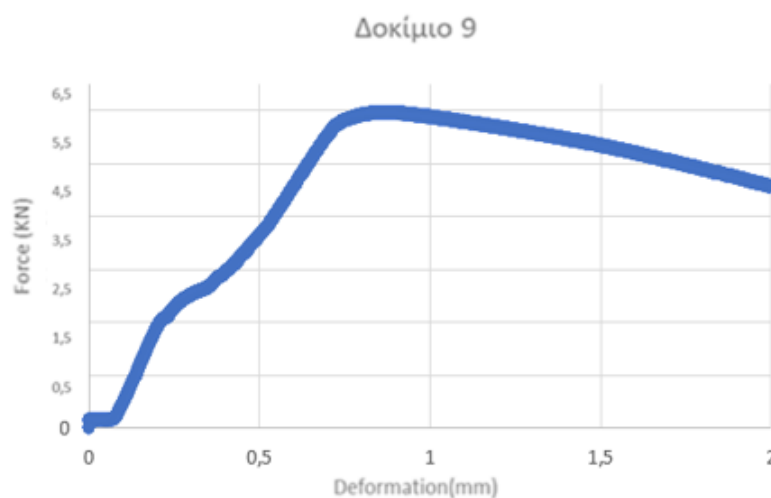
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 7 (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2ΜΜ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)

Δοκίμιο 9

Στο διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η καμπύλη δύναμης- μετατόπισης σε διάτμηση του δοκιμίου Νο 9. Το διάγραμμα παρουσιάζει μια μικρή καθυστέρηση στην επιβολή του φορτίου (βλέπε διάγραμμα 5) εξαιτίας της αρχικής σύσφιξης του δοκιμίου πάνω στην ιδιοσυσκευή. Παρατηρείται κοινή συμπεριφορά με το διάγραμμα 2. Το υλικό έχει κατά προσέγγιση γραμμική συμπεριφορά μέχρι το φορτίο των 3,5 kN. Από αυτό το σημείο και μετά η κλίση της καμπύλης πέφτει μέχρι το μέγιστο φορτίο των 5,95 kN. Κατά την μετατόπιση των 5mm το φορτίο αυξάνεται ξανά και πέφτει μέχρι να φτάσει σε μηδενική τιμή μετά τα 16mm μετατόπισης.



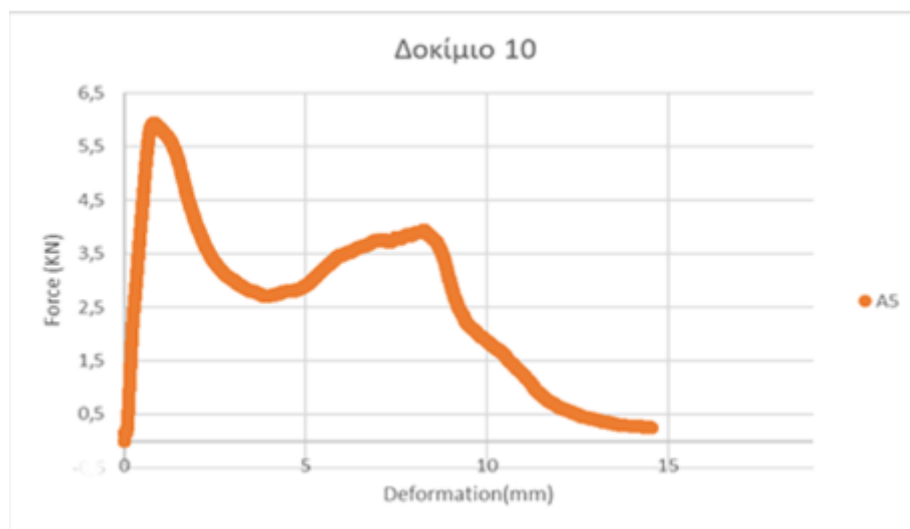
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 9.



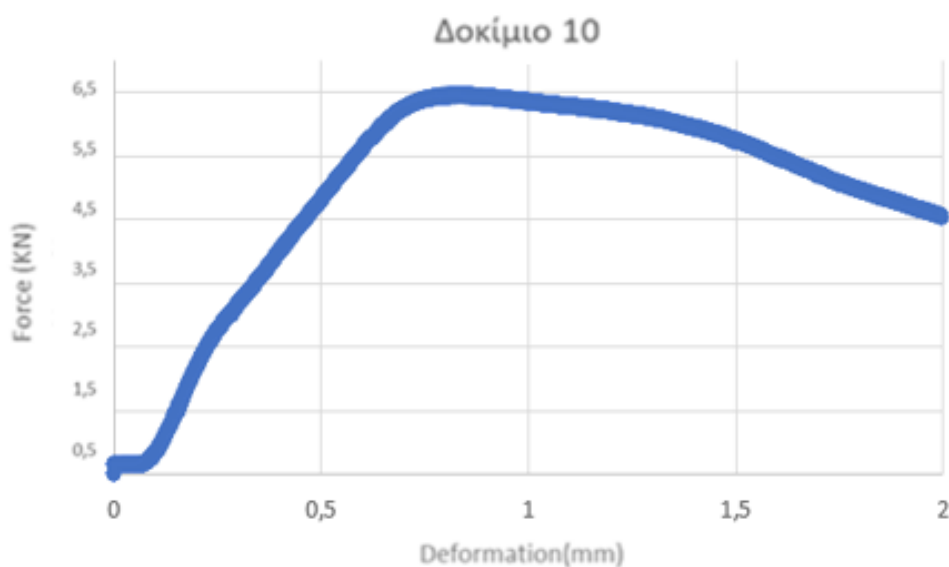
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 9 (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2mm ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)

Δοκίμιο 10

Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η καμπύλη δύναμης- μετατόπισης σε διάτμηση του δοκιμίου Νο 10 με παραμέτρους κόλλησης που παρατίθενται στον πίνακα 3-7. Και αυτό το διάγραμμα παρουσιάζει μια μικρή καθυστέρηση στην επιβολή του φορτίου (βλέπε διάγραμμα 7) εξαιτίας της αρχικής σύσφιξης του δοκιμίου πάνω στην ιδιοσυσκευή. Το «γόνατο» εμφανίζεται πάλι στα 2,5 kN και συνεχίζεται η γραμμική συμπεριφορά μέχρι το φορτίο των 3,5 kN. Το μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται στα 5,9 kN, όπου μειώνεται μέχρι να φτάσει στα 5 mm μετατόπισης. Έπειτα το φορτίο αυξάνεται ξανά και μειώνεται μέχρι να φτάσει σε μηδενική τιμή μετά τα 14,5 mm μετατόπισης.



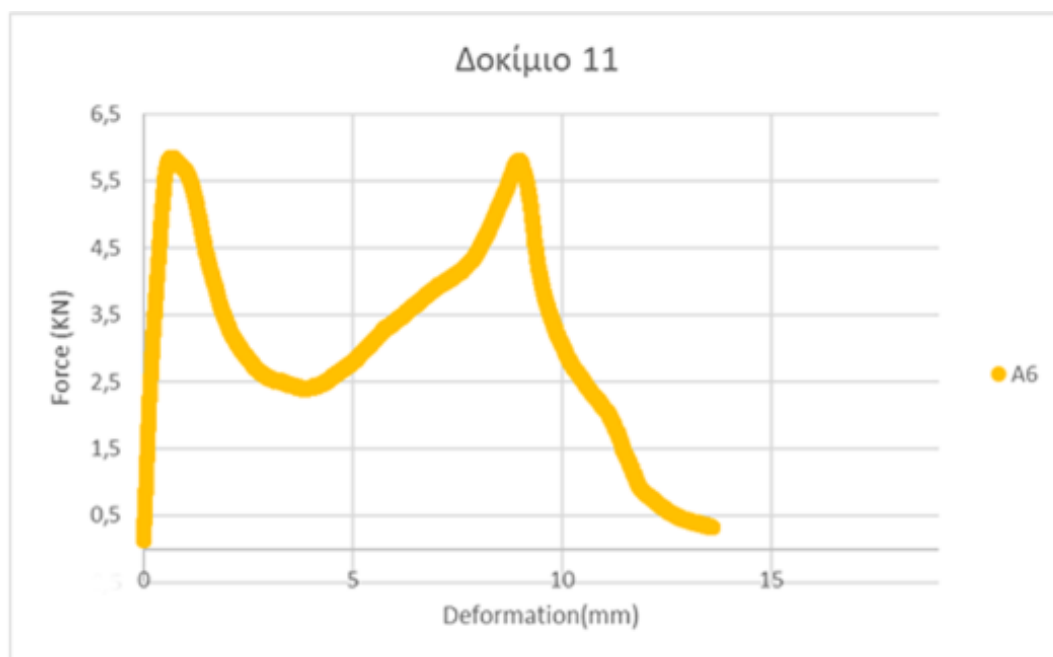
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 10.



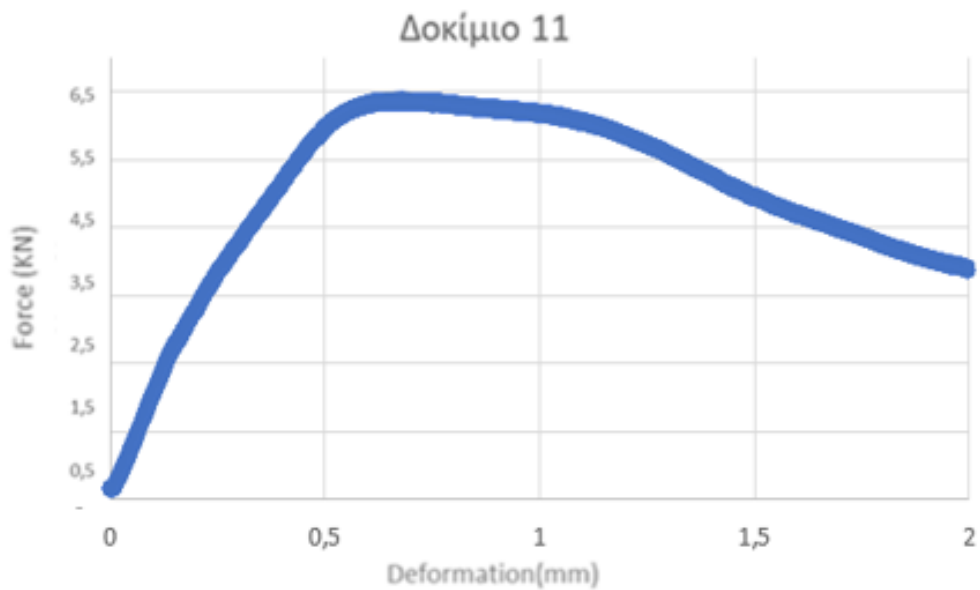
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 10 (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2 ΜΜ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)

Δοκίμιο 11

Στο διάγραμμα 8 παρουσιάζεται η καμπύλη δύναμης- μετατόπισης σε διάτμηση του δοκιμίου Νο 11 με παραμέτρους κόλλησης που παρατίθενται στον πίνακα 3-7. Το διάγραμμα παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά μέχρι το φορτίο του 2,2 kN, όπου σε αυτή την περίπτωση το «γόνατο» που σχηματίζεται είναι ελάχιστο. Φαίνεται η συμπεριφορά του δοκιμίου αυτού να είναι πιο γραμμική, με την αλλαγή της κλίσης να ελαχιστοποιείται. Το μέγιστο φορτίο που παρατηρείται είναι στα 5,85 kN, όπου ακολουθεί πτώση της δύναμης μέχρι την μετατόπιση των 5mm. Το φορτίο μετά την τιμή των 5 mm ανεβαίνει ξανά και στην συνέχεια πέφτει μέχρι να φτάσει σε μηδενική τιμή μετά τα 13,5mm μετατόπισης.



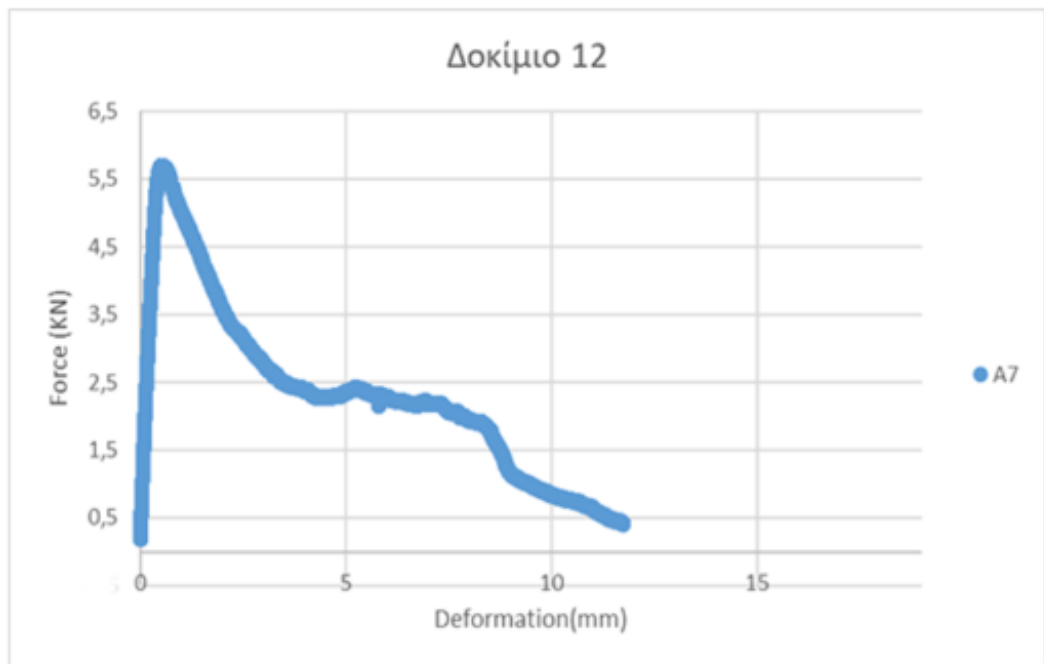
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 11.



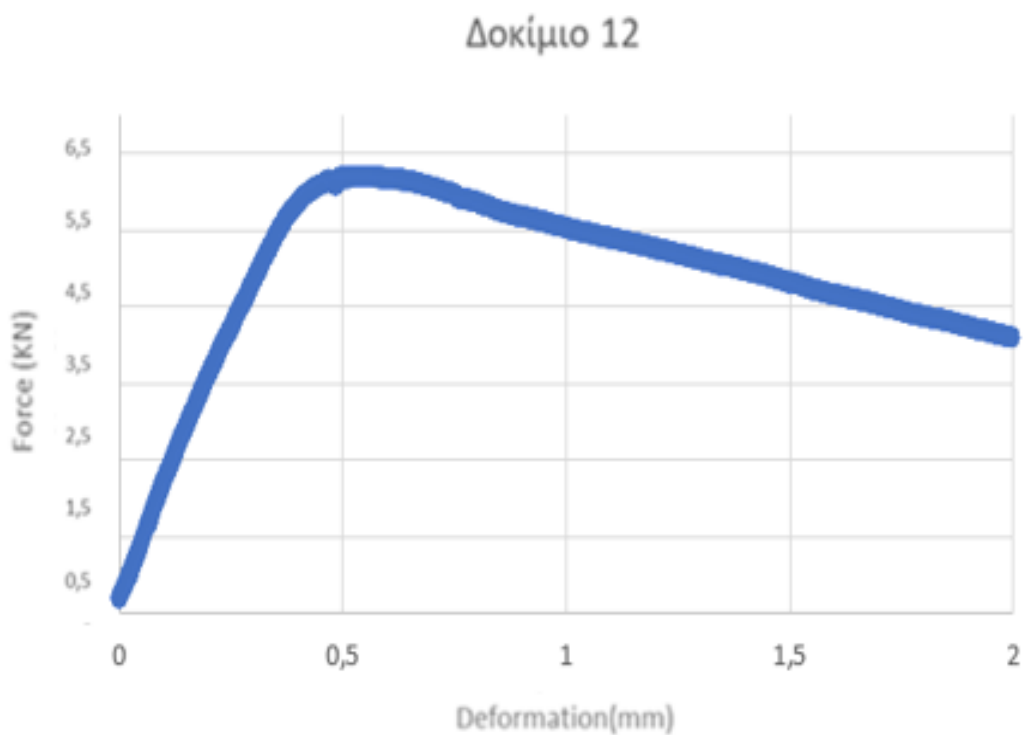
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 11 (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2ΜΜ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)

Δοκίμιο 12

Στο διάγραμμα 10 παρουσιάζεται η καμπύλη δύναμης- μετατόπισης σε διάτμηση του δοκιμίου Νο 12. Το διάγραμμα παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά μέχρι το φορτίο του 3 KN όπου σε εκείνο το σημείο παρατηρείται ελάχιστη αλλαγή της κλίσης της ευθείας . Μετά την μικρή αλλαγή της κλίσης αυτής πάλι η συμπεριφορά φαίνεται να είναι γραμμική μέχρι το μέγιστο φορτίο που παρατηρείται να είναι στα 5,7 KN, όπου ακολουθεί πτώση της δύναμης μέχρι την τελική μετατόπιση των 12mm.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 12.

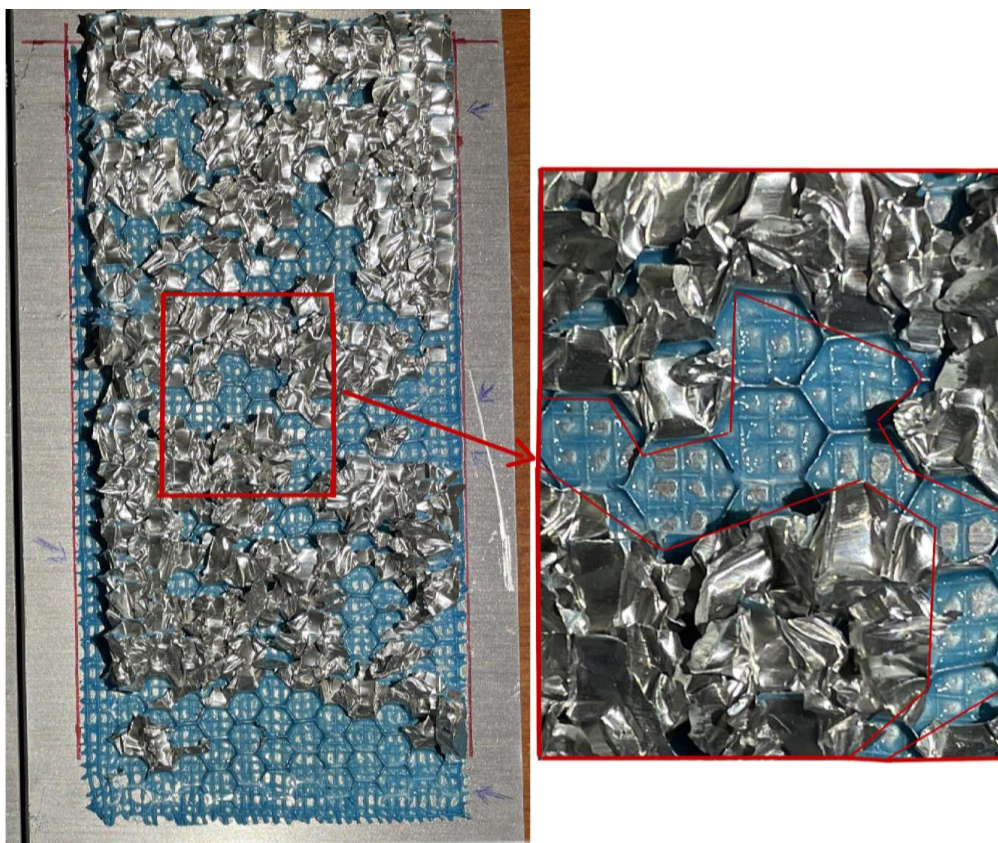


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 12 (ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2ΜΜ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ)

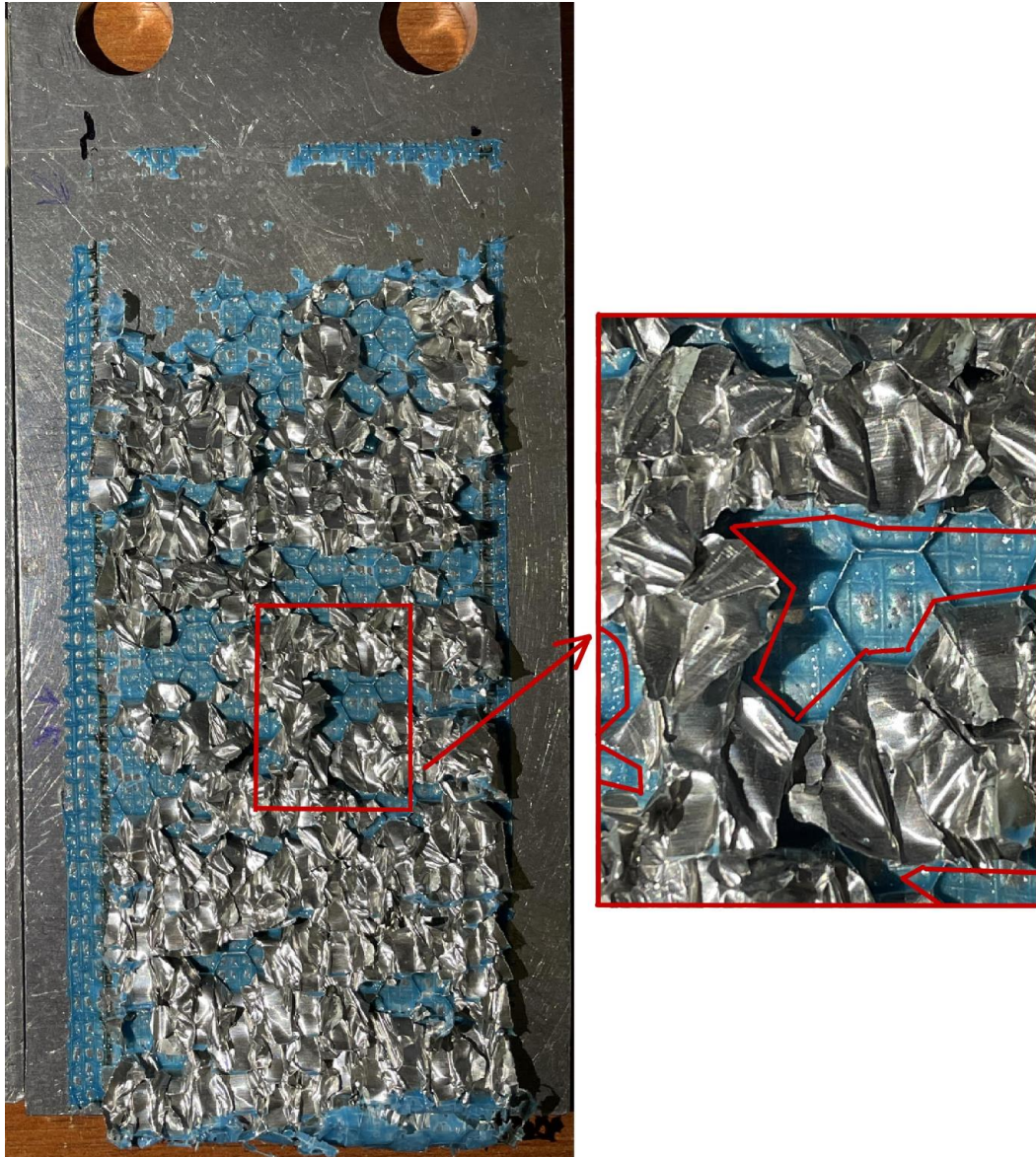
4.2 Μακροσκοπικές παρατηρήσεις επιφανειών αστοχίας.

Σε αυτή την ενότητα εξάγονται κάποιες βασικές παρατηρήσεις για τον τρόπο αστοχίας των κυψελών του πυρήνα και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των επιφανειών θραύσης των στατικών πειραμάτων διάτμησης. Τα δοκίμια που ελέγχθηκαν μακροσκοπικά είναι τα 7,9,10,11,12.

Οι επιφάνειες αστοχίας των δοκιμίων, εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά. Σε όλα τα δοκίμια παρατηρούνται δύο χαρακτηριστικές περιοχές αστοχίας. Στην πρώτη περίπτωση και σε μεγαλύτερο ποσοστό βρίσκονται περιοχές έντονης πλαστικής παραμόρφωσης. Οι περιοχές αυτές αποτελούνται από τοιχώματα κυψελίδων που έχουν υποστεί σημαντική πλαστική παραμόρφωση και φαίνονται να έχουν τσαλακωθεί και παρουσιάζονται στις εικόνες 4-1 και 4-2.

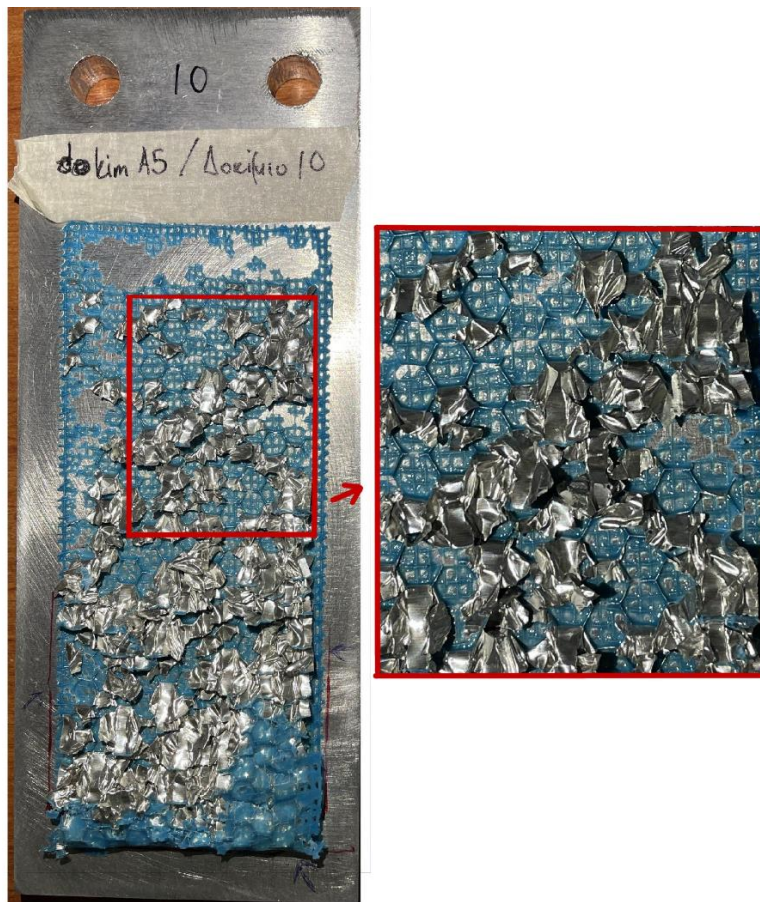


Εικόνα 4-1 Περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης (περιοχή που φαίνεται το αλουμίνιο) του δοκιμίου 9



Εικόνα 4-2 Περιοχή έντονης πλαστικής παραμόρφωσης (περιοχή που φαίνεται το αλουμίνιο) του δοκιμίου 7

Στην δεύτερη περίπτωση, φαίνονται περιοχές μικρής πλαστικής παραμόρφωσης κοντά στην διεπιφάνεια honeycomb όπου φαίνεται η θραύση να προχώρησε πιο ψαθυρά με την εξέλιξη κάποια ρωγμής.

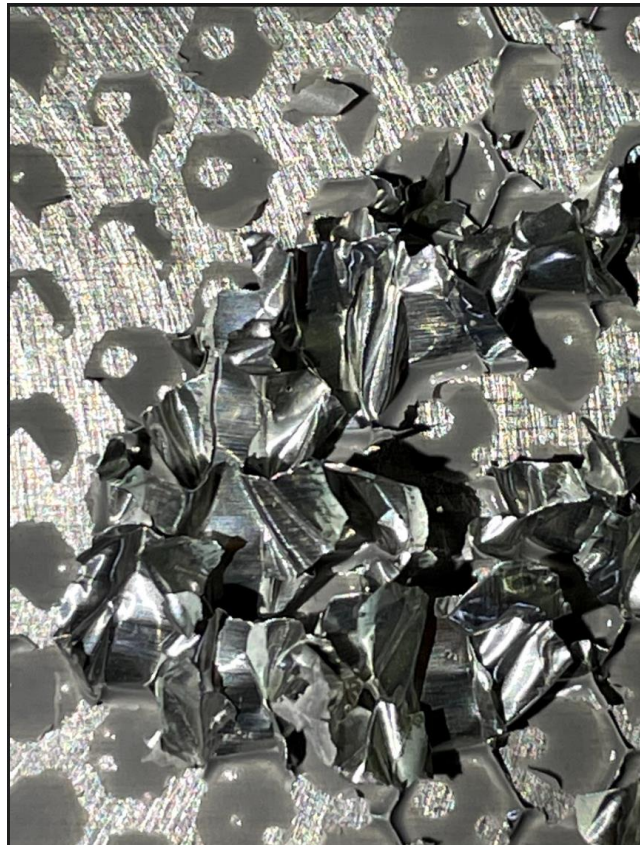


Εικόνα 4-3 Περιοχή μικρής πλαστικής παραμόρφωσης (κομμάτια όπου διακρίνεται το μπλε χρώμα της κόλλας)

Μικρές αποκολλήσεις της κόλλας εμφανίζονται επίσης σε μικρό ποσοστό. Αυτές δεν επηρέασαν σημαντικά το πείραμα, αλλά προήλθαν μετά την ελαστική περιοχή του υλικού του πυρήνα και λόγω δημιουργίας συσσωματώματος των πλευρών των κυψελίδων οι οποίες παρέσυραν και την κόλλα. Μερικές τέτοιες περιοχές παρουσιάζονται στις εικόνες 4-3 και 4-4 στις περιοχές όπου φαίνεται η πλάκα αλουμινίου.

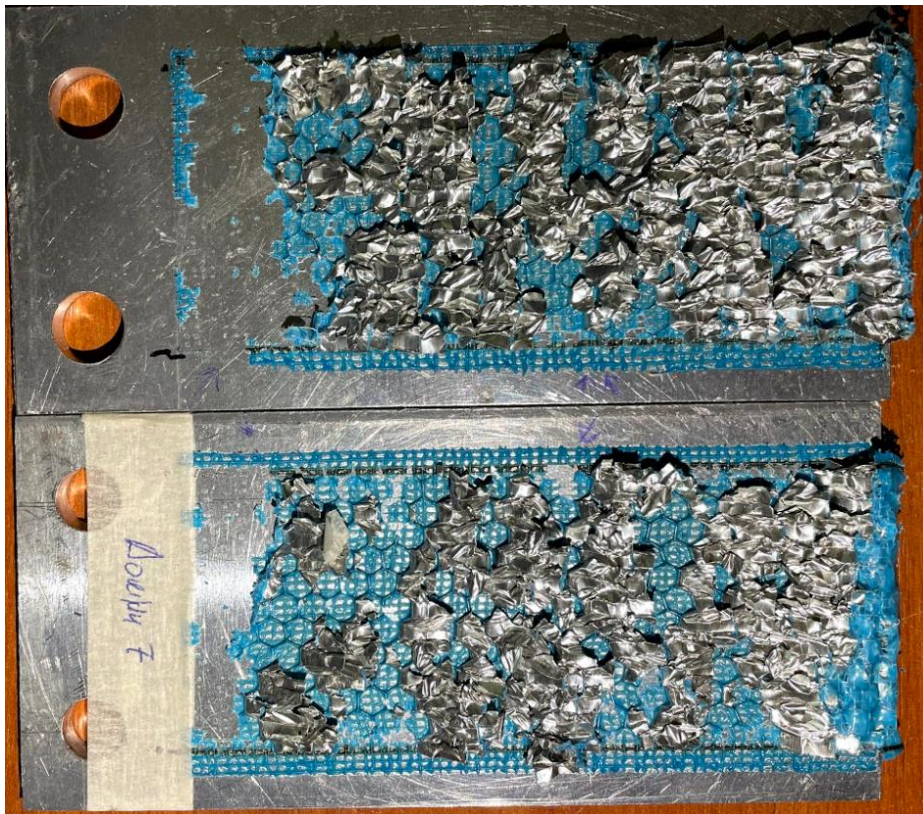


Εικόνα 4-4 Περιοχές με αποκόλληση κόλλας στο δοκίμιο 10

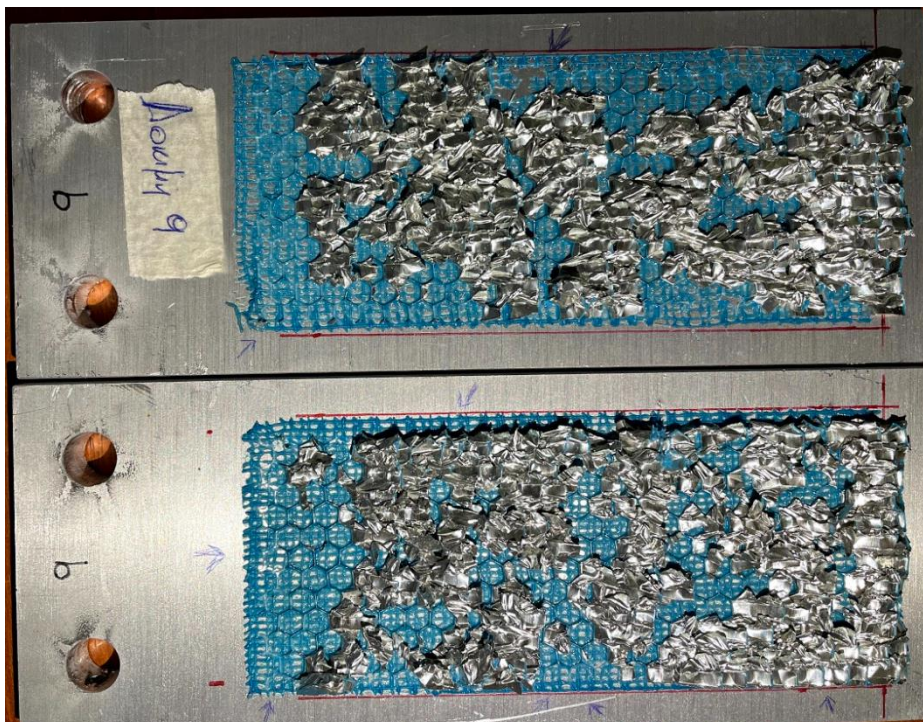


Εικόνα 4-5 περιοχές με αποκόλληση κόλλας στο δοκίμιο 12

Τέλος, παρουσιάζονται οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμών 7,9,10,11,12.



Εικόνα 4-6 επιφάνεια πύρηνα δοκιμίου 7



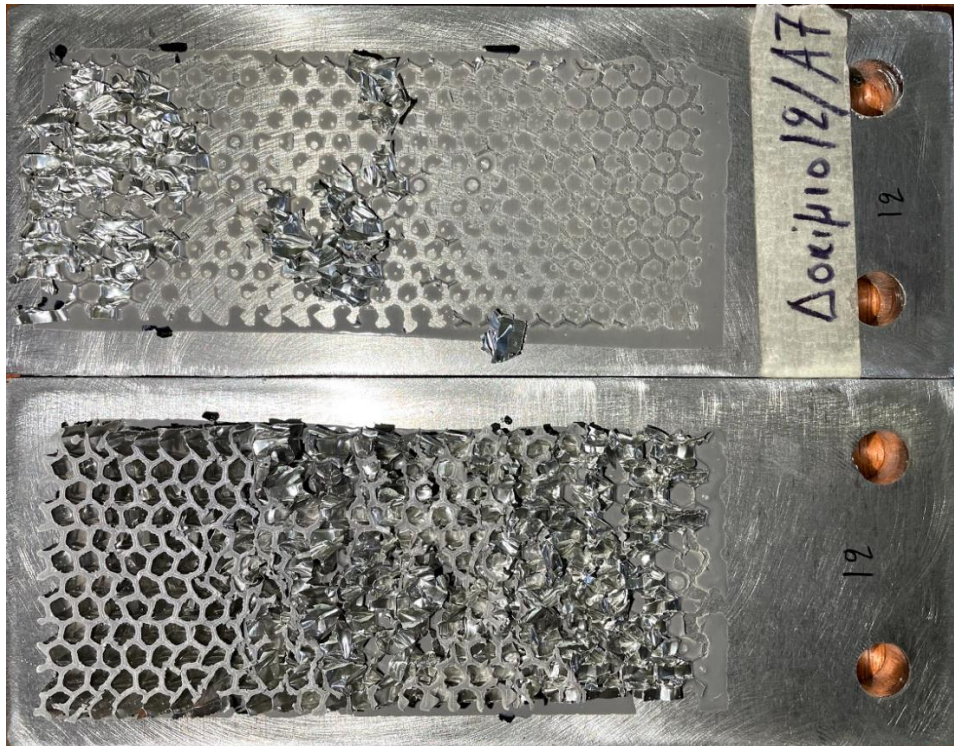
Εικόνα 4-7 Επιφάνεια πύρηνα δοκιμίου 9



Εικόνα 4-8 Επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 10



Εικόνα 4-9 Επιφάνεια πυρήνα δοκιμίου 11



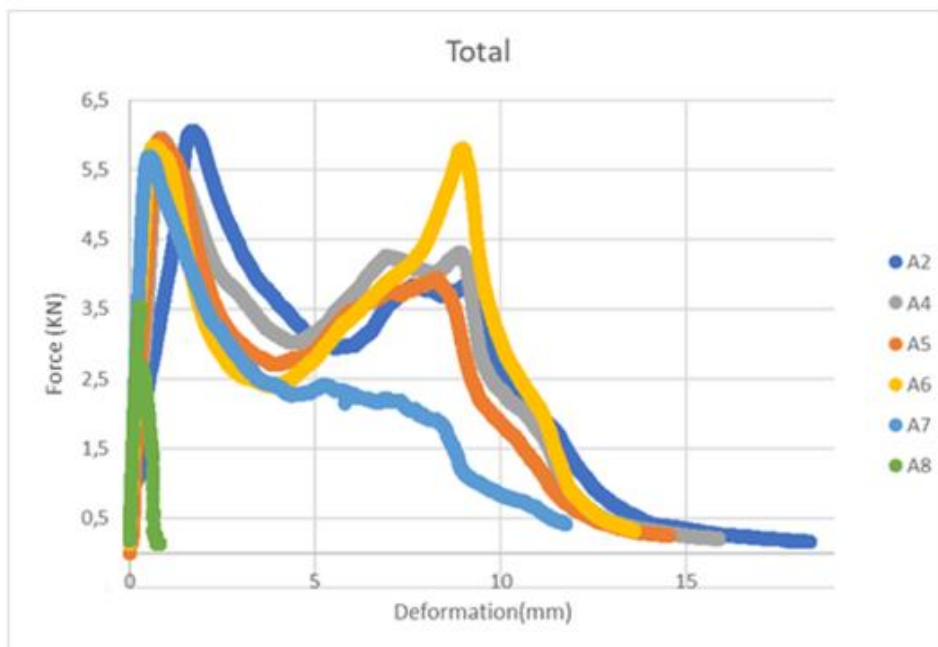
Εικόνα 4-10 Επιφάνεια πύρηνα δοκμίου 12

Κεφάλαιο 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

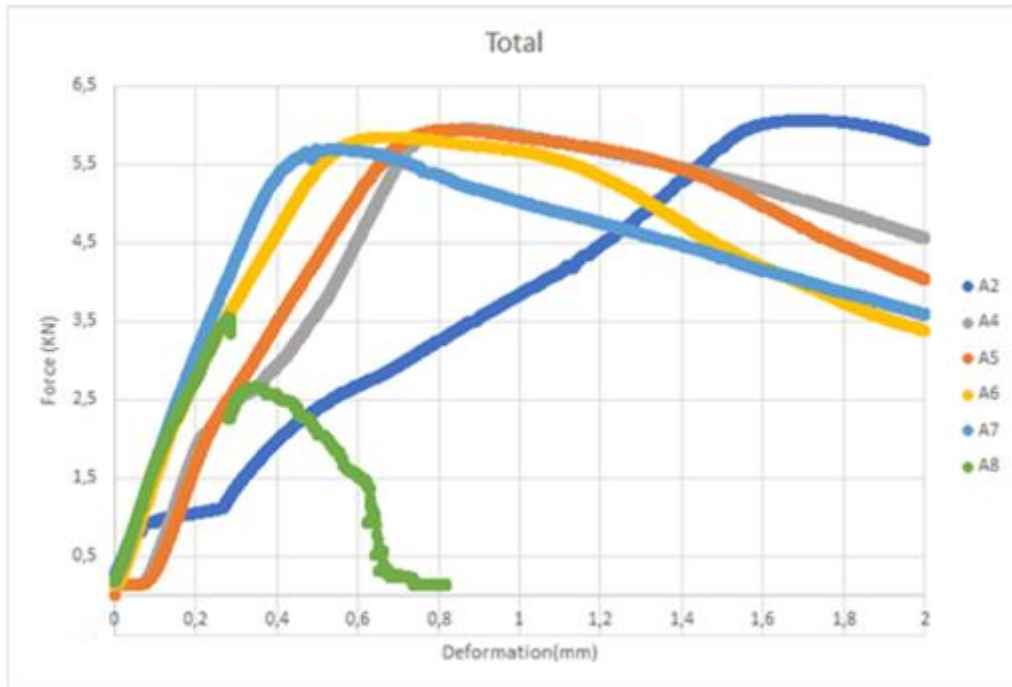
Τα διαφορετικά στάδια στην συμπεριφορά δύναμης -επιμήκυνσης που περιγράφονται στα δοκίμια 7,9,10,11,12 και 13 σχετίζονται πιθανότατα με κάποιο διαφορετικό μηχανισμό παραμόρφωσης ή αστοχίας που ενεργοποιείται κατά την εξέλιξη της διατμητικής παραμόρφωσης του υλικού. Για παράδειγμα κάποιο τοπικό φαινόμενο παραμόρφωσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μικρή μεταβολή στην κλίση της γραμμικής περιοχής. Η πτώση της δύναμης μετά την επιβολή του μέγιστου φορτίου σχετίζεται με την καθολική αστοχία ενός μεγάλου αριθμού κυψελών του honeycomb, λόγω έντονης διατμητικής παραμόρφωσης. Τέλος, η μερική ανάκτηση του φορτίου μετά την μέγιστη διατμητική αντοχή μπορεί να οφείλεται σε αντίσταση από τριβή που δημιουργούν μεταξύ τους οι παραμορφωμένες επιφάνειες των κυψελών.

Η ακριβής εξήγηση των διαφορετικών μηχανισμών που λαμβάνουν κατά την διάτμηση του honeycomb είναι πολύπλοκη και ξεφεύγει από τον στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ χρειάζεται και υποστήριξη από αριθμητικά/αναλυτικά αποτελέσματα για την καλύτερη κατανόησή τους.

Στο διάγραμμα 8 συγκρίνονται οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για όλα τα δοκίμια που πέρασαν τον έλεγχο της επιτυχούς κόλλησης και παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Όπως προκύπτει από το συγκεντρωτικό διάγραμμα 12, οι καμπύλες έχουν παρόμοια συμπεριφορά και παρουσιάζουν μικρές διαφορές, στην ελαστική κυρίως αλλά και στην πλαστική τους συμπεριφορά.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ- ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΛΙΜΑΚΑ 0-2ΜΜ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ).

Δοκίμιο	Διεύθυνση Φόρτισης	Μέγιστο Φορτίο (KN)	Θέση Μέγιστου Φορτίου (mm)	Συνολική Μετατόπιση (mm)	Μέγιστο Φορτίο Ελαστικής Περιοχής (KN)	Μέτρο δυσκαμψίας (KN/mm ²)
7	W	6	1.65	18	1	3.933
9	W	5.95	0.85	16	2.5	8
10	W	5.9	0.9	14.5	2.5	8
11	W	5.85	0.7	13.5	2.2	9.84
12	W	5.7	0.55	12	2.2	12.67

Πίνακας 3.9 Αποτελέσματα Πειραματικών Διαδικασιών.

Τα βασικά συμπεράσματα που διεξήχθησαν από την παραπάνω μελέτη παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε διεξοδικά ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί ένα αξιόπιστος τρόπος κόλλησης μεταλλικών επιφανειών honeycomb και συμπαγούς πλάκας αλουμινίου προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δοκίμιο διάτμησης στο πλαίσιο της προδιαγραφής ASTM C273.
2. Μελετήθηκαν, προσδιορίστηκαν και καταγράφηκαν οι κρίσιμες παράμετροι με τις οποίες επιτυγχάνονται βέλτιστες συνθήκες κόλλησης όπως είναι οι συνθήκες ομογενοποίησης της κόλλας σε φούρνο θερμικών κατεργασιών υπό πίεση.
3. Με βάση τις συνθήκες κόλλησης που επιτεύχθηκαν, διενεργήθηκαν δοκιμές διάτμησης για την μελέτη της συμπεριφοράς διάτμησης πυρήνα honeycomb αλουμινίου 5052 σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C273
4. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρατηρείται μια γραμμική περιοχή του υλικού στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας, που συνοδεύεται αρκετές φορές με κάποιες μικρές αλλαγές στην κλίση της καμπύλης, ένδειξη κάποιου πιθανού τοπικού μηχανισμού αστοχίας ή παραμόρφωσης. Η κατάρρευση της δομής honeycomb λόγω έντονης πλαστικής παραμόρφωσης των τοιχωμάτων των κυψελών ξεκινάει μετά από μια μέγιστη τιμή φορτίου που ακολουθεί το τέλος της γραμμικής περιοχής.
5. Παράγοντες όπως τα συσσωματώματα από τα τοιχώματα του honeycomb και η αντίσταση στην απόσχιση λόγω αυτού επηρεάζουν το όριο θραύσης, και διαφέρει από πείραμα σε πείραμα κατά ένα ποσοστό.
6. Τέλος από τα διαγράμματα, δεν μπορούν να εξαχθούν ακριβή συμπεράσματα για τους μηχανισμούς αστοχίας μετά το πέρας του μέγιστου φορτίου θραύσης καθώς οι κυψελίδες λόγω παραμόρφωσης και θραύσης αρχίζουν και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με ακανόνιστο τρόπο.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

- [1] AKTAY, Levent; JOHNSON, Alastair F.; KRÖPLIN, Bernd-H. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75.9: 2616-2630.
- [2] Arslan, K., & Gunes, R. (2018). EFFECT OF CORE ORIENTATION ON LOW VELOCITY IMPACT RESPONSE OF HONEYCOMB SANDWICH BEAMS.
- [3] WANG, Jian; CAO, Ying. Influence of the Geometric Parameters on the Densification Onset Strain of Double-Walled Honeycomb Aluminum under Out-of-Plane Compression. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020.
- [4] Bruno CASTANIE, Christophe BOUVET, Malo Ginot, Review of composite sandwich structure in aeronautic applications, *Composites Part C: Open Access*, Volume 1, (2020)
- [5] BIRMAN, Victor; KARDOMATEAS, George A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142: 221-240.
- [6] LYFORD, Andrew Lindquist. *Failure Prediction of Honeycomb Panel Joints using Finite Element Analysis*. 2017. PhD Thesis. Virginia Tech.
- [7] CLARKE, Gregory; WOWK, Diane; MARSDEN, Catharine. Characterization of Low Velocity Impact Damage in Metallic Honeycomb Sandwich Aircraft Panels using Finite Element Analysis. 2017.
- [8] MATHIJSEN, Django. Composite sandwich structures: The new milestone in bridge building. *Reinforced Plastics*, 2013, 57.6: 17-23.
- [9] COTE, François; DESHPANDE, Vikram; FLECK, Norman. The shear response of metallic square honeycombs. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2006, 1.7: 1281-1299.
- [10] Lurie, S. A., Solyaev, Y. O., Volkov-Bogorodskiy, D. B., Bouznic, V. M., & Koshurina, A. A. (2017). Design of the corrugated-core sandwich panel for the arctic rescue vehicle. *Composite Structures*, 160, 1007-1019.
- [11] Ren, L., Fan, L., Zhou, M., Guo, Y., Zhang, Y., Boehlert, C. J., & Quan, G. (2018). Magnesium application in railway rolling stocks: A new challenge and opportunity for lightweighting. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 81-88.
- [12] Perruisseau-Carrier, Julien & Tamagnone, Michele & Gomez-Diaz, Juan & Carrasco, Eduardo. (2013). Graphene Antennas: Can Integration and Reconfigurability Compensate for the Loss?.
- [13] Rahman, A. Hafeezur & GIBSON, MIKE. (2013). EFFECTIVENESS OF HONEYCOMB STRUCTURE IN MAIN BATTLE TANK DESIGN. 10.13140/RG.2.1.3586.3921.

- [14] Pan, S. D., Wu, L. Z., Sun, Y. G., Zhou, Z. G., & Qu, J. L. (2006). Longitudinal shear strength and failure process of honeycomb cores. *Composite Structures*, 72(1), 42-46.
- [15] BIANCHI, Gabriel; AGLIETTI, Guglielmo S.; RICHARDSON, Guy. Static and fatigue behaviour of hexagonal honeycomb cores under in-plane shear loads. *Applied Composite Materials*, honeycomb sandwich structure. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2021, 40.3-4: 165-175.
- [16] HODGE, A. J.; NETTLES, Alan T. A novel method of testing the shear strength of thick honeycomb composites. 1991.
- [17] LIU, Yue; LIU, Wei; GAO, Weicheng. Out-of-plane shear property analysis of Nomex honeycomb sandwich structure. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2021, 40.3-4: 165-175.
- [18] COTE, François; DESHPANDE, Vikram; FLECK, Norman. The shear response of metallic square honeycombs. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2006, 1.7: 1281-1299.
- [19] YANG, Mijia; QIAO, Pizhong. Quasi-static crushing behavior of aluminum honeycomb materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2008, 10.2: 133-160.
- [20] SOLMAZ, Murat Yavuz; TOPKAYA, Tolga. The Flexural Fatigue Behavior of Honeycomb Sandwich Composites Following Low Velocity Impacts. *Applied Sciences*, 2020, 10.20: 7262.
- [21] Wahl, L., Maas, S., Waldmann, D., Zürbes, A., & Frères, P. (2014). Fatigue in the core of aluminum honeycomb panels: Lifetime prediction compared with fatigue tests. *International Journal of Damage Mechanics*, 23(5), 661-683.
- [22] PAMG-XR1 5052 Aluminum Honeycomb, Datasheet from PLASCORE 05.10.2021
- [23] Standard, A. S. T. M. (2013). Standard test method for shear properties of sandwich core materials. *ASTM Int*, 1-7..
- [24] Aluminum 5052-H32, Datasheet from protolabs 05.10.2021
- [25] HexBond 312 modified epoxy film adhesive, Datasheet from HEXCEL 05.10.2021
- [26] HexBond 609 modified epoxy film adhesive, Datasheet from HEXCEL 05.10.2021
- [27] Διπλωματική εργασία Ψηλού Ευάγγελου, 'Πειραματική μελέτη της επίδρασης του πάχους κόλλησης και του ύψους κυψελίδας στην συμπεριφορά κόπωσης με διάτμηση κυψελοειδών δομών από αλουμίνιο'. 2020