



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ  
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ  
ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΟΛΛΗΤΟΥ  
ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ – ΣΥΝΘΕΤΟΥ  
ΥΛΙΚΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΛΛΙΟΠΗΣ - ΑΡΤΕΜΙΔΟΣ ΚΑΛΤΕΡΕΜΙΔΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2014**





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ  
ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ  
ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΟΛΛΗΤΟΥ  
ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ – ΣΥΝΘΕΤΟΥ  
ΥΛΙΚΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΛΛΙΟΠΗΣ - ΑΡΤΕΜΙΔΟΣ ΚΑΛΤΕΡΕΜΙΔΟΥ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. ΣΙΜΙΤΖΗΣ, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2014**





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν να πραγματοποιηθεί η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, ξεκινώντας από τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Τσούβαλη. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, όπως επίσης και για την αμέριστη στήριξή του και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θανάση Μαρκουλή, μέλος του τεχνικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, χωρίς τη συνεισφορά του οποίου στην κατασκευή των δοκιμών και τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, η ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή.

Επιπλέον, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω σε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη συνεχή τους βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχαν. Ιδιαίτερος θα ήθελα να αναφέρω τον κ. Χαράλαμπο Ξάνθη, την κ. Χαρά Σαράφογλου, τον κ. Βασίλειο Καρατζά και τον κ. Ιωάννη Κουλουκούρα για τη ξεχωριστή βοήθεια που μου παρείχε ο καθένας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου που με στήριξαν και ιδιαίτερα στην οικογένειά μου, που βρίσκεται πάντα κοντά μου και εμπιστεύεται κάθε μου προσπάθεια.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών σε προηγμένες και ελαφριές κατασκευές επεκτείνονται συνεχώς χρησιμοποιώντας τα είτε ως νέα δομικά υλικά είτε για την αντικατάσταση μετάλλων. Η τελευταία περίπτωση αποκτά τελευταία όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη ναυπηγική βιομηχανία, σε μια προσπάθεια να μειωθεί το δομικό βάρος των κατασκευών. Κατ' επέκταση, η ένωση σύνθετου υλικού με χάλυβα είναι ένα ουσιαστικό ερευνητικό πεδίο, που απαιτεί εκτενείς μελέτες για την εύρεση της επίδρασης των πολλών παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή ενός κολλητού συνδέσμου σύνθετου υλικού – χάλυβα.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια πειραματική παραμετρική μελέτη κολλητών συνδέσμων τύπου double – strap μεταξύ ανόμοιων υλικών, δηλαδή κοινού ναυπηγικού χάλυβα και σύνθετου υλικού με πολυμερική μήτρα και ίνες άνθρακα. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να ερευνηθεί η δυνατότητα της χρήσης μεθόδων laser για την επιφανειακή επεξεργασία των χαλύβδινων μερών και να εξαχθεί πολύτιμη γνώση που θα χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση αυτού του τύπου κολλητών συνδέσμων.

Τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι προετοιμασίας της επιφάνειας και δύο διαφορετικά μήκη επικάλυψης εξετάζονται πειραματικά, οδηγώντας σε ένα σύνολο 48 δοκιμών. Οι μέθοδοι προετοιμασίας της επιφάνειας περιλαμβάνουν 2 διαφορετικές μεθόδους laser που δημιουργούν διαφορετικές κατανομές μικροδομών επάνω στις χαλύβδινες επιφάνειες. Για λόγους σύγκρισης, σε ένα σύνολο δοκιμών έγινε αμμοβολή προδιαγραφών SA2½ και σε ένα άλλο σύνολο χρησιμοποιήθηκε εργαλείο χειρός για την προετοιμασία της επιφάνειας του χάλυβα στην περιοχή επικάλυψης. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα τμήματα του σύνθετου υλικού κατασκευάστηκαν απ' ευθείας επάνω στο χάλυβα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο vacuum bagging και, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των εργασιών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, η ρητίνη του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε ως το κολλητικό μέσο ανάμεσα στο χάλυβα και το σύνθετο υλικό.

Συνολικά, έξι δοκίμια κόπηκαν από κάθε σύνδεσμο που κατασκευάστηκε και υπεβλήθησαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Σε κάθε περίπτωση, καταγραφόταν η δύναμη συναρτήσεως της μετατόπισης κάθε δοκιμίου και ο τρόπος έναρξης και διάδοσης της αστοχίας. Οι πειραματικές μετρήσεις αναλύονται οδηγώντας σε σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα όσον αφορά στον τρόπο αστοχίας των δοκιμών και την επίδραση της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας και του μήκους επικάλυψης στην αντοχή των κολλητών συνδέσμων.



## ABSTRACT

Applications of composite materials to advanced and lightweight structures are continuously expanding either as new structural materials or by replacing metals. The last option is becoming lately of great interest for the marine shipbuilding industry, in an effort to decrease structural weight and lower its center of gravity. Therefore, joining of composite and steel parts is an essential research field, necessitating extensive studies investigating the effect of the many parameters that affect the strength of a composite-to-steel adhesive joint.

The present work presents an experimental parametric study of adhesively bonded double strap joints between dissimilar materials, namely typical marine grade steel and carbon fiber reinforced polymers, where the composite is directly laminated on the steel. The purpose of this study is to investigate the potential of using laser surface texturing as a means for surface preparation of the steel adherents and extract valuable knowledge that will be used in the design of this type of joints for connecting steel and composite structural parts.

Four different surface preparation methods and two different overlap lengths are considered and experimentally tested, resulting in a total of 48 tests. The surface preparation methods involve 2 different laser surface texturing configurations arranged in regular patterns, obtained by melt pool displacement with a high brilliance fibre laser, which allows to produce a spike-hole combined topography in homogeneous (star-like) or directional (triangle-like) arrangement. For comparison reasons, a set of specimens was made using grit blasting to SA2½ and another set using a hand tool for the steel surface preparation in the overlap area. In all cases, composite adherents were laminated directly on steel and were cured using the vacuum bag method and, unlike the majority of the work found in the literature, the resin of the composite system was used as the adhesive.

Six double strap joints specimens were cut from each parent plate and were tested under a uniaxial tensile quasi static displacement. The applied displacement and the reaction force were recorded and a high speed camera was used in order to capture any possible signs of damage initiation and propagation in the overlap area. The experimental measurements are analyzed resulting in important qualitative conclusions regarding the damage initiation areas and the damage propagation paths, as well as in important quantitative conclusions regarding the effect of the surface preparation method and overlap length on the failure mode and strength of the joint.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά.....	1
1.2 Κολλητοί σύνδεσμοι σύνθετων υλικών – μετάλλων.....	4
1.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή κολλητών συνδέσμων σύνθετου υλικού – χάλυβα.....	7

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

#### Σχεδιασμός πειραματικών δοκιμών

2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Επιλογή μεθόδων επιφανειακής επεξεργασίας χάλυβα.....	11
2.3 Επιλογή είδους σύνθετου υλικού.....	17
2.4 Επιλογή είδους κολλητού συνδέσμου.....	19
2.5 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών δοκιμίων και ονοματολογία.....	20
2.6 Επιλογή των συνθηκών φόρτισης κατά τις πειραματικές δοκιμές.....	34

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### Κατασκευή δοκιμίων

3.1 Χαρακτηρισμός σύνθετου υλικού.....	37
3.1.1 Μελέτη της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας σύνθετου υλικού σε μονοαξονικό εφελκυσμό.....	37
3.1.2 Εύρεση της περιεκτικότητας του σύνθετου υλικού σε ίνες άνθρακα....	41
3.2 Κατασκευή κολλητών συνδέσμων.....	43
3.3 Κοπή δοκιμίων.....	50
3.4 Έλεγχος ποιότητας κολλητών συνδέσμων.....	57
3.5 Προετοιμασία δοκιμίων.....	64

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Πειραματικές δοκιμές – Ανάλυση μετρήσεων**

4.1 Πειραματικές δοκιμές.....	67
4.2 Ανάλυση μετρήσεων.....	69
4.2.1 Επίδραση του μήκους επικάλυψης στην αντοχή.....	69
4.2.2 Επίδραση της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας των χαλύβδινων πλακών στην αντοχή.....	76
4.2.3 Μελέτη ακαμψίας δοκιμίων.....	80
4.2.4 Μελέτη παραμορφώσεων.....	82
4.3 Τρόπος αστοχίας δοκιμίων.....	83

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>87</b>
--------------------------	-----------



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Σε όλους τους κατασκευαστικούς τομείς, η αύξηση της απόδοσης και η μείωση του κόστους αποτελούν τους πιο σημαντικούς στόχους. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, γίνεται αναζήτηση όλο και πιο βελτιωμένων παραμέτρων προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί. Στις κατασκευές, η αύξηση της απόδοσης και η μείωση του κόστους συνδέονται άμεσα με την αύξηση της αντοχής και τη μείωση του βάρους. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια εντείνονται οι ερευνητικές προσπάθειες για εύρεση των παραμέτρων εκείνων που θα βελτιστοποιήσουν τις κατασκευές από θέμα αντοχής και βάρους.

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους σε μία κατασκευή είναι το χρησιμοποιούμενο υλικό, καθώς αυτό είναι που προσδίδει τις βασικές ιδιότητες στο τελικό κατασκευαστικό σύνολο. Συνηθισμένοι τρόποι για τη μείωση του βάρους μιας κατασκευής είναι η μείωση του πάχους του χρησιμοποιούμενου υλικού και η χρήση της μεθόδου των συγκολλήσεων. Επιπλέον, γίνεται προσπάθεια χρησιμοποίησης υλικών με χαμηλότερο ειδικό βάρος από τον κοινό χάλυβα που χρησιμοποιείται επί το πλείστον στις κατασκευές. Τέτοια υλικά, τα οποία τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των κατασκευών, είναι τα σύνθετα υλικά.

Το σκεπτικό της κατασκευής των σύνθετων υλικών πηγάζει από το γεγονός ότι όλα τα γνωστά υλικά παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επομένως, σε μια ιδανική περίπτωση, θα μπορούσε να γίνει συνδυασμός δύο υλικών, προκειμένου να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα και των δύο ξεχωριστά, αλλά και να ελαχιστοποιηθούν κατά το δυνατό τα μειονεκτήματά τους. Με βάση το σκεπτικό αυτό, τα σύνθετα υλικά αποτελούν ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης και καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές, έχοντας μεταβάλει βέβαια σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης.

Ως σύνθετο υλικό (composite material), χαρακτηρίζεται ένα υλικό, το οποίο αποτελείται από δύο ή περισσότερα υλικά ή φάσεις. Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα υλικά αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό που προκύπτει έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών μερών του. Για να καταταγεί ένα υλικό στα σύνθετα υλικά, θα πρέπει το υλικό να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10%) (Τσουβάλης 1998).

Στα σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούνται από δύο συστατικά, το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (Τσούβαλης 1998).

Η βασική κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών γίνεται με βάση τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, ως εξής:

- Ινώδη σύνθετα υλικά
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων
- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά

Οι βασικές κατηγορίες σύνθετων υλικών απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1.

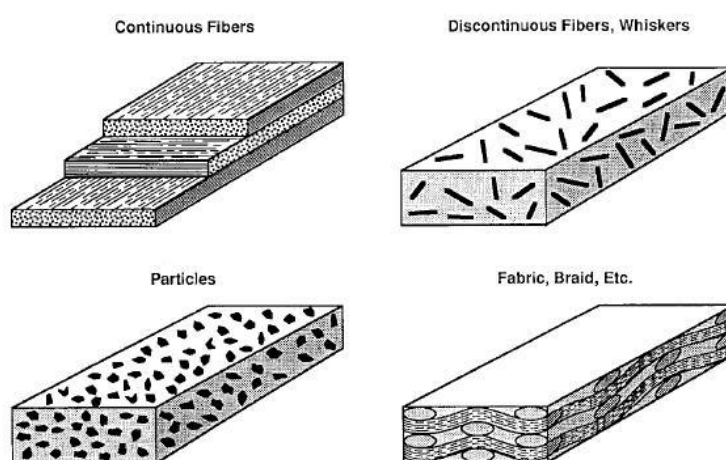


Figure 1 Reinforcement forms.

**Σχήμα 1.1:** Σχηματική απεικόνιση των κυριότερων κατηγοριών σύνθετων υλικών (imeulia.blogspot.com)

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούν συνδυασμό ρητίνης ως μήτρα και ινών ως ενισχυτικό μέσο. Οι ίνες προσδίδουν στο σύνθετο υλικό υψηλές μηχανικές ιδιότητες σε εφελκυσμό κυρίως, ενώ η ρητίνη αποτελεί το συνδετικό υλικό των ινών, δηλαδή συνδέει τις ίνες και τις συγκρατεί μεταξύ τους. Οι ίνες μπορεί να βρίσκονται μέσα στο σύνθετο υλικό είτε με συγκεκριμένη πλέξη είτε άτακτα κατανομημένες. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά (Τσούβαλης 1998).

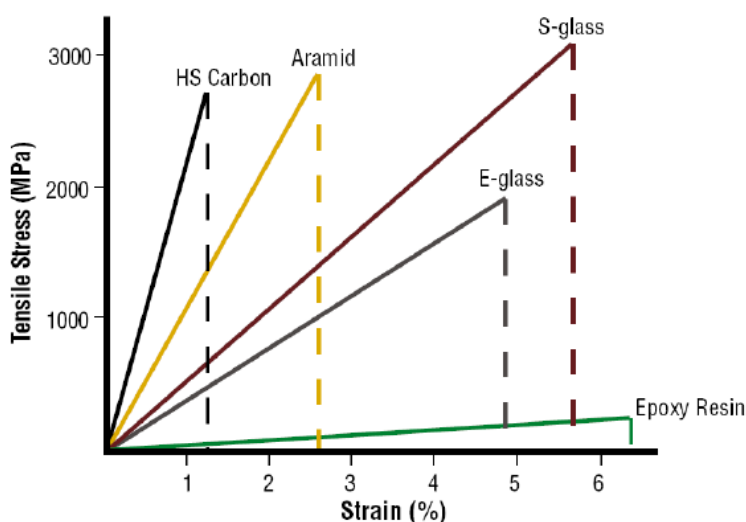
Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών είναι συνήθως ίνες άνθρακα, ίνες γυαλιού και αραμιδικές ίνες. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για τις ίνες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σύνθετων υλικών. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μία σύγκριση ορισμένων ινών με κάποια μέταλλα ως προς την πυκνότητά τους. Από το σχήμα διαπιστώνεται η σημαντικά μειωμένη

πυκνότητα των ινών σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά και συγκεκριμένα το αλουμίνιο και το χάλυβα, ιδιότητα που εκμεταλλευόμαστε ευρέως, προκειμένου να μειώσουμε το βάρος στις κατασκευές. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι είτε θερμοσκληρυνόμενες είτε θερμοπλαστικές και συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ρητίνες εποξικές, βινυλεστερικές, πολυεστερικές και φαινολικές. Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο) (Τσούβαλης 1998).

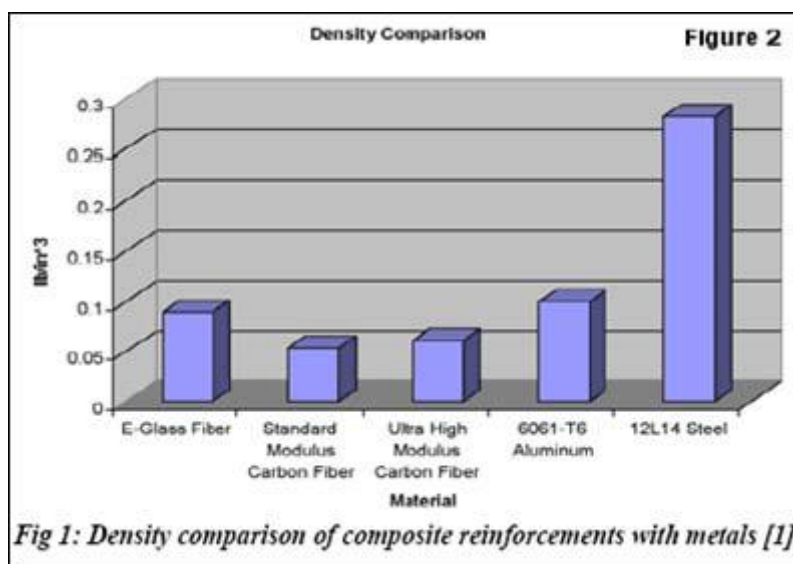
Παρατηρώντας τις διαφορετικές ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιούνται ως μέσα ενίσχυσης και των διαφόρων ρητινών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα συγκράτησης, αλλά και τις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής των σύνθετων υλικών, καταλήγουμε στο ότι υπάρχει πολύ μεγάλη δυνατότητα να κατασκευάζονται σύνθετα υλικά τα οποία έχουν σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους, με την ικανότητα να μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στο υπό μελέτη σε κάθε περίπτωση σύστημα.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών (Τσούβαλης 1998).

Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής (Τσούβαλης 1998).



**Σχήμα 1.2:** Σχηματική σύγκριση των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης για τα είδη ινών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των σύνθετων υλικών (Τσούβαλης 1998)

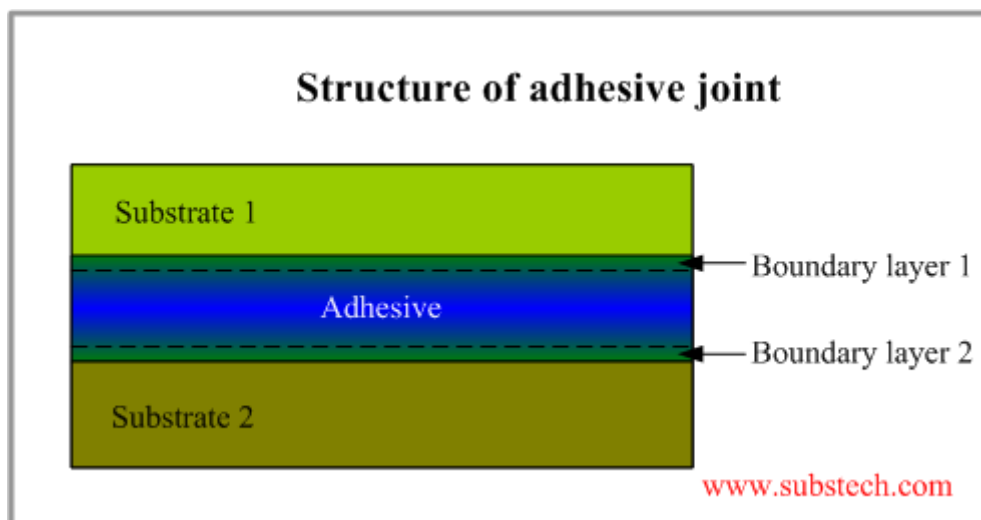


**Σχήμα 1.3:** Σχηματική σύγκριση της πυκνότητας ανάμεσα σε ίνες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σύνθετων υλικών και σε δύο μέταλλα (Τσούβαλης 1998)

## 1.2 Κολλητοί σύνδεσμοι σύνθετων υλικών - μετάλλων

Για την ένωση δομικών υλικών παρόμοιων ή μη μεταξύ τους, υπάρχουν πολλές μέθοδοι, από την άποψη της τεχνικής που χρησιμοποιείται για την ένωση. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ένωσης υλικών, οι οποίες χρησιμοποιούν βίδες και καρφιά, προτιμούνται λόγω της απλότητάς τους και της ικανότητας αποσυναρμολόγησης που παρέχουν όταν χρησιμοποιούνται για την ένωση μετάλλων ή σύνθετων υλικών. Ωστόσο, όταν ένας μηχανικός σύνδεσμος φορτίζεται, προκαλείται τοπική βλάβη στις οπές συγκράτησης, λόγω των συγκεντρώσεων τάσεων. Αυτό τελικά οδηγεί σε δομική υποβάθμιση του συνδέσμου και θέτει σε κίνδυνο τη δομική ακεραιότητα του κατασκευαστικού συνόλου. Ένα άλλο πρόβλημα που εισάγεται με τους μηχανικούς συνδέσμους είναι η αύξηση του βάρους της κατασκευής. Επιπλέον, η διάβρωση είναι ένα πρόβλημα που συχνά καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε σε τέτοιου είδους συνδέσμους (Wu et al 2012).

Οι απαιτήσεις για το σχεδιασμό ελαφριών κατασκευών με μηδαμινές απώλειες ακαμψίας και αντοχής έχουν οδηγήσει πολλούς ερευνητές στην ανάγκη εύρεσης καινούριων μεθόδων ένωσης υλικών. Μέσω της ανάγκης αυτής, έχει αρχίσει να ωριμάζει το πεδίο των κολλητών συνδέσμων υλικών, το οποίο εντοπίζει τις ρίζες του στην αεροναυπηγική. Αξιοποιώντας την εμπειρία που προέκυψε από το συγκεκριμένο πεδίο, οι κολλητοί σύνδεσμοι έχουν υιοθετηθεί όλο και περισσότερο και από άλλες βιομηχανίες, όπως για παράδειγμα τη ναυπηγική βιομηχανία, τις ανεμογεννήτριες, τις σωληνώσεις, έργα πολιτικού μηχανικού και άλλα πολλά. Γενικά, οι κολλητοί σύνδεσμοι προσφέρουν μικρότερο βάρος στις κατασκευές αλλά και μεγαλύτερη απόδοση, καθώς η μεταφορά φορτίου γίνεται πιο ομοιόμορφα στα τμήματα που έρχονται σε επαφή, μέσω μεγαλύτερης επιφάνειας υλικού. Όλα αυτά οδηγούν τελικά στη μείωση του κόστους που απαιτείται για την κατασκευή (Zhao & Zang 2007). Στο Σχήμα 1.4 απεικονίζεται σχηματικά ένας κολλητός σύνδεσμος.



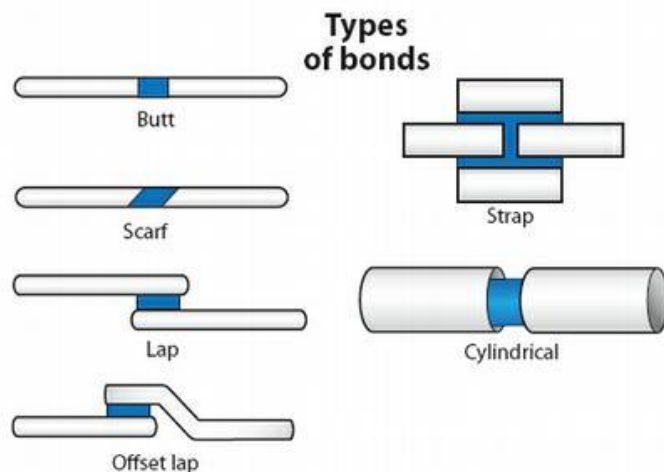
Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση ενός κολλητού συνδέσμου (www.substech.com)

Η μέθοδος των κολλητών συνδέσμων χρησιμοποιείται είτε ως μέθοδος σύνδεσης υλικών, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είτε ως τεχνική για την ενίσχυση και επισκευή υφιστάμενων δομών, χρησιμοποιώντας σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα και ίνες ενίσχυσης (fiber reinforced polymer (FRP)) και συχνότερα σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα ως το υλικό ενίσχυσης (carbon fiber reinforced polymer (CFRP)). Γενικά, οι κύριοι λόγοι κολλητής σύνδεσης στρώσεων CFRP με στοιχεία δομικού χάλυβα περιλαμβάνουν την αύξηση της ικανότητας κάμψης, την αύξηση της καμπτικής ακαμψίας, την επισκευή στοιχείων που έχουν οδηγηθεί στην εμφάνιση ρωγμών και την αύξηση της διάρκειας ζωής των στοιχείων. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να συνδέονται απ' ευθείας επάνω στα μεταλλικά μέρη, χρησιμοποιώντας ως κολλητικό μέσο το ίδιο υλικό που χρησιμοποιείται ως μήτρα για το σύνθετο υλικό, δημιουργώντας δηλαδή ένα στρώμα ρητίνης. Ωστόσο, όταν θέλουμε να συνδέσουμε σύνθετα υλικά με μεταλλικά μέρη στα πλαίσια σύνδεσης προκατασκευασμένων δομικών συνόλων, τότε προτιμάται η χρήση ενός διακριτού συγκολλητικού υλικού, δεδομένου ότι η χημική βιομηχανία παρέχει μια ποικιλία εφαρμογών που σχετίζονται με τέτοια συγκολλητικά υλικά με όλο και υψηλότερες ικανότητες πρόσφυσης (Anyfantis & Tsouvalis 2013).

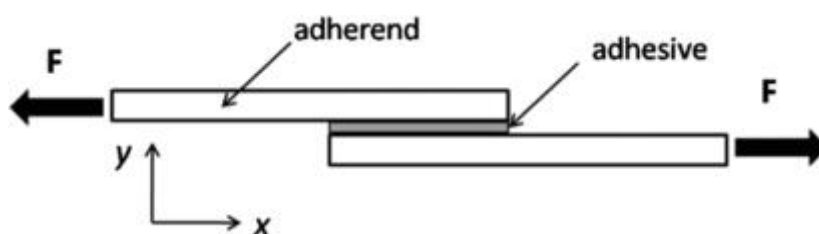
Κατά το σχεδιασμό των κολλητών συνδέσμων σύνθετων υλικών – μετάλλων, πολλές είναι οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και πολλά ζητήματα πρέπει να επιλυθούν σε σχέση με τη συνεργασία των συνιστώντων μερών της ένωσης (adherents) και του συγκολλητικού μέσου (adhesive), σε ό,τι έχει να κάνει με την αντοχή και την ακαμψία του κατασκευαστικού συνόλου (Anyfantis & Tsouvalis 2013). Μεγάλης σημασίας είναι η γεωμετρία του κολλητού συνδέσμου, με τις πιο κοινές γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται να είναι οι:

- Single Lap Joints (SLJ)
- Double Lap Joints (DLJ)
- Single Strap Joints (SSJ)
- Double Strap Joints (DSJ)

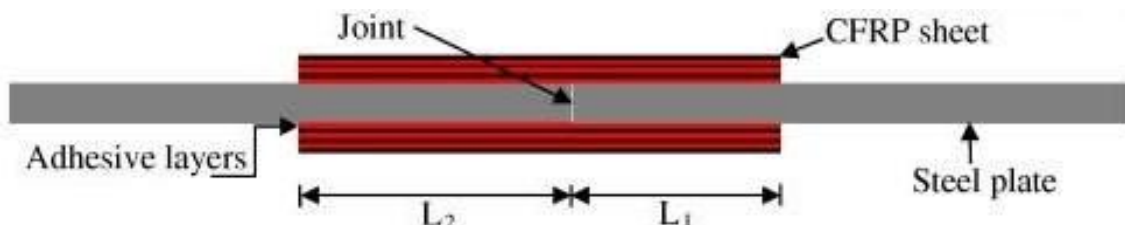
Χαρακτηριστικά παραδείγματα φαίνονται στα Σχήματα 1.5 – 1.7.



Σχήμα 1.5: Είδη κολλητών συνδέσμων (theadhesivesexperts.com)



Σχήμα 1.6: Single Lap Joint (iop.org)



Σχήμα 1.7: Double Strap Joint

Τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα και ίνες άνθρακα (CFRP), όπως είναι ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος, η αντοχή σε διάβρωση και σε περιβαλλοντική υποβάθμιση, καθώς και η ευελιξία, τα καθιστούν πολύ ισχυρούς υποψήφιους για χρήση σε κολλητούς συνδέσμους με μέταλλα, κυρίως σε περιπτώσεις αποκατάστασης. Λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους, παρέχουν όχι μόνο λιγότερο βάρος στις κατασκευές, αλλά και μεγαλύτερη άνεση κατά τη διάρκεια της κατασκευής και κατ' επέκταση εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος. Για τους λόγους αυτούς, η ενίσχυση των χαλύβδινων κατασκευών με αυτά είναι όλο και ευνοϊκότερη για περιπτώσεις επιδιόρθωσης και αποκατάστασης υπαρχόντων κατασκευών (Fawzia et al 2006).

Ωστόσο, ένας από τους κύριους περιορισμούς για την επί πλέον χρήση των CFRP στην επιδιόρθωση και αποκατάσταση χαλύβδινων κατασκευών είναι η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της αντοχής του συστήματος σύνθετου υλικού/χάλυβα. Αυτό είναι εξίσου

σημαντικό με την αβεβαιότητα διατήρησης της αρχικής αντοχής που παρουσιάζει το σύστημα, καθώς μπορεί η αντοχή του να υποβαθμιστεί και η κατάστασή του να επιδεινωθεί λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως είναι η υγρασία και η θερμοκρασία. Εξ' άλλου, λόγω των πολλών διαφορετικών παραμέτρων που υπεισέρχονται κατά τη μελέτη και την κατασκευή ενός κολλητού συνδέσμου, είναι δύσκολο να μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η τελική αντοχή και ακαμψία του συνδέσμου. Για το λόγο αυτό, πολλοί ερευνητές ασχολούνται όλο και πιο συστηματικά με τη μελέτη των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή του συνδέσμου (Kim et al 2006) (Nguyen et al 2012).

### **1.3 Παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή κολλητών συνδέσμων σύνθετου υλικού – χάλυβα**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, πολλές είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή ενός κολλητού συνδέσμου σύνθετου υλικού – χάλυβα. Στη συνέχεια, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις κυριότερες από αυτές.

Αρχικά, βασικό χαρακτηριστικό ενός κολλητού συνδέσμου, το οποίο επηρεάζει άμεσα την αντοχή του είναι η διαμόρφωση του συνδέσμου. Όπως είδαμε, υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαμορφώσεις που μπορούν να προσδοθούν σε ένα σύνδεσμο σύνθετου υλικού – χάλυβα. Η διαμόρφωση του συνδέσμου φαίνεται να έχει μια έντονη επίδραση στην ικανότητα φορτίου που μπορεί να φέρει ο σύνδεσμος. Από πειραματικές δοκιμές, έχει αποδειχτεί ότι οι σύνδεσμοι τύπου SLJ και DSJ είναι συγκρίσιμοι από άποψη του τελικού φορτίου που μπορούν να αντέξουν. Ωστόσο, οι σύνδεσμοι DSJ παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραμόρφωση μέχρι την αστοχία (Abdelaziz et al 2006).

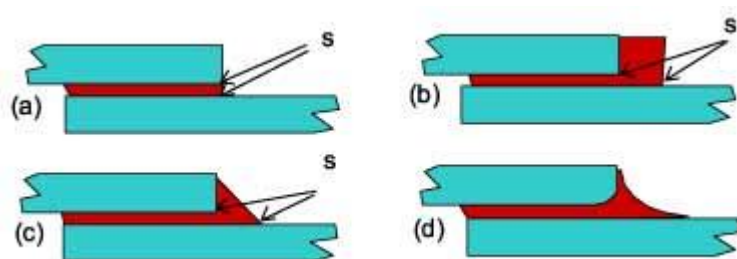
Δεύτερον, καθοριστικό ρόλο παίζει το είδος των συστατικών μερών και του συγκολλητικού μέσου. Συγκεκριμένα, είναι υψίστης σημασίας το είδος της ενίσχυσης του σύνθετου υλικού, εάν δηλαδή είναι ίνες άνθρακα, ίνες γυαλιού ή αραμιδικές ίνες, όπως επίσης και οι ιδιότητες της κόλλας που χρησιμοποιείται. Κατ' επέκταση, οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού και του χάλυβα, όπως είναι η αντοχή και η ακαμψία τους, επηρεάζουν άμεσα τις τελικές ιδιότητες του κολλητού συνδέσμου (Abdelaziz et al 2006).

Πολύ σημαντική επίδραση στην αντοχή έχουν γενικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συνδέσμου, όπως είναι τα πάχη των συστατικών μερών, καθώς επίσης και το μήκος επικάλυψης (overlap length), δηλαδή το μήκος του χάλυβα που καλύπτεται από σύνθετο υλικό. Παρομοίως, ένα χαρακτηριστικό του συνδέσμου που επηρεάζει την αντοχή του είναι το πάχος του συγκολλητικού υλικού. Αποδεικνύεται πως με την αύξηση του πάχους του στρώματος του συγκολλητικού υλικού παρατηρείται μια σημαντική μείωση στο συνολικό φορτίο και την επιμήκυνση μέχρι την αστοχία του συνδέσμου (Abdelaziz et al 2006).

Αρκετά σημαντικές στην αντοχή του συνδέσμου είναι και οι παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν τα ελεύθερα άκρα του συνδέσμου και οι πιο κοινές από αυτές είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες και το spew fillet. Συγκεκριμένα, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, και κυρίως η υγρασία, επηρεάζουν άμεσα τα ελεύθερα άκρα του συνδέσμου, και κατ'



επέκταση μπορούν να μειώσουν αρκετά την αντοχή του συνδέσμου. Από την άλλη, το spew fillet, το οποίο μπορεί να σχηματιστεί από υπερβολική ποσότητα του συγκολλητικού μέσου, η οποία συσσωρεύεται ύστερα από πίεση στα ελεύθερα άκρα του συνδέσμου, μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές επιδράσεις στην αντοχή του συνδέσμου. Αποδεικνύεται πως η επίδραση του spew fillet, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8, εξαρτάται από την ακαμψία των συστατικών μερών του συνδέσμου και την ολκιμότητα του συγκολλητικού μέσου. Γενικά, η αντοχή ενός συνδέσμου εξαρτάται άμεσα από τις συνθήκες που επικρατούν στα ελεύθερα άκρα του και τη σχετική ολκιμότητα του συγκολλητικού μέσου σε σχέση με αυτή των συστατικών μερών (Abdelaziz et al 2006).



**Σχήμα 1.8:** Διαφορετικές μορφές spew fillet (twi-global.com)

Πέρα από τις συνθήκες που επικρατούν στα ελεύθερα άκρα του συνδέσμου, επίσης πολύ σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του κολλητού συνδέσμου είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και γενικώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται ο σύνδεσμος, όπως για παράδειγμα η έκθεση σε θαλασσινό νερό. Οι ακραίες συνθήκες μπορούν να επιφέρουν σημαντική μεταβολή στην αντοχή και την ακαμψία του συνδέσμου (Nguyen et al 2011) (Nguyen et al 2012).

Άλλη σημαντική παράμετρος που καθορίζει την αντοχή του κολλητού συνδέσμου είναι η μέθοδος κατασκευής του σύνθετου υλικού που συνδέεται με το χάλυβα και κατά πόσο η κατασκευή γίνεται απ' ευθείας επάνω στο χάλυβα ή προηγείται της σύνδεσής του με αυτόν (Kim et al 2006).

Τέλος, σε αρκετά μεγάλο βαθμό, η αντοχή του κολλητού συνδέσμου εξαρτάται από την προετοιμασία των επιφανειών που έρχονται σε επαφή και κατ' επέκταση και από την επιφανειακή κατεργασία των χαλύβδινων τμημάτων που έρχονται σε επαφή με το σύνθετο υλικό. Αυτό είναι καθοριστικής σημασίας ειδικά στην περίπτωση εκείνη που δεν γίνεται χρήση συγκολλητικού μέσου, αλλά η ένωση του σύνθετου υλικού με το χάλυβα γίνεται μέσω του ίδιου υλικού που χρησιμοποιείται ως μήτρα στο σύνθετο υλικό, δηλαδή μέσω της ρητίνης. Η επιφανειακή επεξεργασία του μετάλλου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην πρόσφυσή του με το σύνθετο υλικό και στη δυνατότητα συγκράτησής τους, κάτι που τελικά επιδρά στην αντοχή και τον τρόπο αστοχίας του συνδέσμου.

Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος της επιφανειακής επεξεργασίας των μεταλλικών τμημάτων σε έναν σύνδεσμο σύνθετου υλικού – χάλυβα είναι η ενίσχυση του δεσμού ανάμεσα στα δύο υλικά, δηλαδή η αύξηση της αντοχής του δεσμού. Η κατάλληλη επιφανειακή επεξεργασία των μεταλλικών μερών του δεσμού, επιτρέπει τόσο την επιθυμητή πρόσφυση



ανάμεσα στα δύο υλικά που έρχονται σε επαφή, όσο και την απαραίτητη συμπεριφορά του δεσμού στις διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και ειδικά σε συνθήκες υγρασίας, οι οποίες χωρίς την κατάλληλη επεξεργασία των επιφανειών μπορούν να επιφέρουν σημαντικές μειώσεις της αντοχής του δεσμού. Στον όρο επιφανειακή επεξεργασία συμπεριλαμβάνονται πολλές διαφορετικές φάσεις επεξεργασίας. Αρχικά, στην επιφανειακή επεξεργασία των μεταλλικών μερών συμπεριλαμβάνεται καθαρισμός και απολίπανση τους, προκειμένου να απομακρυνθεί τυχόν περιττό υλικό. Επιπλέον, μπορεί να ακολουθήσει κάποια φυσική ή και χημική τροποποίηση της επιφάνειας του μετάλλου, η οποία μπορεί να αποτελέσει έναν πολύ καθοριστικό παράγοντα για την αντοχή του δεσμού (Ebnesajjad 2011).

Με την τροποποίηση της επιφάνειας του μετάλλου πριν από την ένωσή του με το σύνθετο υλικό, επιτυγχάνεται η αφαίρεση ή η παρεμπόδιση εμφάνισης ενός ασθενούς στρώματος στην επιφάνεια του μετάλλου, και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ενίσχυση του δεσμού, καθώς βελτιστοποιούνται οι δυνάμεις πρόσφυσης ανάμεσα στα δύο υλικά και δημιουργείται μία κατάλληλη μικροδομή στην επιφάνεια, η οποία βελτιώνει τη συνολική συμπεριφορά του δεσμού. Επομένως, μέσω της κατάλληλης επιφανειακής επεξεργασίας του μετάλλου, δημιουργείται η κατάλληλη τραχύτητα και επιτυγχάνονται οι κατάλληλες συνθήκες πρόσφυσης του στο σύνθετο υλικό, οπότε τελικά βελτιστοποιείται η αντοχή του δεσμού και η αντίστασή του στις διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες (Ebnesajjad & Ebnesajjad 2014).

Στη συγκεκριμένη εργασία, γίνεται μία προσπάθεια αξιολόγησης της αντοχής και του τρόπου αστοχίας κολλητών συνδέσμων χάλυβα – σύνθετου υλικού CFRP, το οποίο «χτίζεται» απ' ευθείας επάνω στο χάλυβα με τη μέθοδο vacuum bagging, μεταβάλλοντας και εξετάζοντας δύο από τις προαναφερθείσες παραμέτρους και συγκεκριμένα τη μέθοδο προετοιμασίας των μεταλλικών επιφανειών και το μήκος επικάλυψης του σύνθετου υλικού. Με τον τρόπο αυτό μελετάται και αξιολογείται η επίδραση της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας του μετάλλου και του μήκους επικάλυψης στην αντοχή ενός κολλητού συνδέσμου χάλυβα – σύνθετου υλικού CFRP.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Σχεδιασμός πειραματικών δοκιμών

#### 2.1 Εισαγωγή

Το πρώτο βήμα για την επιτυχή πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών είναι ο σωστός σχεδιασμός τους και η κατάλληλη επιλογή των απαραίτητων παραμέτρων. Οι παράμετροι που στη συγκεκριμένη περίπτωση κληθήκαμε να λάβουμε υπ' όψιν είναι αρχικά οι διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας των επιφανειών του χάλυβα τις οποίες θέλουμε να συγκρίνουμε μεταξύ τους. Επιπλέον, το είδος του σύνθετου υλικού το οποίο χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή των κολλητών συνδέσμων. Στη συνέχεια, το είδος του κολλητού συνδέσμου, το οποίο επιθυμούμε να μελετήσουμε. Έπειτα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών, τα οποία είναι το μήκος, το πλάτος και το πάχος τους και κατ' επέκταση το πλήθος των δοκιμών τα οποία χρησιμοποιήσαμε για τις πειραματικές δοκιμές. Τέλος, οι συνθήκες φόρτισης κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε σε αυτές τις παραμέτρους και θα εξηγήσουμε τους λόγους της τελικής επιλογής τους.

#### 2.2 Επιλογή μεθόδων επιφανειακής επεξεργασίας χάλυβα

Εφ' όσον ο στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας του χάλυβα σε κολλητούς συνδέσμους χάλυβα – σύνθετου υλικού, επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι επιφανειακής επεξεργασίας των πλακών χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν. Οι χαλύβδινες πλάκες κατασκευάστηκαν από το ισπανικό ινστιτούτο AIMEN (Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste) (aimen.es). Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν καθαρισμένος και λειασμένος ναυπηγικός χάλυβας κατηγορίας A. Οι μέθοδοι επιφανειακής επεξεργασίας που επιλέχθηκαν ήταν δύο μέθοδοι επεξεργασίας με laser, μία με αμμοβολή και μία μέθοδος με το χέρι και συγκεκριμένα με γυαλόχαρτο. Οι τρεις πρώτες πραγματοποιήθηκαν από το ινστιτούτο AIMEN και η τελευταία στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Όσον αφορά στις δύο επιφανειακές κατεργασίες του χάλυβα με τη χρήση laser, αυτές πραγματοποιήθηκαν με τα παρακάτω χαρακτηριστικά. Το laser που χρησιμοποιήθηκε ήταν Trufiber 400 με μήκος κύματος ( $\lambda$ ) 1070 $\pm$ 10 nm, δηλαδή κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία, συνεχούς κύματος και με κεφαλή σαρωτή PFO, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Και στις δύο περιπτώσεις επιφανειακής επεξεργασίας με laser, επιτεύχθηκαν επιφάνειες με θετική τραχύτητα με διαφορετική μικροδομή η κάθε μία και με ελάχιστη τραχύτητα τα 100  $\mu\text{m}$ .

Το πρώτο βήμα ήταν ο προγραμματισμός των διαφορετικών σχεδίων και διαστάσεων για κάθε μία από τις δύο μικροδομές που κατασκευάστηκαν για τους δύο διαφορετικούς τύπους επιφανειών και στη συνέχεια η επαλήθευση αυτών επάνω στο υλικό εργασίας, ρυθμίζοντας την ισχύ και την ταχύτητα του laser. Για κάθε μία από τις επιλεγμένες μικροδομές προγραμματίστηκαν διαφορετικοί τύποι από πλέγματα, με διαφορετικές αποστάσεις στις σειρές και τις στήλες της μικροδομής. Αυτό έγινε με σκοπό να εκτιμηθεί η επίδραση των διαφορετικών πλεγμάτων πρώτον ως προς τα διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας στην κατεργασμένη επιφάνεια, δεύτερον στη μορφολογία της επιφάνειας που προέκυπτε, και τρίτον στο χρόνο της κατεργασίας.



**Σχήμα 2.1:** Laser Trufiber 400 (directindustry.com)

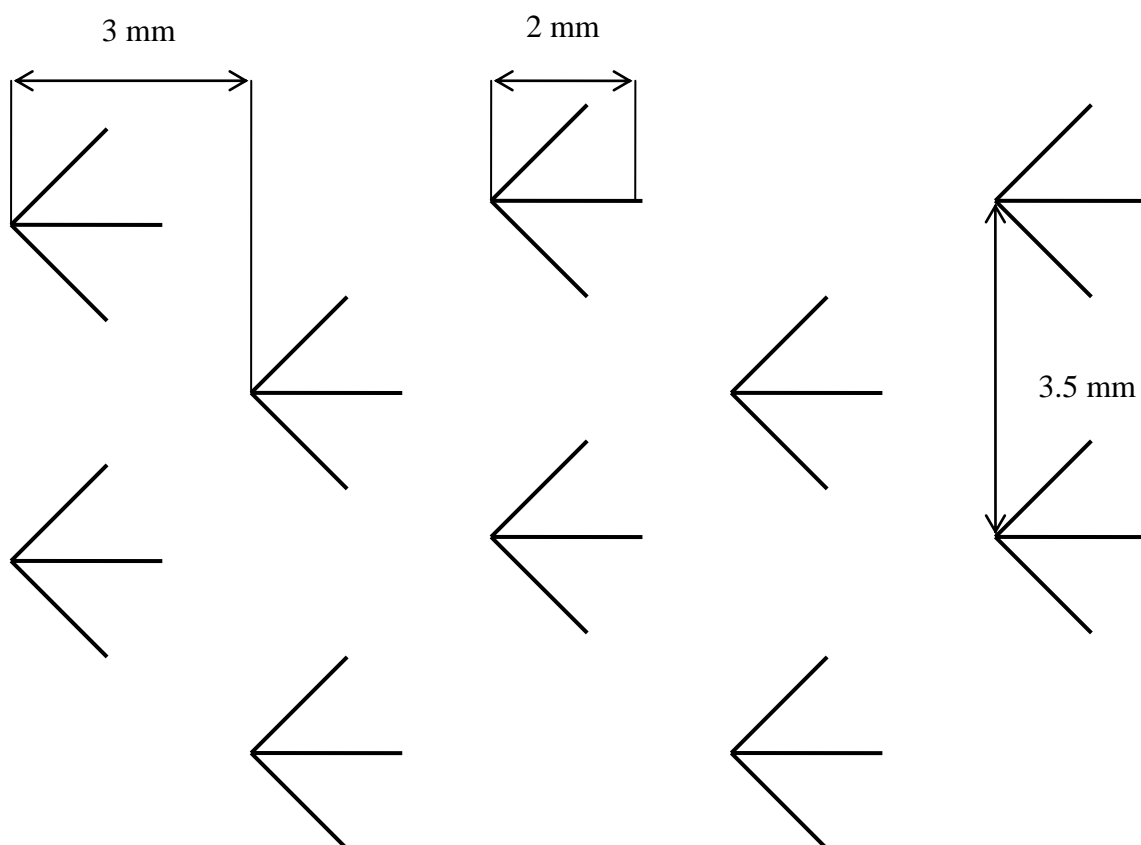
Η πρώτη επιφανειακή μέθοδος επεξεργασίας με χρήση laser, την οποία ονομάζουμε Α, οδήγησε στη δημιουργία μικροδομής, η οποία σχηματίζεται από τρεις ευθείες, μία κεντρική και δύο πλάγιες, οι οποίες τέμνονται στο ίδιο σημείο, σχηματίζοντας μία γεωμετρική διάταξη, η οποία έχει σχήμα άκρου τόξου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή τραχύτητα, η οποία σχετίζεται με το ύψος του αναγλύφου της επιφάνειας, πραγματοποιήθηκαν από το ινστιτούτο AIMEN δοκιμές με διαφορετικές διαστάσεις του αρχικού σχεδίου και διαφορετικές παραμέτρους laser, δηλαδή διαφορετική ισχύ και διαφορετική ταχύτητα σάρωσης. Τελικά διαπιστώθηκε ότι η επιθυμητή τραχύτητα με το δεδομένο σχήμα της μικροδομής επετεύχθη με τις εξής παραμέτρους, με τις οποίες έγινε και η τελική επεξεργασία των πλακών χάλυβα για την περίπτωση Α: ισχύς ίση με 350 W, ταχύτητα σάρωσης ίση με 300 mm/sec, 7 πάσα του εργαλείου σε κάθε σημείο και θέση εστίασης 0 mm πάνω στην επιφάνεια.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την επιφανειακή κατεργασία μίας επιφάνειας χάλυβα διαστάσεων 100x500 mm με τη μέθοδο Α, χαράχτηκαν 33 στήλες σχεδίων της μικροδομής κατά τη διάσταση των 100 mm και 143 σειρές σχεδίων μικροδομής κατά τη διάσταση των 500 mm, δηλαδή ουσιαστικά χαράχτηκαν 4719 σχέδια της μικροδομής. Η απόσταση των στηλών μεταξύ τους ήταν σταθερή, όπως και η απόσταση των σειρών μεταξύ τους σε κάθε στήλη. Η μόνη διαφορά στο μοτίβο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ότι στην 1<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> κ.ο.κ. στήλη, η πρώτη σειρά ξεκινούσε από το ίδιο σημείο ως προς το μήκος, δηλαδή τη διεύθυνση των 500 mm, ενώ στη 2<sup>η</sup>, 4<sup>η</sup>, 6<sup>η</sup> κ.ο.κ. στήλη, η πρώτη σειρά ξεκινούσε από το

μέσο της απόστασης των δύο πρώτων σειρών των γειτονικών στηλών, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.2. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται λεπτομερώς η κατανομή των σχεδίων της μικροδομής, τόσο οι διαστάσεις κάθε σχεδίου, όσο και οι αποστάσεις μεταξύ τους. Το μέγεθος κάθε μίας από τις 3 γραμμές που σχηματίζουν το άκρο τόξου ισούται με 2 mm, η απόσταση των στηλών κάθε σειράς μεταξύ τους ισούται με 3 mm, όπως και η απόσταση ανάμεσα στις σειρές κάθε στήλης.



Σχήμα 2.2: Άποψη της επιφάνειας θετικής τραχύτητας A και κατανομή της μικροδομής



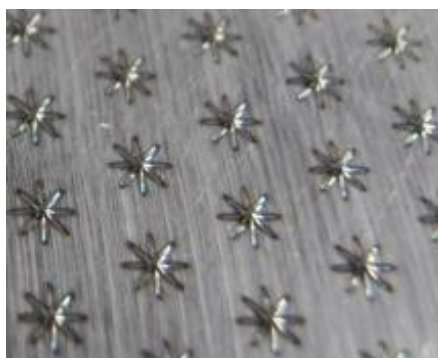
Σχήμα 2.3: Λεπτομέρεια κατανομής και διαστάσεις της μικροδομής A

Κατά τη χάραξη κάθε σχεδίου της μικροδομής, το πέρασμα του εργαλείου γινόταν 7 φορές σε κάθε θέση για την επίτευξη της επιθυμητής τραχύτητας. Η παραπάνω διαδικασία για την επιφανειακή κατεργασία της μίας πλευράς των προηγούμενων διαστάσεων για μία πλάκα χάλυβα διήρκεσε μία ώρα και τριάντα λεπτά, ενώ συνολικά η διαδικασία για μία πλάκα διήρκεσε τρεις ώρες, αφού ζητήθηκε η κατεργασία και στις δύο πλευρές των πλακών χάλυβα.

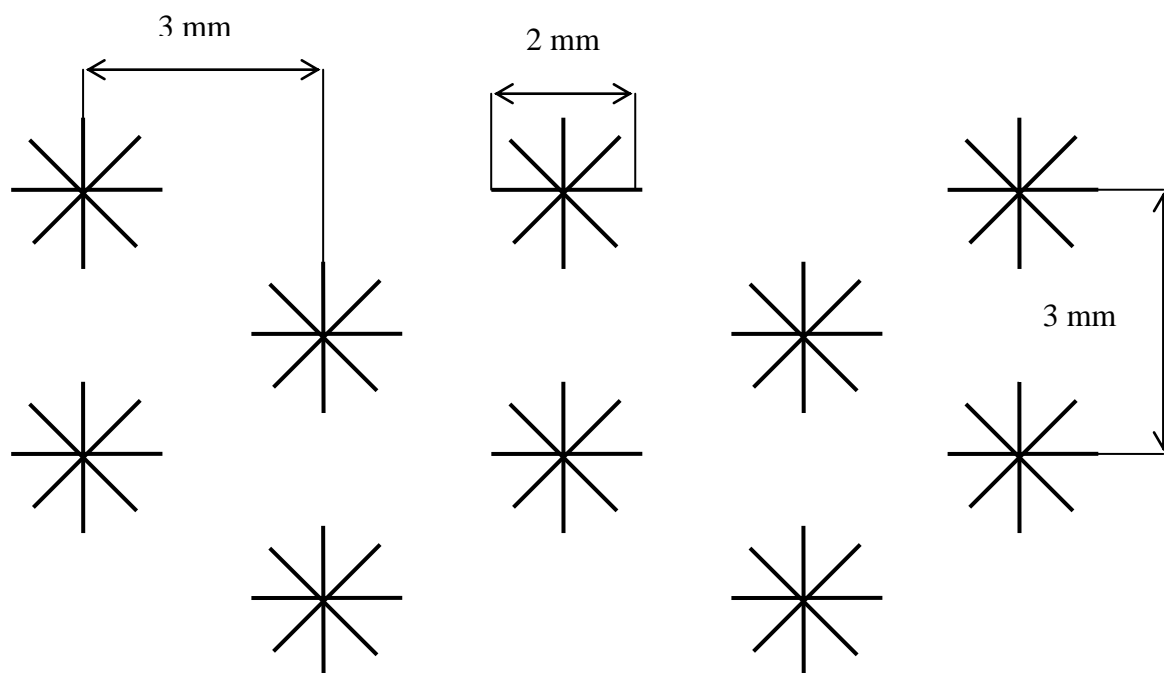
Όσον αφορά στη δεύτερη μέθοδο επιφανειακής κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκε, την οποία ονομάζουμε B, αυτή οδηγεί στη δημιουργία μικροδομής, η οποία αποτελείται από οχτώ ευθείες, οι οποίες συγκλίνουν όλες στο ίδιο σημείο, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό έναν αστερίσκο, ο οποίος αποτελείται από οχτώ ευθείες γραμμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Και στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιήθηκαν από το ινστιτούτο AIMEN δοκιμές με διαφορετικές διαστάσεις του αρχικού σχήματος και διαφορετικές παραμέτρους της κατεργασίας, προκειμένου να ευρεθούν αυτές οι παράμετροι, οι οποίες κατέληξαν στην επιθυμητή τραχύτητα. Οι τελικές παράμετροι λοιπόν, σύμφωνα με τις οποίες επετεύχθη η επιθυμητή τραχύτητα, ήταν 110 W για την ισχύ του laser, 368 mm/sec για την ταχύτητα σάρωσης, 8 πάσα του εργαλείου σε κάθε θέση και 0 mm η θέση εστίασης πάνω στην επιφάνεια.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την επιφανειακή κατεργασία μίας επιφάνειας χάλυβα διαστάσεων 100x500 mm με τη μέθοδο B, χαράχτηκαν 33 στήλες σχεδίων της μικροδομής κατά τη διάσταση των 100 mm και 167 σειρές σχεδίων μικροδομής κατά τη διάσταση των 500 mm, δηλαδή ουσιαστικά χαράχτηκαν 5511 σχέδια της μικροδομής. Όσον αφορά στην κατανομή των μικροδομών επάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια, και σε αυτή την περίπτωση, η απόσταση των στηλών μεταξύ τους ήταν σταθερή, όπως και η απόσταση των σειρών μεταξύ τους σε κάθε στήλη. Επιπλέον, και με αυτή τη μέθοδο κατεργασίας, στην 1<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> κ.ο.κ. στήλη, η πρώτη σειρά ξεκινούσε από το ίδιο σημείο ως προς το μήκος ενώ στη 2<sup>η</sup>, 4<sup>η</sup>, 6<sup>η</sup> κ.ο.κ. στήλη, η πρώτη σειρά ξεκινούσε από το μέσο της απόστασης των δύο πρώτων σειρών των γειτονικών στηλών, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.4. Ο λόγος που και στις δύο περιπτώσεις επιφανειακής επεξεργασίας ακολουθήθηκε αυτή η κατανομή των μικροδομών ήταν προκειμένου να προκύπτουν όσο το δυνατόν μικρότερα κενά ανάμεσα στις σειρές και τις στήλες που σχηματίζονταν από τα αντίστοιχα σχέδια. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται λεπτομερώς η κατανομή των σχεδίων της μικροδομής, τόσο οι διαστάσεις κάθε σχεδίου, όσο και οι αποστάσεις μεταξύ τους. Το μέγεθος κάθε μίας από τις 6 γραμμές που σχηματίζουν τον αστερίσκο ισούται με 2 mm, η απόσταση των στηλών κάθε σειράς μεταξύ τους ισούται με 3 mm, ενώ η απόσταση ανάμεσα στις σειρές κάθε στήλης ισούται με 3.5 mm.

Σε αυτή τη δεύτερη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας με laser, κατά τη χάραξη κάθε σχεδίου της μικροδομής, το πέρασμα του εργαλείου γινόταν 8 φορές σε κάθε θέση για την επίτευξη της επιθυμητής τραχύτητας. Η παραπάνω διαδικασία για την επιφανειακή κατεργασία της μίας πλευράς των προηγούμενων διαστάσεων για μία πλάκα χάλυβα διήρκεσε δύο ώρες, ενώ συνολικά η διαδικασία για μία πλάκα διήρκεσε τέσσερις ώρες, αφού ζητήθηκε η κατεργασία και στις δύο πλευρές των πλακών χάλυβα.



Σχήμα 2.4: Άποψη της επιφάνειας θετικής τραχύτητας B και κατανομή της μικροδομής



Σχήμα 2.5: Λεπτομέρεια κατανομής και διαστάσεις της μικροδομής B

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους επιφανειακής επεξεργασίας με laser, μπορούμε να κάνουμε μια παρατήρηση σε σχέση με την ομοιομορφία της κατανομής των μικροδομών. Συγκεκριμένα, με τη μέθοδο A, η μικροδομή που έχει σχήμα άκρου τόξου δεν χαρακτηρίζεται από τόση ομοιομορφία σε σχέση με τη μικροδομή της μεθόδου B, που έχει σχήμα αστερίσκου και έχει την ίδια μορφή προς όλες τις κατευθύνσεις. Ωστόσο, όσον αφορά στη μέθοδο A, μία παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως σε όλες τις πλάκες με τη συγκεκριμένη μέθοδο, τα σχήματα της μικροδομής έχουν την ίδια φορά, με την κορυφή του τόξου να «κοιτάει» σε κάθε περίπτωση προς την ακατέργαστη επιφάνεια κάθε πλάκας. Όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια, αυτή είναι και η φορά άσκησης της δύναμης σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στον οποίο θα υποβληθούν όλα τα δοκίμια. Αυτή η ομοιομορφία στη φορά των σχημάτων της μικροδομής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ερμηνεία των αντοχών που θα παρουσιάσουν τα δοκίμια στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί οι δύο μέθοδοι laser.

Η τρίτη μέθοδος επιφανειακής επεξεργασίας των πλακών χάλυβα που χρησιμοποιήσαμε ήταν η αμμοβολή προδιαγραφών SA 2½.

Η τέταρτη μέθοδος για την επεξεργασία των πλακών χάλυβα ήταν με χρήση δίσκου λείανσης (γυαλόχαρτου) και αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε αντίθεση με τις τρεις προηγούμενες που πραγματοποιήθηκαν από την εταιρία ΑΙΜΕΝ. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται το γυαλόχαρτο που χρησιμοποιήθηκε της εταιρίας BOSCH με κωδικό EN 13743, P120 (η τιμή αντιστοιχεί στην κόκκωση του δίσκου) και διάμετρο δίσκου 100 mm. Το γυαλόχαρτο προσαρμόστηκε σε ηλεκτρικό λειαντήρα της εταιρίας BOSCH με κωδικό προϊόντος GWS 14-125 C (Σχήμα 2.7) με ταχύτητα περιστροφής ίση με 11000 rpm, ονομαστική ισχύ ίση με 1400 W και διάμετρο δίσκου 125 mm, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επεξεργασία των επιθυμητών επιφανειών.



**Σχήμα 2.6:** Γυαλόχαρτο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας με το χέρι



**Σχήμα 2.7:** Ηλεκτρικός λειαντήρας που χρησιμοποιήθηκε για τη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας με το χέρι (bosch.gr)



## 2.3 Επιλογή είδους σύνθετου υλικού

Για την κατασκευή του σύνθετου υλικού, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τις πειραματικές μας δοκιμές, επιλέξαμε να κάνουμε χρήση ινών άνθρακα ως ενισχυτικό μέσο και εποξικής ρητίνης ως μήτρα, δηλαδή να χρησιμοποιήσουμε ένα σύνθετο υλικό CFRP, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1. Για λόγους πληρότητας, επαναλαμβάνουμε εδώ τα κύρια πλεονεκτήματα χρήσης ενός σύνθετου υλικού με πολυμερική μήτρα και ίνες άνθρακα σε έναν κολλητό σύνδεσμο, τα οποία είναι ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και σε περιβαλλοντική υποβάθμιση, η ευελιξία που παρέχουν και η χαμηλή πυκνότητά τους.

Γενικά, οι ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται από ένα πολύ καλό μέτρο δυσκαμψίας σε σχέση με τις ίνες γυαλιού και συνοδεύονται από ένα πιο λογικό κόστος σε σχέση με τις αραμιδικές ίνες. Οι αντοχές τους μπορεί να κυμαίνονται από 1500 έως 4500 MPa. Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν την εποξική ρητίνη κατάλληλη για χρήση σε κολλητούς συνδέσμους με χάλυβα είναι οι πολύ καλές της μηχανικές ιδιότητες και η καλή αντίσταση που παρουσιάζει στο νερό, γεγονός που είναι πολύ χρήσιμο σε ναυπηγικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια, θα γίνει μία πλήρης περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σύνθετου υλικού όπως επίσης και παράθεση των ιδιοτήτων τους. Τα υλικά και οι ιδιότητες τους, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σύνθετου υλικού είναι τα εξής:

### 1. Ρητίνη - Σκληρυντής : R9330 / H9054 Epoxy system της εταιρείας FIBERMAX

**Πίνακας 2.1:** Μηχανικές ιδιότητες εποξικής ρητίνης R9330

Tensile Strength (MPa)	60
Tensile Modulus (GPa)	2.7
Elongation at Break (tension) (%)	3.8
Flexural Strength (MPa)	108
Flexural Modulus (GPa)	2.97
Elongation at Break (flexion) (%)	11.8

**Πίνακας 2.2:** Χημικές – φυσικές ιδιότητες ρητίνης R9330 και σκληρυντή H9054

<b>Epoxy resin R9330</b>	
Aspect / Color	Yellow liquid
Viscosity (mPa.s at 25°C)	785 ± 100
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.16
<b>Hardener H9054</b>	
Aspect / Color	Light yellow liquid
Viscosity (mPa.s at 25°C)	5 ± 2
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.94
<b>R9330 / H9054 mix.</b>	
Mix. viscosity (mPa.s at 25°C)	285 ± 100
Mixing ratio by weight	100 g / 22 g
Mixing ratio by volyme	100 ml / 27 ml

**Πίνακας 2.3:** Διάρκεια πολυμερισμού συναρτήσει θερμοκρασίας

Temperature	Duration
40° C	1h 7m
60° C	26 m
80° C	10 m

**2. Ίνες : C322U Carbon fiber fabric** της εταιρείας FIBERMAX

**Πίνακας 2.4:** Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα C322U

Material	Areal Weight (g/m <sup>2</sup> )	Weaving Style	Warp	Weft
Carbon fiber fabric	322	Unidirectional, woven	12K TR50S carbon fiber, 94%, 3.80 ends (threads) / cm	Glass thermoplastic 6%, 1.60 ends (threads) / cm

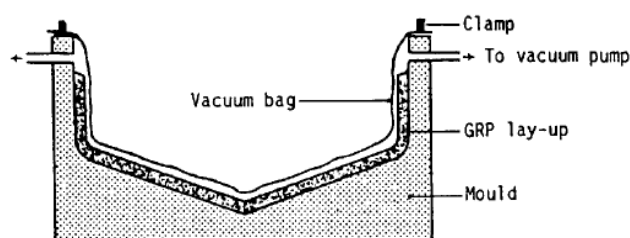
**Πίνακας 2.5:** Μηχανικές ιδιότητες ινών άνθρακα C322U

Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)	Typical Density (g/cm <sup>3</sup> )	Typical Yield (mg/m)
4900	240	2.0	1.82	800

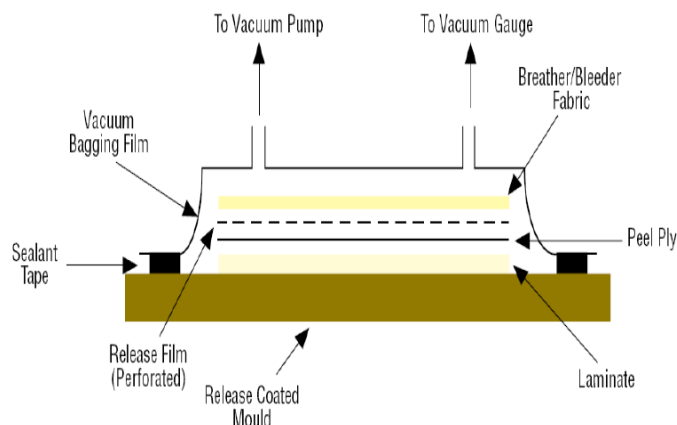
Στα πολύστρωτα που κατασκευάστηκαν επάνω στα χαλύβδινα τμήματα, όλες οι στρώσεις των ινών άνθρακα ήταν μονοαξονικά διευθετημένες στις 0° ως προς το πλάτος των μεταλλικών πλακών και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους ήταν η μέθοδος μορφοποίησης με πίεση με σάκο κενού (vacuum bagging).

Με τις μεθόδους μορφοποίησης με πίεση, σε γενικές γραμμές επιβάλλεται πίεση και προσδίδεται θερμότητα στο μη στερεοποιημένο πολύστρωτο, του οποίου η κατασκευή έχει προηγηθεί, προσθέτοντας μία μία τις στρώσεις του ενισχυτικού μέσου και εμποτίζοντάς τες σε κάθε ενδιάμεσο βήμα με τη ρητίνη, φροντίζοντας έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη διαβροχή των ινών. Με τις μεθόδους μορφοποίησης με πίεση επιτυγχάνεται αυξημένη περιεκτικότητα σε ίνες καθώς απομακρύνεται μέσω της πίεσης η περίσσεια της ρητίνης με την οποία εμποτίζονται οι ίνες, και επιπλέον μειώνονται τα κενά αέρα.

Στη μέθοδο vacuum bagging το πολύστρωτο επικαλύπτεται με ένα ελαστικό διάφραγμα, κάτω από το οποίο δημιουργείται κενό και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται στερεοποίηση του πολύστρωτου. Στα Σχήματα 2.8 και 2.9 απεικονίζεται σχηματικά η μέθοδος vacuum bagging.



**Σχήμα 2.8:** Μέθοδος vacuum bagging (Τσούβαλης 1998)



Σχήμα 2.9: Μέθοδος vacuum bagging (netcomposites.com)

## 2.4 Επιλογή είδους κολλητού συνδέσμου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν διάφορα είδη κολλητών συνδέσμων χάλυβα – σύνθετου υλικού. Στις πειραματικές μας δοκιμές, αποφασίσαμε να κατασκευάσουμε κολλητούς συνδέσμους τύπου double – strap. Το αρχικό δίλημμα που προέκυψε ήταν η χρήση είτε συνδέσμων τύπου single – strap, είτε συνδέσμων τύπου double – strap, είτε χρήση και των δύο συνδέσμων. Ο λόγος που τελικά επιλέχτηκε το δεύτερο είδος κολλητών συνδέσμων αφορούσε κυρίως το είδος των μορφών αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί πειραματικά από άλλους ερευνητές για αυτού του είδους τους κολλητούς συνδέσμους.

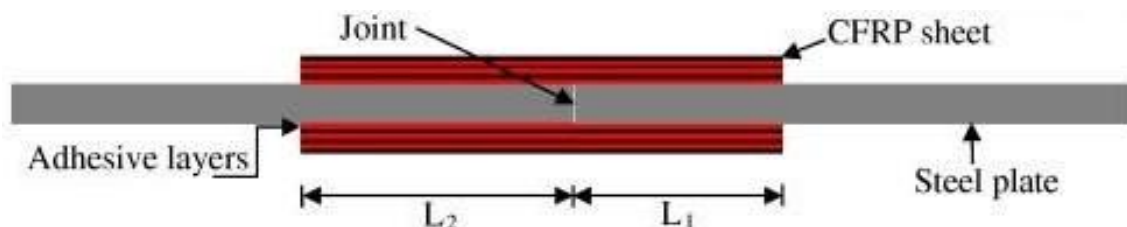
Γενικά, οι τρόποι αστοχίας κολλητών συνδέσμων χάλυβα – σύνθετου υλικού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- αποκόλληση στη διεπιφάνεια χάλυβα – κολλητικού μέσου
- αστοχία στο στρώμα του κολλητικού μέσου (cohesive failure)
- αποκόλληση στη διεπιφάνεια σύνθετου υλικού – κολλητικού μέσου
- αποκόλληση στρώσεων στο ίδιο το σύνθετο υλικό, δηλαδή το πολύστρωτο (delamination)
- αστοχία του σύνθετου υλικού σε εφελκυσμό, δηλαδή υπέρβαση της αντοχής του σύνθετου υλικού σε εφελκυσμό και
- αστοχία του ίδιου του χάλυβα. (Zhao et al 2007)

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Al-Zubaidy et al 2012) (Lee et al 2009), το συνηθέστερο είδος αστοχίας σε κολλητούς συνδέσμους τύπου double – strap, είναι η αποκόλληση ανάμεσα στο σύνθετο υλικό και το κολλητικό μέσο, όπου πολλές φορές μπορεί και να υπάρχουν σημάδια από ίνες που έχουν αποχωριστεί από το πολύστρωτο και έχουν απομείνει πάνω στο κολλητικό μέσο. Αρκετές φορές όμως αναλόγως με τις συνθήκες των πειραματικών δοκιμών, μπορεί να εμφανιστούν και άλλα είδη αστοχίας.

Λαμβάνοντας υπ’ όψιν τα προηγούμενα, αλλά και το γεγονός ότι κατασκευαστικά οι κολλητοί σύνδεσμοι τύπου double – strap εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα σε σχέση με τους κολλητούς συνδέσμους τύπου single – strap, οι οποίοι παρουσιάζουν φαινόμενα

κάμψης, καταλήξαμε στην κατασκευή κολλητών συνδέσμων του πρώτου τύπου. Επομένως, οι σύνδεσμοι που κατασκευάσαμε έχουν τη γενική μορφή του Σχήματος 2.10, με τις δύο πλάκες χάλυβα να ενώνονται μεταξύ τους και με το σύνθετο υλικό να καταλαμβάνει ένα τμήμα της επάνω και της κάτω επιφάνειας της ένωσης. Το σύνθετο υλικό καταλαμβάνει το ίδιο μήκος τόσο στην επάνω όσο και στην κάτω επιφάνεια της ένωσης των δύο μεταλλικών πλακών.



Σχήμα 2.10: Κολλητός σύνδεσμος χάλυβα – σύνθετου υλικού τύπου double – strap

## 2.5 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών δοκιμών και ονοματολογία

Έχοντας επιλέξει να κατασκευάσουμε κολλητούς συνδέσμους χάλυβα – σύνθετου υλικού τύπου double – strap, σειρά έχει η επιλογή των διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών τόσο των συνδέσμων που θα κατασκευαστούν, όσο και των δοκιμών που θα προκύψουν από αυτούς.

Η πρώτη επιλογή έχει να κάνει με την επικάλυψη (overlap) του σύνθετου υλικού στους κολλητούς συνδέσμους, δηλαδή με το μήκος το οποίο καταλαμβάνει το σύνθετο υλικό στην επάνω και την κάτω πλευρά κάθε μίας από τις δύο πλάκες χάλυβα. Στο σχήμα 2.10, η επικάλυψη του σύνθετου υλικού αντιστοιχεί στα μεγέθη  $L_1$  και  $L_2$ . Στη δική μας περίπτωση, αυτά τα δύο μεγέθη είναι ίσα, δηλαδή το σύνθετο υλικό έχει την ίδια επικάλυψη και στις δύο πλάκες χάλυβα, με σημείο αναφοράς την ένωσή τους, δηλαδή τα  $L_1$  και  $L_2$  είναι ίδια και στις δύο πλάκες. Επιπλέον, η επικάλυψη του σύνθετου υλικού είναι η ίδια τόσο στην επάνω όσο και στην κάτω πλευρά της ένωσης των μεταλλικών πλακών. Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση του διαφορετικού μεγέθους επικάλυψης στην αντοχή των κολλητών συνδέσμων, επιλέχθηκε να κατασκευαστούν σύνδεσμοι με δύο διαφορετικές τιμές της επικάλυψης. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν σύνδεσμοι με τιμή επικάλυψης ίση με 50 mm και άλλοι με τιμή ίση με 100 mm.

Έχοντας καταλήξει στην επιλογή του είδους του κολλητού συνδέσμου και των τιμών της επικάλυψης που θα χρησιμοποιήσουμε, καταλήγουμε στην κατασκευή 8 διαφορετικών κολλητών συνδέσμων. Συγκεκριμένα, για κάθε μία από τις τέσσερις διαφορετικές μεθόδους επιφανειακής επεξεργασίας των μεταλλικών μερών, δηλαδή των πλακών χάλυβα, κατασκευάστηκαν δύο διαφορετικοί σύνδεσμοι, ένας με επικάλυψη του σύνθετου υλικού ίση με 50 mm και ένας με επικάλυψη ίση με 100 mm. Ο συμβολισμός που θα χρησιμοποιούμε στο εξής για τους συνδέσμους αυτούς θα αποτελείται από δύο μέρη.

Το πρώτο θα είναι ένα από τα γράμματα A, B, S και H. Με A και B θα συμβολίζονται οι σύνδεσμοι των οποίων οι μεταλλικές πλάκες έχουν υποστεί επεξεργασία με μία από τις δύο διαφορετικές μεθόδους laser, δηλαδή αυτή που δημιουργεί μικροδομή σχήματος άκρου τόξου και αυτή που δημιουργεί μικροδομή σχήματος αστερίσκου αντίστοιχα. Με S συμβολίζονται οι σύνδεσμοι των οποίων οι χαλύβδινες πλάκες έχουν υποστεί επεξεργασία με αμμοβολή και με H αυτοί στους οποίους έχουμε χρησιμοποιήσει γυαλόχαρτο για την επιφανειακή επεξεργασία των πλακών χάλυβα.

Το δεύτερο τμήμα της ονομασίας είναι ένας από τους αριθμούς 50 και 100, ο οποίος αναφέρεται στο μήκος  $L_1$  (ή  $L_2$ ) σε mm του σχήματος 2.10 και κατ' επέκταση στο διαφορετικό μήκος επικάλυψης με το οποίο έχουν κατασκευαστεί οι σύνδεσμοι.

Επομένως, οι σύνδεσμοι που κατασκευάσαμε είναι οι A-50, B-50, S-50, H-50, A-100, B-100, S-100 και H-100. Για παράδειγμα, η ονομασία A-50 αναφέρεται στο σύνδεσμο τύπου double – strap, στον οποίο οι δύο πλάκες χάλυβα έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με την πρώτη μέθοδο laser που αναφέρθηκε προηγουμένως και το αντίστοιχο μήκος  $L_1$  (ή  $L_2$ , βλέπε Σχήμα 2.10) ισούται με 50 mm, ή αλλιώς η επικάλυψη ισούται με 50 mm.

Προκειμένου να επιτύχουμε ομοιομορφία από κατασκευαστικής απόψεως για όλα τα δοκίμια με ίδια επιφανειακή επεξεργασία των χαλύβδινων πλακών και ίδιο μήκος επικάλυψης, αποφασίστηκε όλα τα δοκίμια που έχουν ίδιες τις δύο προηγούμενες παραμέτρους να προκύψουν από την ίδια πλάκα. Με άλλα λόγια, προκειμένου να μην κατασκευάζεται κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, τόσο για λόγους ομοιομορφίας αλλά και για εξοικονόμηση χρόνου, αποφασίστηκε όλα τα δοκίμια με ίδια επιφανειακή επεξεργασία και ίδιο μήκος επικάλυψης να προκύψουν από μία πλάκα. Για να κατασκευαστούν λοιπόν τα δοκίμια με τα επιθυμητά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, έπρεπε πρώτα να γίνει η επιλογή των διαστάσεων των μεταλλικών πλακών και του σύνθετου υλικού για την τελική κατασκευή των συνδέσμων, από τους οποίους προέκυψαν τα δοκίμια. Εφ' όσον σκοπός είναι η κατασκευή 8 διαφορετικών συνδέσμων, από το ινστιτούτο AIMEN κατασκευάστηκαν 16 διαφορετικές πλάκες χάλυβα, από τις οποίες κάθε τετράδα αντιστοιχούσε σε μία διαφορετική επιφανειακή επεξεργασία. Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι πλάκες χάλυβα έχουν πάχος ίσο με 6 mm.

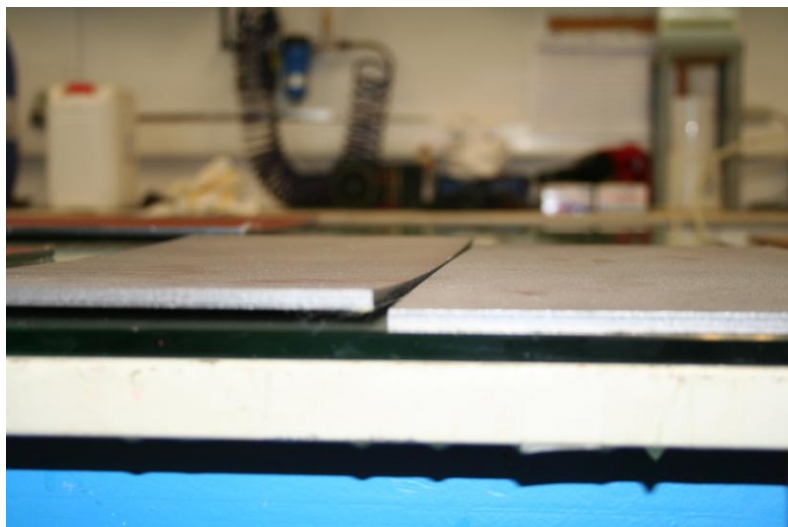
Συνολικά κατασκευάστηκαν 8 πλάκες 200x500 mm, από τις οποίες κάθε ζεύγος αντιστοιχεί σε μία από τις τέσσερις διαφορετικές επιφανειακές επεξεργασίες. Στις δύο πρώτες έχει γίνει επιφανειακή επεξεργασία με την πρώτη μέθοδο laser σε ένα τμήμα 50x500 mm, στις δύο επόμενες επιφανειακή επεξεργασία με τη δεύτερη μέθοδο laser σε τμήμα ίδιων διαστάσεων και στις δύο επόμενες επιφανειακή επεξεργασία με αμμοβολή. Οι δύο τελευταίες ήρθαν χωρίς επιφανειακή επεξεργασία από την εταιρία και πραγματοποιήθηκε στο Ε.Μ.Π. επιφανειακή επεξεργασία με γυαλόχαρτο σε τμήμα ίδιων διαστάσεων. Οι προηγούμενες πλάκες κατασκευάστηκαν για να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των συνδέσμων με επικάλυψη του σύνθετου υλικού ίση με 50 mm, όπως φαίνεται άλλωστε και από το πλάτος της επιφάνειας όπου έχει γίνει επιφανειακή επεξεργασία σε κάθε πλάκα.

Ομοίως, κατασκευάστηκαν 8 πλάκες 250x500 mm, από τις οποίες πάλι σε κάθε ζεύγος έχει γίνει μία από τις τέσσερις διαφορετικές επιφανειακές επεξεργασίες, αυτή τη φορά όμως σε ένα τμήμα 100x500 mm σε κάθε πλάκα. Είναι φανερό ότι αυτές οι πλάκες κατασκευάστηκαν για να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των συνδέσμων με επικάλυψη ίση με 100 mm.

Εδώ θα πρέπει να γίνει μία παρατήρηση σε σχέση με την επιλογή των διαστάσεων των δοκιμίων. Ο αρχικός σχεδιασμός των διαστάσεων των δοκιμίων έγινε με τη λογική ότι όλοι οι σύνδεσμοι θα αποτελούνται από δύο μεταλλικές πλάκες, οι οποίες θα έχουν τόσο το ίδιο μήκος όσο και το ίδιο πλάτος μεταξύ τους. Όπως είδαμε, όλες οι μεταλλικές πλάκες έχουν το ίδιο μήκος ίσο με 500 mm, ενώ όσον αφορά στο πλάτος, στις μισές αυτό είναι ίσο με 200 mm, ενώ στις υπόλοιπες είναι ίσο με 250 mm. Ο σχεδιασμός λοιπόν ήταν οι σύνδεσμοι να αποτελούνται από δύο ίδιες μεταλλικές πλάκες με πλάτος ίσο είτε με 200 mm είτε ίσο με 250 mm, ανάλογα με την επικάλυψη του σύνθετου υλικού. Οι πρώτες προορίζονταν για τα δοκίμια με επικάλυψη ίση με 50 mm, ενώ οι άλλες για αυτά με επικάλυψη ίση με 100 mm. Σε κάθε περίπτωση δηλαδή το ελεύθερο μήκος των δοκιμίων, δηλαδή αυτό που δεν καλύπτεται από σύνθετο υλικό, θα ήταν σταθερό και ίσο με 150 mm σε όλους τους συνδέσμους.

Αυτό έγινε πράγματι για τις πλάκες, οι οποίες είχαν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με τις δύο διαφορετικές μεθόδους laser. Κάτι τέτοιο όμως δεν έγινε τελικά για τις άλλες δύο μεθόδους, αφού όταν εξετάσαμε τις αντίστοιχες μεταλλικές πλάκες που πήραμε από το ινστιτούτο AIMEN, διαπιστώθηκε ότι υπήρχε μεγάλη απόκλιση από την επιπεδότητα στην ένωση των ίδιων πλακών, δηλαδή των πλακών με το ίδιο μήκος. Αυτή η μεγάλη απόκλιση από την επιπεδότητα φαίνεται στο Σχήμα 2.11 για τις δύο πλάκες που είχαν υποστεί αμμοβολή και είχαν ίδιο πλάτος ίσο με 200 mm. Το ίδιο διαπιστώθηκε και για τα υπόλοιπα ζεύγη ίδιων πλακών που είχαν υποστεί επεξεργασία με αμμοβολή ή γυαλόχαρτο. Αυτή η μεγάλη καμπυλότητα των ίδιων πλακών θα οδηγούσε σε ελαττωματική κατασκευή των συνδέσμων, με αποτέλεσμα να μην καταλήγαμε σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, τελικά προτιμήθηκε η ένωση πλακών που να μην είχαν την ίδια επιφανειακή επεξεργασία, αλλά είχαν διαφορετικό πλάτος, η μία δηλαδή ίσο με 200 mm και η άλλη ίσο με 250 mm.

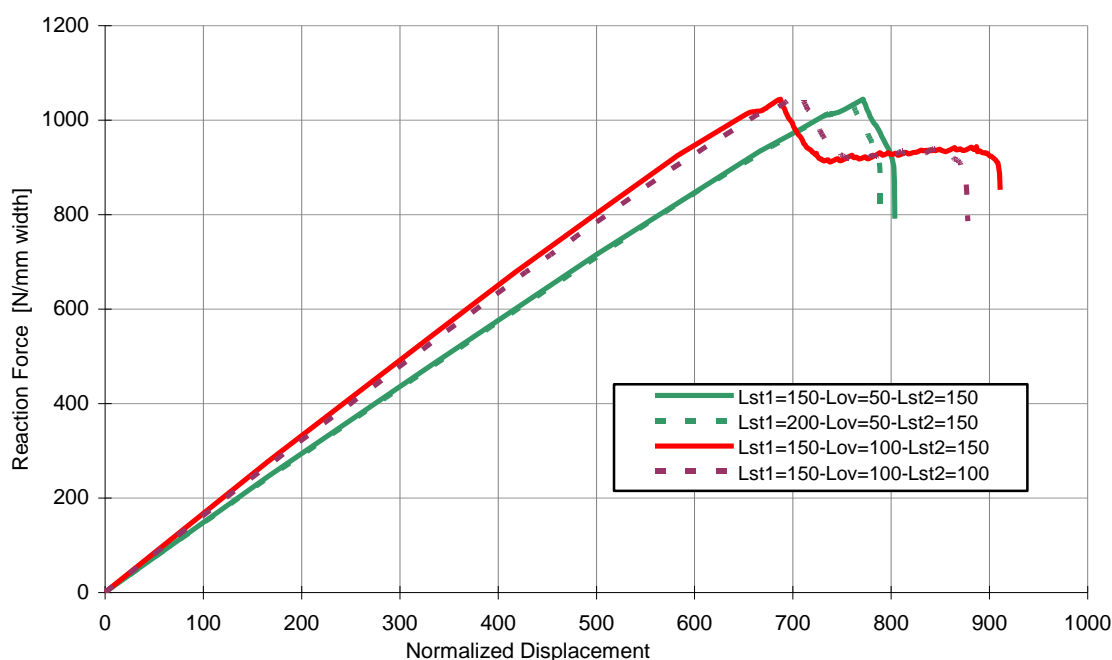
Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε ότι το διαφορετικό πλάτος των μεταλλικών πλακών στους συνδέσμους δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αντοχές των δοκιμίων, έγινε μία μοντελοποίηση των προηγούμενων γεωμετριών και προσομοίωση της δοκιμής τους σε μονοαξονικό εφελκυσμό από τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Κουλουκούρα σε περιβάλλον ANSYS, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο η ανομοιομορφία στα προηγούμενα μεγέθη επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα αντοχής στις πειραματικές δοκιμές των δοκιμίων. Στη μοντελοποίηση εισήχθησαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων των ομάδων S και H, τόσο για μήκος επικάλυψης ίσο με 50 mm, όσο και για μήκος επικάλυψης 100 mm, αλλά και για τις δύο περιπτώσεις όπου τα μήκη των μεταλλικών πλακών είναι ίσα ή διαφορετικά.



**Σχήμα 2.11:** Έντονη απόκλιση από την επιπεδότητα των μεταλλικών πλακών με ίδια επιφανειακή επεξεργασία (αμμοβολή) και ίδιο μήκος

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δηλαδή τα διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης. Ως ανηγμένη μετατόπιση (normalized displacement), ορίζεται ο λόγος της πραγματικής μετατόπισης προς το αρχικό μήκος του εκάστοτε δοκιμίου. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η ανηγμένη και όχι η κανονική μετατόπιση είναι το διαφορετικό αρχικό μήκος των δοκιμίων, επομένως με χρήση της κανονικής μετατόπισης τα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα. Ως  $L_{ov}$  ορίζεται το μήκος επικάλυψης του σύνθετου υλικού επάνω σε κάθε μεταλλική πλάκα, το οποίο είναι ίσο είτε με 50 mm είτε ίσο με 100 mm. Ως  $L_{st1}$  και  $L_{st2}$  ορίζονται τα ελεύθερα μήκη των μεταλλικών πλακών, δηλαδή τα μήκη των χαλύβδινων πλακών τα οποία δεν καλύπτονται από σύνθετο υλικό. Για κάθε τιμή του μήκους επικάλυψης, έχουν οριστεί δύο διαφορετικές περιπτώσεις τιμών των  $L_{st1}$  και  $L_{st2}$ , προκειμένου να μελετηθούν οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις όπου τα ελεύθερα μήκη είναι ίσα ή άνισα. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 50 mm, ενώ με πράσινο χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 100 mm. Με συνεχή γραμμή φαίνεται η περίπτωση στην οποία τα ελεύθερα μήκη των πλακών είναι ίσα για κάθε τιμή του μήκους επικάλυψης, ενώ με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η περίπτωση στην οποία τα ελεύθερα μήκη δεν είναι ίσα.

Παρατηρούμε ότι και για τις δύο τιμές του μήκους επικάλυψης, τα αποτελέσματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης είναι περίπου ίδια, είτε το ελεύθερο μήκος των μεταλλικών πλακών είναι ίδιο είτε διαφορετικό. Έχοντας λοιπόν αυτά τα αποτελέσματα, αποδεικνύεται ότι η ένωση μεταλλικών πλακών με διαφορετικό πλάτος μεταξύ τους δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην αντοχή των συνδέσμων, οπότε καταλήγουμε σε αυτή τη λύση για τις πλάκες S και H που παρουσίασαν την έντονη απόκλιση από την επιπεδότητα για τις πλάκες με ίδιο πλάτος.

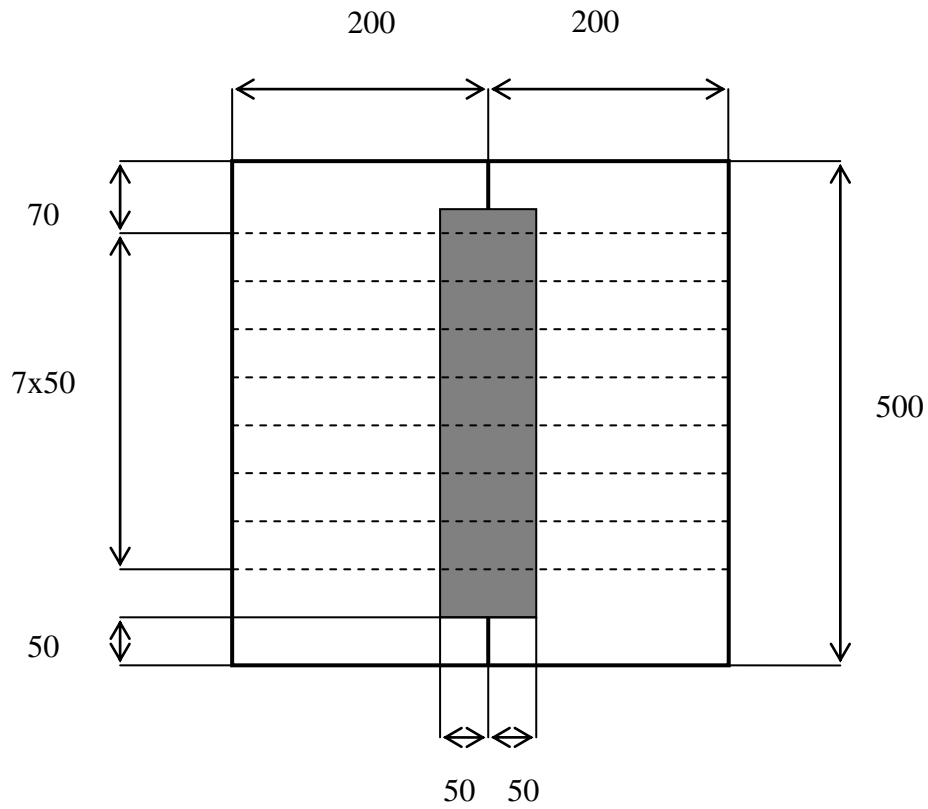


**Σχήμα 2.12:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης που ελήφθησαν από τη μοντελοποίηση σε ANSYS

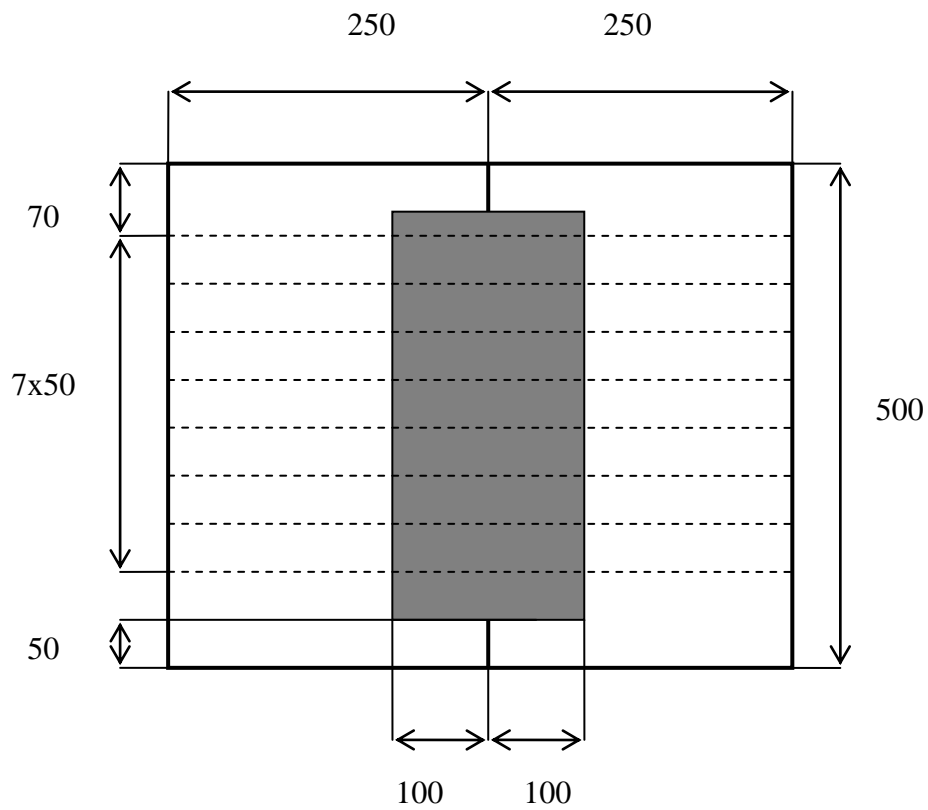
Σύμφωνα λοιπόν με όλα τα προηγούμενα, η κάτοψη όλων των διαφορετικών συνδέσμων που κατασκευάστηκαν και τα δοκίμια που προκύπτουν από κάθε έναν παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.13 – 2.16. Με συνεχείς γραμμές απεικονίζονται οι μεταλλικές πλάκες οι οποίες είναι σε επαφή μεταξύ τους, ενώ με γκριζό χρώμα το τμήμα που καλύπτει το πολύστρωτο επάνω σε αυτές. Σε κάθε ένα από τα σχήματα αντιστοιχεί η κατασκευή δύο συνδέσμων με διαφορετική επεξεργασία των μεταλλικών μερών ο καθένας. Η άνοψη είναι ίδια με την κάτοψη. Παρατηρούμε ότι από κάθε σύνδεσμο τελικά προέκυψαν 7 δοκίμια πλάτους 50 mm, όμοια με αυτά που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.10 ανά περίπτωση.

Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζεται η μορφή των συνδέσμων A-50 και B-50, στο Σχήμα 2.14 αυτή των συνδέσμων A-100 και B-100, στο Σχήμα 2.15 οι σύνδεσμοι S-50 και H-50, ενώ στο Σχήμα 2.16 οι σύνδεσμοι S-100 και H-100. Όλες οι διαστάσεις είναι σε mm.

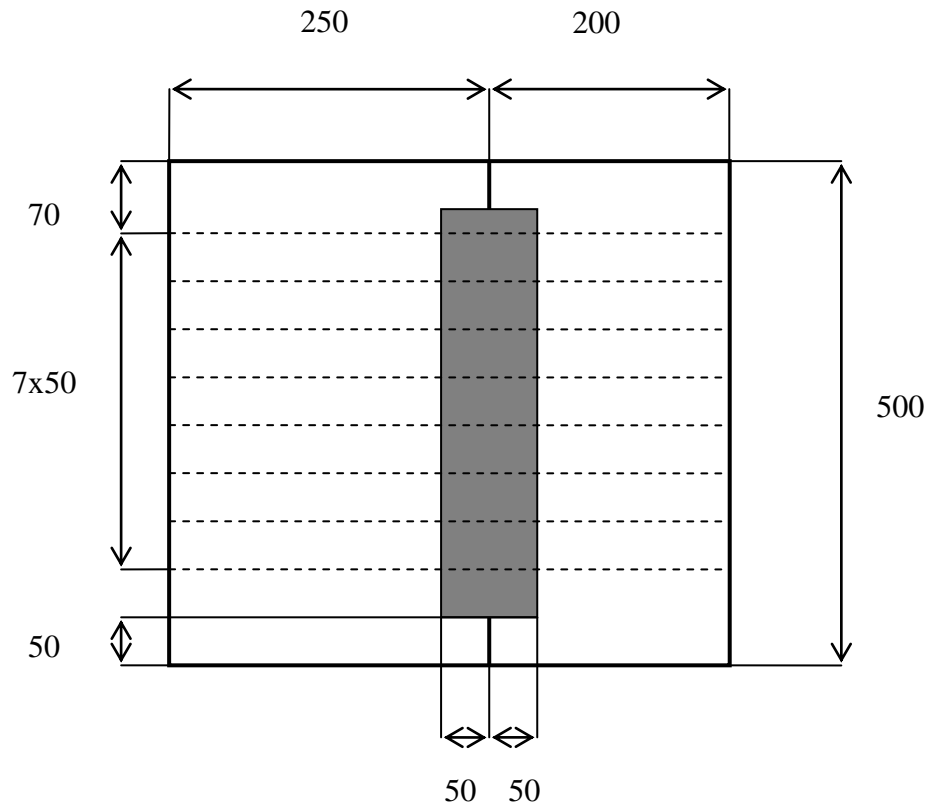




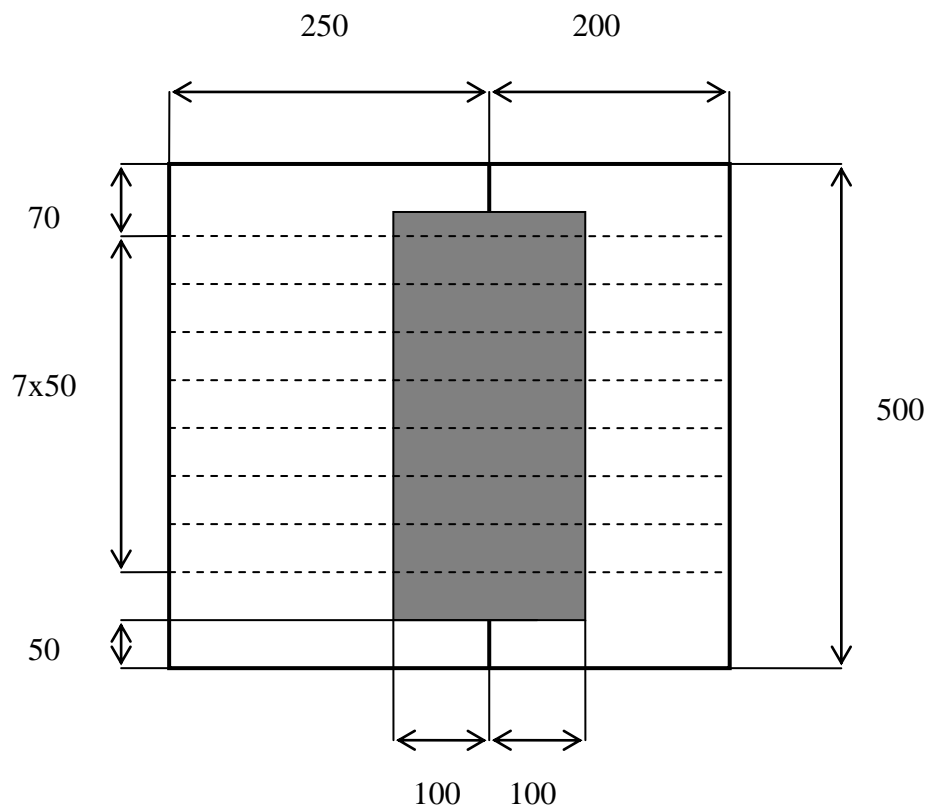
Σχήμα 2.13: Κάτοψη συνδέσμων Α-50 και Β-50



Σχήμα 2.14: Κάτοψη συνδέσμων Α-100 και Β-100

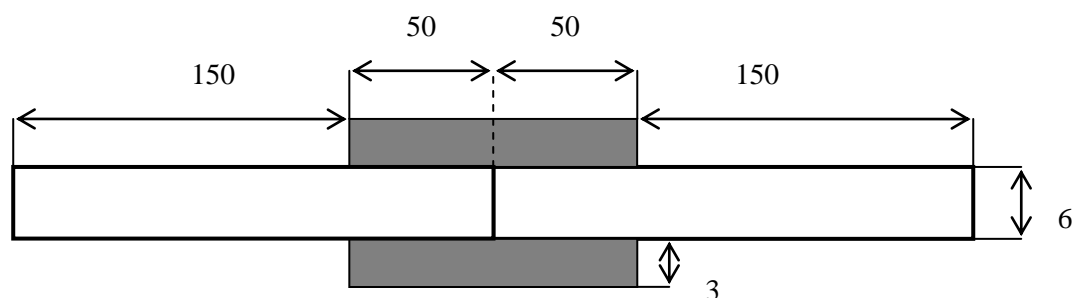


Σχήμα 2.15: Κάτοψη συνδέσμων S-50 και H-50

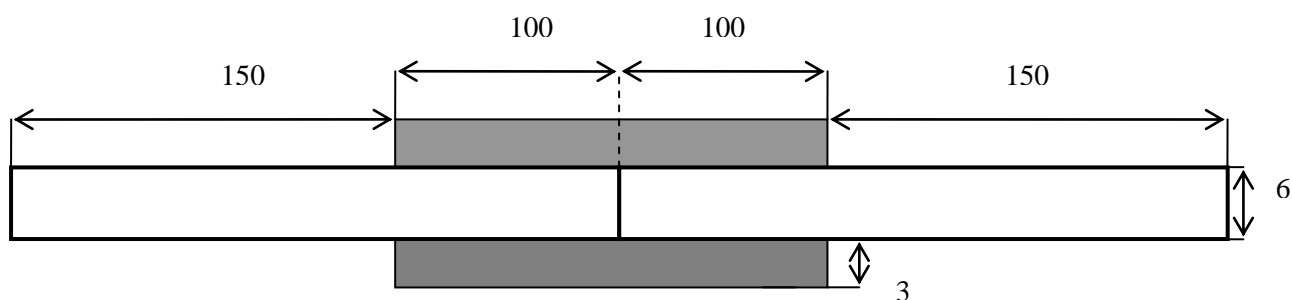


Σχήμα 2.16: Κάτοψη συνδέσμων S-100 και H-100

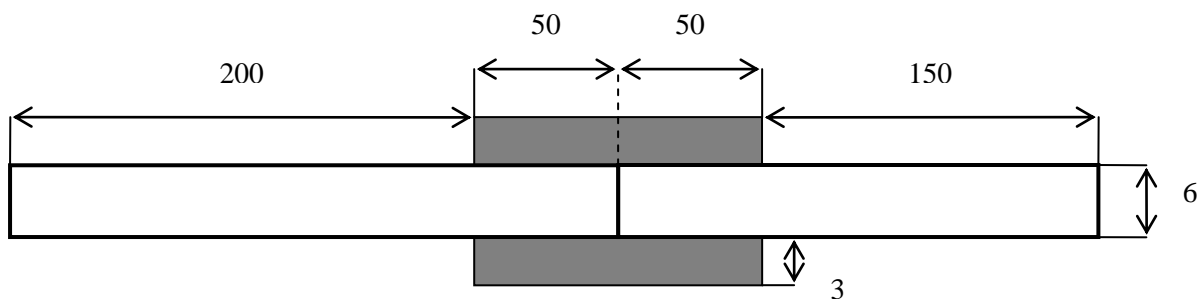
Τα δοκίμια τα οποία προέκυψαν σε κάθε περίπτωση από τους προηγούμενους συνδέσμους με τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους απεικονίζονται στα Σχήματα 2.17 – 2.20. Με συνεχείς γραμμές φαίνονται οι μεταλλικές πλάκες, οι οποίες είναι σε επαφή, και με γκριζό χρώμα το πολύστρωτο, τόσο στη μία όσο και στην άλλη πλευρά των πλακών. Οι τιμές 50 και 100 ανά περίπτωση αναφέρονται στο μήκος επικάλυψης του πολύστρωτου επάνω στις χαλύβδινες πλάκες, ενώ οι τιμές 150 και 200 αναφέρονται στο ελεύθερο μήκος των μεταλλικών πλακών, αυτό δηλαδή που δεν καλύπτεται από σύνθετο υλικό, αναφορικά πάντα με το συνολικό μήκος των χαλύβδινων πλακών, το οποίο φάνηκε ανά περίπτωση στα προηγούμενα σχήματα. Όλες οι διαστάσεις είναι σε mm. Όσον αφορά στο πλάτος κάθε δοκιμίου, το οποίο δεν φαίνεται στο σχήμα, αυτό ισούται με 50 mm. Επιπλέον, το πάχος κάθε πλάκας χάλυβα είναι ίσο με 6 mm. Όσον αφορά στο πάχος του σύνθετου υλικού σε κάθε μία από τις δύο επιφάνειες των μεταλλικών πλακών, αυτό επιλέχθηκε με βάση τα αποτελέσματα μιας αρχικής πειραματικής δοκιμής που διεξήχθη για το χαρακτηρισμό του πολύστρωτου και θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το πάχος του σύνθετου υλικού είναι περίπου 3 mm.



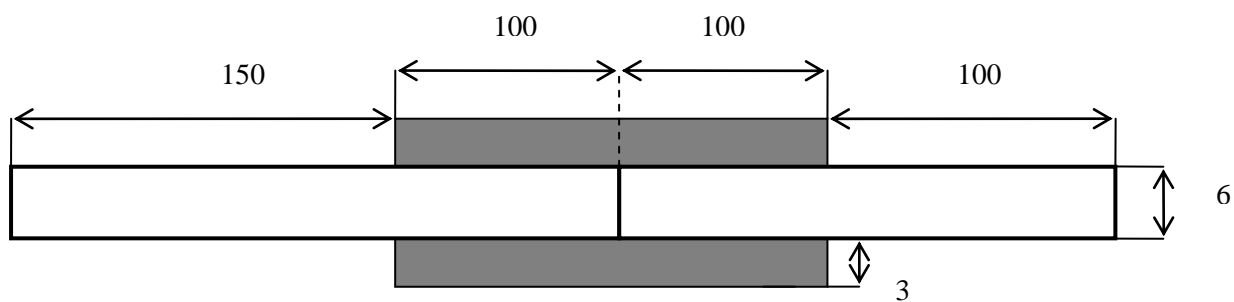
**Σχήμα 2.17:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων A-50 και B-50



**Σχήμα 2.18:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων A-100 και B-100



**Σχήμα 2.19:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων S-50 και H-50



**Σχήμα 2.20:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων S-100 και H-100

Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 2.21 – Σχήμα 2.28), παρουσιάζονται οι μεταλλικές πλάκες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων.



**Σχήμα 2.21:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων A-50



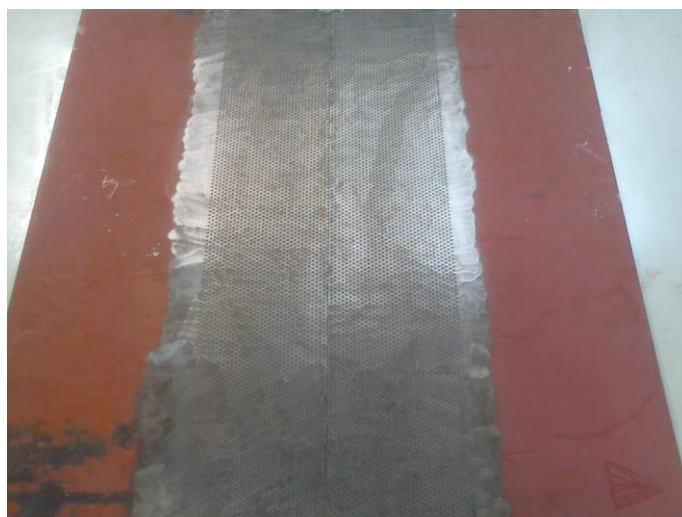
**Σχήμα 2.22:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων B-50



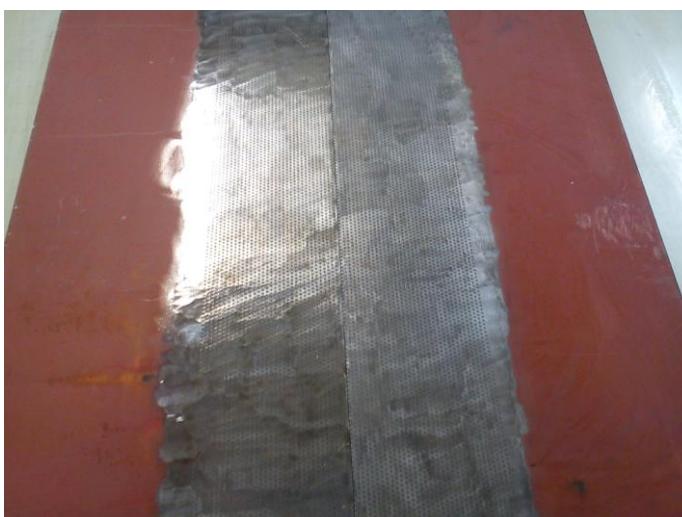
**Σχήμα 2.23:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων S-50



**Σχήμα 2.24:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων H-50



**Σχήμα 2.25:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων A-100



**Σχήμα 2.26:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων B-100



**Σχήμα 2.27:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων S-100



**Σχήμα 2.28:** Μεταλλικές πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συνδέσμων H-100

Απαραίτητο στάδιο πριν την κατασκευή των κολλητών συνδέσμων και τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, ήταν η πλήρης μέτρηση των διαστάσεων των μεταλλικών πλακών, οι οποίες παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.6 – 2.21 που ακολουθούν. Σε κάθε περίπτωση ελήφθησαν 2 μετρήσεις για το μήκος, 2 για το πλάτος, 3 για το πάχος στην κατεργασμένη επιφάνεια, 3 για το πάχος στην ακατέργαστη επιφάνεια και από μία μέτρηση για την καμπυλότητα κάθε πλάκας στην κατεργασμένη και την ακατέργαστη επιφάνεια, την οποία ορίζουμε ως την απόκλιση από την επιπεδότητα. Επιπλέον, ελήφθη και από μία μέτρηση για την τραχύτητα στην κατεργασμένη και την ακατέργαστη επιφάνεια, όχι όμως στις πλάκες με την επιφανειακή επεξεργασία με laser. Το τελευταίο οφείλεται στην εσωτερική κοιλότητα της μικροδομής που δημιουργούνταν στην κατεργασμένη με laser επιφάνεια, η οποία ήταν δύσκολο να μετρηθεί.

**Πίνακας 2.6:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου A-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	200	5.59	6.00				
2	499	200	5.61	6.00				
3			5.64	5.99				
M.O.	499	200	5.61	6.00	0.89	0.45	-	-

**Πίνακας 2.7:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου A-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	200	5.68	5.98				
2	499	200	5.47	5.97				
3			5.48	5.95				
M.O.	499	200	5.54	5.97	0.53	0.63	-	-

**Πίνακας 2.8:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου B-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	200	5.19	5.80				
2	499	200	5.16	5.91				
3			5.06	5.97				
M.O.	499	200	5.14	5.89	0.94	0.74	-	-

**Πίνακας 2.9:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου B-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	200	5.47	6.05				
2	499	200	5.58	6.01				
3			5.60	5.96				
M.O.	499	200	5.55	6.01	0.52	0.49	-	-

**Πίνακας 2.10:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου S-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	250	5.85	5.93				
2	499	250	5.89	5.92				
3			5.86	5.94				
M.O.	499	250	5.87	5.93	0.31	0.73	9.52	9.99

**Πίνακας 2.11:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου S-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	500	200	5.96	5.94				
2	500	200	5.98	5.95				
3			5.97	5.93				
M.O.	500	200	5.97	5.94	1.72	1.50	10.55	10.27

**Πίνακας 2.12:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου H-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	250	5.93	5.92				
2	499	250	5.96	5.97				
3			5.97	5.97				
M.O.	499	250	5.95	5.95	5.29	5.63	0.82	1.32



**Πίνακας 2.13:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου H-50

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	500	200	5.97	5.99				
2	500	200	5.94	5.97				
3			5.95	5.99				
M.O.	500	200	5.95	5.99	5.41	0.63	1.13	1.01

**Πίνακας 2.14:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου A-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	249	5.65	6.05				
2	499	249	5.47	6.06				
3			5.68	6.08				
M.O.	499	249	5.60	6.06	1.08	1.64	-	-

**Πίνακας 2.15:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου A-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	250	5.56	6.02				
2	499	250	5.63	6.02				
3			5.73	6.03				
M.O.	499	250	5.64	6.02	0.97	0.08	-	-

**Πίνακας 2.16:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου B-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	250	5.63	6.00				
2	499	250	5.73	6.01				
3			5.79	6.02				
M.O.	499	250	5.72	6.01	0.87	0	-	-

**Πίνακας 2.17:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου B-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	250	5.66	6.01				
2	499	250	5.67	6.05				
3			5.66	6.01				
M.O.	499	250	5.66	6.02	0.78	0.9	-	-

**Πίνακας 2.18:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου S-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	500	250	5.72	6.02				
2	500	250	5.76	6.00				
3			5.72	6.00				
M.O.	500	250	5.73	6.01	5.74	5.95	10.39	11.49

**Πίνακας 2.19:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου S-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	200	6.05	6.07				
2	499	200	6.04	6.09				
3			6.04	6.07				
M.O.	499	200	6.04	6.08	5.31	5.51	11.05	10.17

**Πίνακας 2.20:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 1 του συνδέσμου H-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	250	6.10	6.01				
2	499	250	6.06	6.01				
3			6.04	6.02				
M.O.	499	250	6.07	6.01	2.54	3.09	2.52	3.66

**Πίνακας 2.21:** Διαστάσεις μεταλλικής πλάκας 2 του συνδέσμου H-100

Μέτρη ση	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (K) (mm)	Πάχος (A) (mm)	Καμπυλότητα (K) (mm)	Καμπυλότητα (A) (mm)	Τραχύτητα (K) (μm)	Τραχύτητα (A) (μm)
1	499	200	5.74	5.74				
2	499	200	5.82	5.84				
3			5.83	5.88				
M.O.	499	200	5.80	5.82	1.78	2.36	3.13	3.31

## 2.6 Επιλογή συνθηκών φόρτισης κατά τις πειραματικές δοκιμές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της αντοχής κολλητών συνδέσμων χάλυβα – σύνθετου υλικού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού των δοκιμίων κολλητού συνδέσμου και σε ορισμένα από τα δοκίμια να τοποθετηθούν επιμηκυνσιόμετρα, προκειμένου να μετρείται σε κάθε περίπτωση η παραμόρφωση των δοκιμίων και να

μελετάται με βάση την επιβαλλόμενη τάση. Επιπλέον, σκοπός είναι με ειδική κάμερα να εξετάζεται ο τρόπος αστοχίας κάθε κολλητού συνδέσμου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Κατασκευή δοκιμίων

#### 3.1 Χαρακτηρισμός σύνθετου υλικού

Πριν γίνει η κατασκευή των κολλητών συνδέσμων χάλυβα – σύνθετου υλικού, το πρώτο βήμα είναι η κατασκευή δοκιμίων από σύνθετο υλικό, χρησιμοποιώντας τις ίνες άνθρακα και την εποξική ρητίνη που θα χρησιμοποιηθούν και για την κατασκευή των κολλητών συνδέσμων. Ο σκοπός της κατασκευής των δοκιμίων αυτών είναι ο χαρακτηρισμός του σύνθετου υλικού, ο προσδιορισμός δηλαδή της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του υλικού σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Επιπλέον, σκοπός είναι ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας του σύνθετου υλικού σε ίνες άνθρακα με μία χημική μέθοδο, η οποία περιλαμβάνει διάλυση της ρητίνης.

##### 3.1.1 Μελέτη της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας σύνθετου υλικού σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Για την εύρεση της αντοχής του σύνθετου υλικού σε μονοαξονικό εφελκυσμό, κατασκευάστηκε ένα πολύστρωτο από ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη με τη μέθοδο vacuum bagging, η οποία θα περιγραφεί παρακάτω. Για την κατασκευή του πολύστρωτου αυτού κόπηκαν 15 κομμάτια από το ρολό του υφάσματος των ινών άνθρακα, διαστάσεων 300x300 mm, τα οποία ζύγιζαν 464 g. Για την προετοιμασία της ρητίνης, αναμίχθηκαν 500 g ρητίνης και 110 g σκληρυντή, δηλαδή το συνολικό βάρος του μίγματος ήταν 610 g. Η αναλογία αυτή επιλέχθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρίας παραγωγής, στις οποίες αναφέρεται ότι η περιεκτικότητα του σκληρυντή είναι 22/100 κ.β., δηλαδή 22 g σκληρυντή στα 122 g μίγματος. Το πολύστρωτο, το οποίο κατασκευάστηκε, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



**Σχήμα 3.1:** Πολύστρωτο από ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη για το χαρακτηρισμό του υλικού

Στη συνέχεια, από το πολύστρωτο κόπηκαν 5 δοκίμια 250x25 mm, τα οποία όμως κόπηκαν από την αρχική πλάκα με ένα κενό 25 mm μεταξύ τους. Προτού γίνει δοκιμή της αντοχής των δοκιμίων αυτών σε εφελκυσμό, έγινε διαστασιολόγησή τους, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Διαστασιολόγηση δοκιμίων για το χαρακτηρισμό του υλικού

Δοκίμιο	Μήκος (mm)	Πλάτος 1 (mm)	Πλάτος 2 (mm)	Πλάτος 3 (mm)	Μ.Ο. Πλάτους	Πάχος 1 (mm)	Πάχος 2 (mm)	Πάχος 3 (mm)	Μ.Ο. Πάχους
1	250	25.63	25.20	25.34	25.39	5.25	5.28	5.05	5.19
2	250	25.60	25.68	25.93	25.74	5.46	5.77	5.85	5.69
3	250	25.61	25.97	26.51	26.03	5.36	5.53	5.64	5.51
4	250	25.76	25.50	25.53	25.60	4.92	5.06	5.01	5
5	250	25.83	25.59	25.56	25.66	4.72	4.62	4.70	4.68

Για το πλάτος και το πάχος ελήφθησαν 3 διαφορετικές μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο, μία στη μέση του μήκους και δύο σε απόσταση 50 mm από τα δύο άκρα. Στον Πίνακα 3.2 φαίνεται το εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία θα ασκείται η φόρτιση από το έμβολο της μηχανής για κάθε δοκίμιο. Το εμβαδόν αυτό προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της μέσης τιμής του πλάτους και της μέσης τιμής του πάχους για κάθε δοκίμιο.

**Πίνακας 3.2:** Εμβαδόν επιφάνειας άσκησης πίεσης από το έμβολο της μηχανής

Δοκίμιο	Εμβαδόν (mm x mm)
1	131.77
2	146.46
3	143.43
4	128.00
5	120.09

Τα δοκίμια που κόπηκαν από την αρχική πλάκα του πολύστρωτου φαίνονται στο Σχήμα 3.2.



**Σχήμα 3.2:** Δοκίμια που κόπηκαν από την αρχική πλάκα του πολύστρωτου για χαρακτηρισμό του υλικού

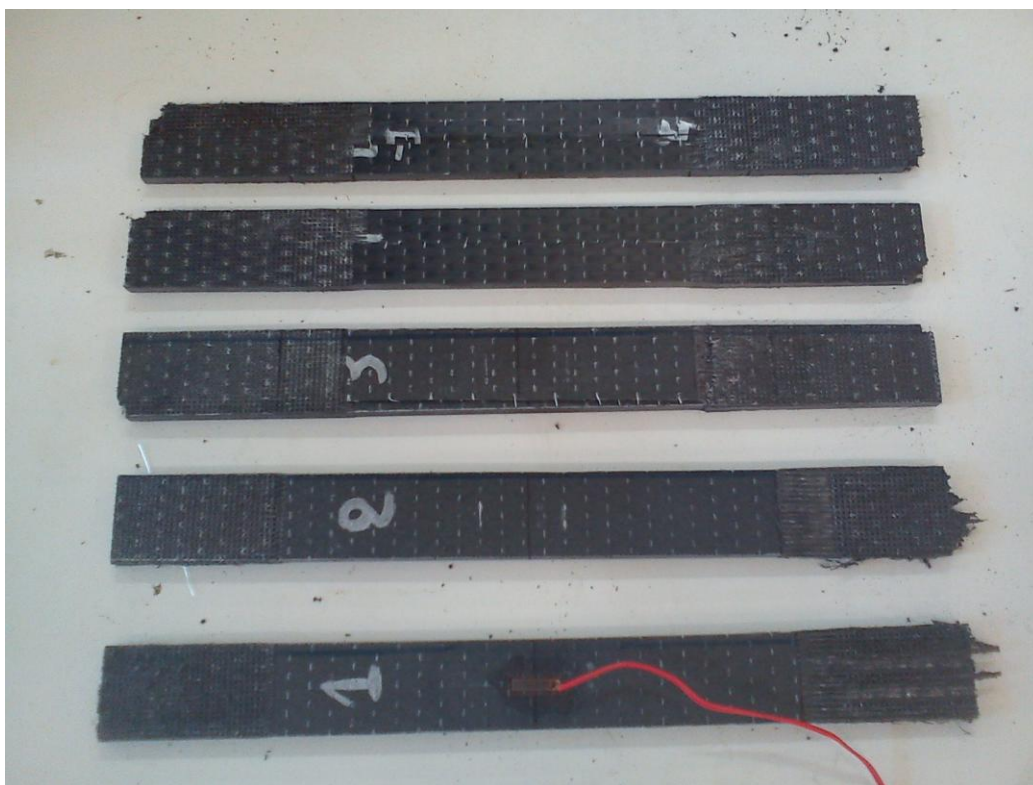
Όσον αφορά στις συνθήκες φόρτισης που εφαρμόστηκαν για τη δοκιμή σε εφελκυσμό των δοκιμίων, αυτές περιγράφονται στη συνέχεια.

Για το δοκίμιο 1, η πίεση σύσφιξης των αρπαγών ήταν 7 MPa, η ταχύτητα απομάκρυνσης του εμβόλου ίση με 1 mm/min και η ταχύτητα δειγματοληψίας ίση με 25 Hz. Για το δοκίμιο 2, η πίεση σύσφιξης των αρπαγών ήταν 10 MPa, η ταχύτητα απομάκρυνσης του εμβόλου ίση με 2 mm/min και η ταχύτητα δειγματοληψίας ίση με 30 Hz. Τα δύο πρώτα δοκίμια υπεβλήθησαν σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού στη μικρότερη από τις δύο μηχανές του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Το μήκος του δοκιμίου που έμπαινε στις αρπάγες της μηχανής ήταν ίσο με 50 mm και από τις δύο πλευρές. Όπως αποδείχτηκε για τα δοκίμια αυτά, η αντοχή τους ήταν μεγαλύτερη από το μέγιστο φορτίο που μπορούσε να αποδώσει η μηχανή, και για το λόγο αυτό σε αυτά τα δύο δοκίμια παρουσιάστηκε επιφανειακή αστοχία στα τμήματα που πιάνονταν από τις αρπάγες της μηχανής, γεγονός που δεν αντιστοιχεί στην πραγματική αιτία αστοχίας τους.

Τα επόμενα 3 δοκίμια φορτίστηκαν στη μεγαλύτερη μηχανή του εργαστηρίου με το μήκος του δοκιμίου που πιανόταν από τις αρπάγες της μηχανής και στις δύο πλευρές να είναι ίσο με 70 mm. Η πίεση σύσφιξης των αρπαγών ήταν 24 MPa, η ταχύτητα απομάκρυνσης του εμβόλου ίση με 1 mm/min και η ταχύτητα δειγματοληψίας ίση με 25 Hz. Σε αυτά τα δοκίμια εμφανίστηκε delamination, αποχωρισμός δηλαδή των στρώσεων, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά τον τρόπο αστοχίας τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φόρτισης δοκιμίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Οι τρόποι αστοχίας όλων των δοκιμίων μετά από τη φόρτισή τους εμφανίζονται στο Σχήμα 3.4.



**Σχήμα 3.3:** Χαρακτηριστικό παράδειγμα φόρτισης δοκιμίου από σύνθετο υλικό σε εφελκυσμό

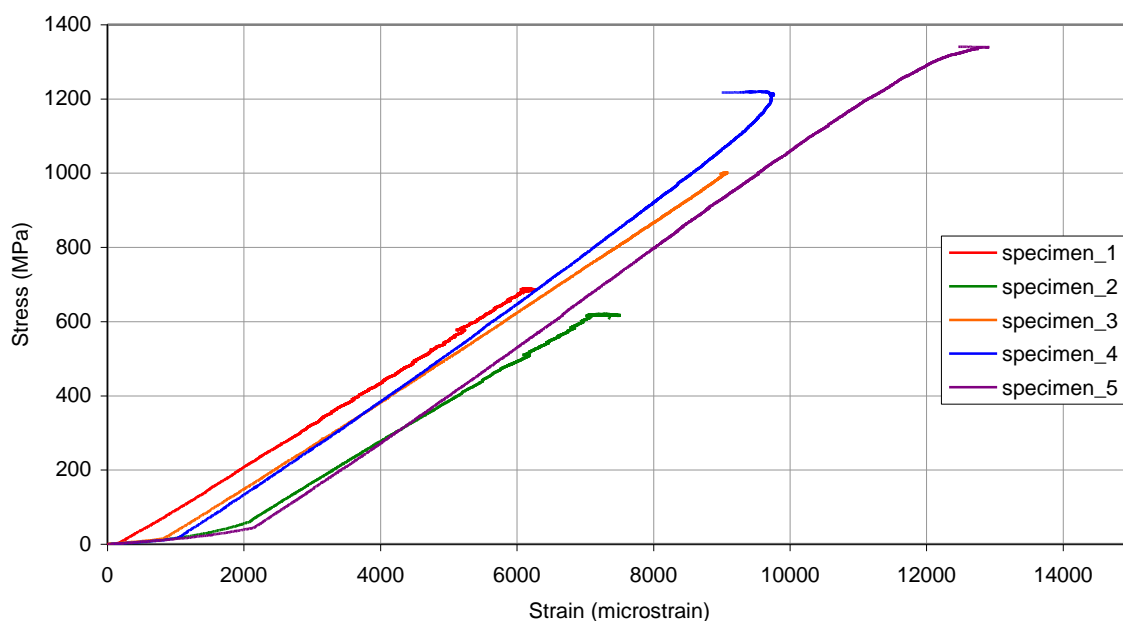


**Σχήμα 3.4:** Τρόποι αστοχίας όλων των δοκιμών από σύνθετο υλικό έπειτα από τη φόρτισή τους σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Από τα strain gauges, τα οποία τοποθετήθηκαν πάνω στα δοκίμια, προκειμένου να μετρηθεί η παραμόρφωσή τους συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης, προέκυψαν τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5. Προκειμένου να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας για κάθε δοκίμιο, έπρεπε να απομονωθεί το γραμμικό τμήμα της κάθε καμπύλης και να ληφθεί η κλίση της, η οποία ισοδυναμεί με το μέτρο ελαστικότητας.

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.5, είναι εμφανής η διαφορά στις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης ανάμεσα στα δοκίμια 1 και 2 και τα δοκίμια 3, 4 και 5. Όπως προαναφέρθηκε, η αστοχία των δύο πρώτων δοκιμών δεν ήταν ρεαλιστική, καθώς η μηχανή στην οποία έγινε η δοκιμή τους σε μονοαξονικό εφελκυσμό μπορούσε να προσδώσει μικρότερη αντοχή από αυτή που είχαν τα δύο δοκίμια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι τιμές της αντοχής να μην είναι ρεαλιστικές και να μην μπορούν να συμμετέχουν στην εύρεση του μέσου όρου της αντοχής του σύνθετου υλικού. Από τα δοκίμια 3, 4 και 5, τα οποία βρέθηκε πως έχουν αντοχή ίση με 1001.6 MPa, 1219.7 MPa και 1340.9 MPa, προκύπτει ότι ο μέσος όρος της αντοχής του σύνθετου υλικού, το οποίο χρησιμοποιούμε για την κατασκευή των κολλητών συνδέσμων, ισούται με 1187.4 MPa.





**Σχήμα 3.5:** Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για το δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για το χαρακτηρισμό του σύνθετου υλικού

Από τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης, τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν για κάθε ένα από τα πέντε δοκίμια, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Στον πίνακα παρουσιάζεται επίσης ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας (Μ.Ο.), η τυπική απόκλιση (Τ.Α.) και ο συντελεστής μεταβλητότητας (C.V.), που ορίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο.

**Πίνακας 3.3:** Μέτρα ελαστικότητας δοκιμίων για το χαρακτηρισμό του σύνθετου υλικού

Δοκίμιο	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)
1	115.2
2	111.2
3	115.3
4	122.5
5	123.0
<b>M.O.</b>	<b>117.4</b>
<b>T.A.</b>	<b>4.6</b>
<b>C.V.</b>	<b>3.9 %</b>

Από τον Πίνακα 3.3 προκύπτει ότι ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας των 5 δοκιμίων ισούται με 117.4 GPa με μεταβλητότητα της τάξης του 3.9 %.

### 3.1.2 Εύρεση της περιεκτικότητας του σύνθετου υλικού σε ίνες άνθρακα

Πέρα από τις δοκιμές σε εφελκυσμό των δοκιμίων από σύνθετο υλικό, πραγματοποιήθηκε και μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες του υλικού. Αυτό έγινε με μία

χημική μέθοδο μέσω διάλυσης της ρητίνης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 3171-99. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, πραγματοποιείται διάλυση της ρητίνης του σύνθετου υλικού σε χημικό μέσο και στη συνέχεια ζύγισμα της εναπομείνουσας ποσότητας των ινών άνθρακα, με αποτέλεσμα την εύρεση της περιεκτικότητας σε ίνες του σύνθετου υλικού. Στη συνέχεια, περιγράφεται με λεπτομέρεια η ως άνω διαδικασία.

Αρχικά, πραγματοποιείται ζύγιση του δοκιμίου από σύνθετο υλικό, το οποίο πρόκειται να διαλυθεί. Τοποθετούμε 230 ml νιτρικού οξέος  $\text{HNO}_3$  σε μία φιάλη μέτρησης. Μεταφέρουμε το νιτρικό οξύ σε ένα ποτήρι ζέσεως και το τοποθετούμε επάνω σε μαγνητικό αναδευτήρα σε θερμοκρασία που δεν πρέπει να ξεπερνάει τους  $80^\circ \text{C}$  και σε ταχύτητα περίπου 3 RPM. Τοποθετούμε το δοκίμιο μέσα στο νιτρικό οξύ. Παρακολουθούμε τη διαδικασία και προσέχουμε το νιτρικό οξύ να ατμίζει και όχι και να βράζει. Όταν τελειώσει η διάλυση του δοκιμίου και παραμείνουν μόνο οι ίνες άνθρακα, χύνουμε το μίγμα σε ιθμό, δηλαδή σε ένα χωνί, προκειμένου να συσσωρευτούν μόνο οι ίνες άνθρακα σε φίλτρο που είναι τοποθετημένο μέσα στο χωνί. Έχει προηγηθεί ζύγισμα του χωνιού και του φίλτρου. Ξεπλένουμε το δοχείο με απιονισμένο νερό 3 φορές για να μην «χαθεί» υλικό στα τοιχώματα. Στη συνέχεια, τοποθετούμε το χωνί με το φίλτρο και τις ίνες στο φούρνο στους  $100^\circ \text{C}$  για 2 ώρες και στη συνέχεια στον ξηραντήρα για 1 ημέρα. Τέλος, ζυγίζουμε το χωνί με το φίλτρο και τις ίνες.

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν (Σχήματα 3.6 και 3.7), φαίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε.



**Σχήμα 3.6:** Διαδικασία διάλυσης σύνθετου υλικού για μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα



**Σχήμα 3.7:** Διαδικασία διάλυσης σύνθετου υλικού για μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα

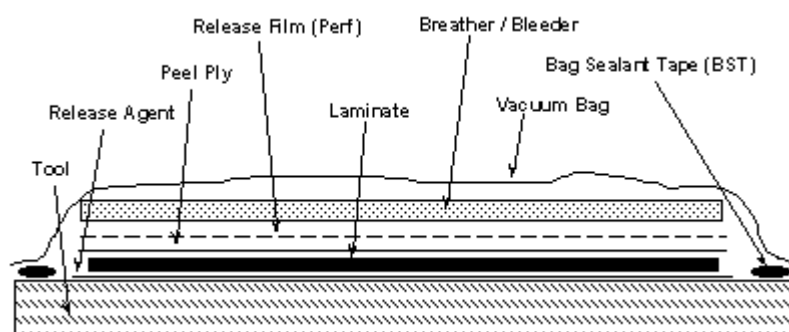
Στην πρώτη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκε η μάζα του δοκιμίου ίση με 1.614 g, στο χωνί ίση με 44.063 g, στο φίλτρο ίση με 0.895 g και η τελική μάζα που είχε το χωνί με το φίλτρο και τις ίνες ίση με 45.918 g. Στη δεύτερη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκε η μάζα του δοκιμίου ίση με 1.615 g, στο χωνί ίση με 45.041 g, στο φίλτρο ίση με 0.908 g και η τελική μάζα που είχε το χωνί με το φίλτρο και τις ίνες ίση με 46.897 g. Η κ.β. περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα του σύνθετου υλικού δίνεται από τον τύπο  $(\alpha - \beta)/\gamma \times 100$ , όπου  $\alpha$  είναι η τελική συνολική μάζα,  $\beta$  είναι η μάζα του χωνιού και του φίλτρου αρχικά και  $\gamma$  είναι η μάζα του δοκιμίου. Στην πρώτη περίπτωση, η κ.β. περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα βρέθηκε ίση με 59.480 %, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ίση με 58.700 %. Από τις δύο πειραματικές δοκιμές που έγιναν φάνηκε ότι κατά μέσο όρο η περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε ίνες άνθρακα είναι 59 %, ποσοστό που είναι αρκετά ικανοποιητικό σε ένα σύνθετο υλικό. Ο λόγος είναι ότι, ως γνωστόν, οι ίνες άνθρακα είναι αυτές που συνεισφέρουν κυρίως στην αντοχή του σύνθετου υλικού.

### 3.2 Κατασκευή κολλητών συνδέσμων

Στη συνέχεια, θα προχωρήσουμε σε λεπτομερή περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής των κολλητών συνδέσμων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του σύνθετου υλικού όλων των συνδέσμων είναι η μέθοδος vacuum bagging. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους κατασκευής σύνθετων υλικών. Η κατασκευή του σύνθετου υλικού έγινε απ' ευθείας επάνω στις μεταλλικές επιφάνειες. Αφού γινόταν η ένωση των δύο μεταλλικών πλακών με απλή επαφή τους, στη συνέχεια κατασκευαζόταν το σύνθετο υλικό πάνω στην ένωσή τους και στη συνέχεια η διαδικασία έπρεπε να επαναληφθεί και στην άλλη πλευρά της ένωσης. Η αναμονή για την κατασκευή του σύνθετου υλικού σε κάθε πλευρά ήταν 1 ημέρα. Ακολουθεί λεπτομερώς η διαδικασία κατασκευής των συνδέσμων.

Το πρώτο στάδιο για την κατασκευή κάθε συνδέσμου ήταν ο προσεκτικός καθαρισμός των μεταλλικών πλακών με ασετόν. Στη συνέχεια, μεγάλη προσοχή έπρεπε να δοθεί στην ένωση των δύο μεταλλικών πλακών κάθε συνδέσμου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σύνθετο υλικό κατασκευαζόταν απ' ευθείας επάνω στην ένωση των μεταλλικών πλακών. Οι ιδέες που αξιολογήθηκαν για την ένωση των δύο πλακών κάθε συνδέσμου ήταν ποικίλες, όπως π.χ. να χρησιμοποιηθεί η ίδια η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των σύνθετων υλικών, προκειμένου να επιτευχθεί η ένωση των δύο πλακών. Τελικά, αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί κανένα συνδετικό υλικό ανάμεσα στις δύο πλάκες και να υπάρχει απλή επαφή τους. Αφού λοιπόν ευθυγραμμίζονταν οι δύο πλάκες και ενώνονταν, τοποθετούνταν μία ειδική ταινία, γνωστή ως tacky tape, επάνω στην ένωση των δύο πλακών, αλλά από την αντίθετη πλευρά από αυτήν στην οποία θα κατασκευαζόταν το σύνθετο υλικό, προκειμένου να μην περάσει ρητίνη μέσω της ένωσης στην άλλη πλευρά.

Στη συνέχεια, σχεδιαζόταν επάνω στις πλάκες το περίγραμμα του σύνθετου υλικού που θα κατασκευαζόταν επάνω τους. Έπειτα, άρχιζε η διαδικασία κατασκευής του σύνθετου υλικού, που όπως αναφέραμε γινόταν με τη μέθοδο vacuum bagging. Η μέθοδος αυτή, που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των πολύστρωτων από σύνθετο υλικό, αποτελεί μία σχετικά φθηνή και αποδοτική μέθοδο κατασκευής σύνθετων υλικών γενικότερα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά στην κατασκευή σύνθετων υλικών λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με άλλες παρόμοιες μεθόδους, όπως είναι η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (hand lay – up method). Μία σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Όλες οι πλάκες από σύνθετο υλικό κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



**Σχήμα 3.8:** Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου vacuum bagging για την κατασκευή σύνθετων υλικών (composite.about.com)

Εφ' όσον είναι έτοιμες λοιπόν οι μεταλλικές πλάκες, προετοιμάζεται το μίγμα της ρητίνης με το σκληρυντή της. Η περιεκτικότητα του σκληρυντή είναι 22/100 κ.β.. Στη συνέχεια, ζυγίζονται τα φύλλα από ίνες άνθρακα, τα οποία έχουν ήδη κοπεί στις επιθυμητές διαστάσεις, ανάλογα με τον υπό κατασκευή σύνδεσμο. Έπειτα, ξεκινάει η κατασκευή του σύνθετου υλικού. Αρχικά εγχύεται ρητίνη επάνω στην ένωση των μεταλλικών πλακών και τοποθετείται η πρώτη στρώση ινών άνθρακα με προσανατολισμό

στις 0° ως προς το πλάτος των μεταλλικών πλακών, το οποίο είναι ή 200 mm ή 250 mm. Στη συνέχεια, εγχύεται ρητίνη επάνω στη στρώση και απλώνεται ομοιόμορφα επάνω της με κατάλληλο εργαλείο. Στη συνέχεια, με ειδικό ρολό, εφαρμόζεται ομοιόμορφη πίεση επάνω στη στρώση, προκειμένου να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή της ρητίνης σε όλες τις ίνες άνθρακα και να εξασφαλίζεται ο σωστός εμποτισμός τους, αλλά και για να απαλείφονται τυχόν κενά αέρος που υπάρχουν. Έπειτα, τοποθετείται η δεύτερη στρώση με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε οι ίνες να έχουν ίδιο προσανατολισμό σε όλες τις στρώσεις και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά την τοποθέτηση των στρώσεων της μίας επάνω στην άλλη, προκειμένου να ταυτίζονται τα άκρα τους.

Κατά τη διαδικασία του χαρακτηρισμού του σύνθετου υλικού που έχει ήδη αναφερθεί, παρατηρήσαμε ότι χρησιμοποιήσαμε 15 στρώσεις ινών άνθρακα και πετύχαμε ένα μέσο όρο πάχους του σύνθετου υλικού ίσο με 5.21 mm. Για να αποφασίσουμε πόσες στρώσεις ινών άνθρακα θα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή των σύνθετων υλικών των συνδέσμων, λαμβάνουμε υπ' όψιν ότι θέλουμε ο λόγος  $(E_c \times t_c)/(E_s \times t_s)$ , δηλαδή η ακαμψία της ένωσης, να ισούται με 0.3, όπου το E αναφέρεται στο μέτρο ελαστικότητας (ή μέτρο δυσκαμψίας) και το t στο πάχος, ενώ ο δείκτης c αναφέρεται στο σύνθετο υλικό (composite) και ο δείκτης s αναφέρεται στο χάλυβα (steel). Επειδή γνωρίζουμε ότι:  $E_s = 207 \text{ GPa}$  και  $t_s = 6 \text{ mm}$ , ενώ από τις πειραματικές δοκιμές κατά το χαρακτηρισμό του υλικού βρέθηκε ότι ο μέσος όρος του  $E_c$  ισούται με 117.4 GPa, προκύπτει ότι για λόγο ίσο με 0.3, πρέπει:  $t_c = 3.17 \text{ mm}$ . Εφ' όσον λοιπόν με 15 στρώσεις ινών άνθρακα επιτεύχθηκε πάχος ίσο με 5.21 mm, αποφασίστηκε η χρήση 10 στρώσεων από ίνες άνθρακα για την κατασκευή όλων των σύνθετων υλικών των συνδέσμων.

Από τη στιγμή που έχουν τοποθετηθεί όλες οι στρώσεις ινών άνθρακα και έχουν όλες εμποτιστεί με την κατάλληλη ποσότητα ρητίνης, ακολουθεί η εφαρμογή της μεθόδου vacuum bagging. Αρχικά, αμέσως μόλις έχει ολοκληρωθεί η επίστρωση, το πρώτο πράγμα που τοποθετείται επάνω στο πολύστρωτο είναι το peel ply, το οποίο είναι ένα ύφασμα, συνήθως νάυλον, που κολλάει επάνω στο πολύστρωτο και μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διάχυση ρητίνης. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το peel ply συνήθως είναι για να δημιουργεί ένα τραχύ και όχι λείο τελείωμα στην επιφάνεια του πολύστρωτου. Αμέσως μετά το peel ply, τοποθετείται το perforated foil, το οποίο είναι ένα λεπτό πλαστικό ύφασμα, που δεν κολλάει επάνω στο πολύστρωτο και ελέγχει τη ροή της ρητίνης κατά τη διάρκεια του curing. Επίσης, απελευθερώνεται μέσω του perforated foil το κενό, όταν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία του curing. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το breather, το οποίο είναι ένα ύφασμα, που έχει την ιδιότητα να επιτρέπει τη διέλευση αέρα, όταν το πολύστρωτο βρίσκεται σε πίεση υπό κενό. Αυτό επιτρέπει να φεύγουν τα κενά αέρα από το πολύστρωτο και να εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη πίεση επάνω σε όλη την επιφάνειά του. Επιπλέον, έχει την ικανότητα να «ρουφάει» την περίσσεια ρητίνης από το πολύστρωτο κατά τη διάρκεια του curing. Το τελευταίο πράγμα που τοποθετείται πριν την εφαρμογή πίεσης είναι το vacuum bag. Συνήθως είναι νάυλον, το οποίο χρησιμοποιείται λόγω των ιδιοτήτων που απαιτούνται για τη διαδικασία, δηλαδή υψηλή ελαστικότητα και δυνατότητα παραμόρφωσης. Ο σκοπός του είναι η ομοιόμορφη εφαρμογή πίεσης κατά τη διάρκεια του curing, επομένως πρέπει

να εξασφαλίζεται αεροστεγές κλείσιμο, προκειμένου να μην υπάρχουν διαρροές. Το κλείσιμο του vacuum bag γίνεται με tacky tape, το οποίο τοποθετείται γύρω από το πολύστρωτο, προκειμένου να «κολλάει» γύρω του και να μην διαφεύγει αέρας. Στη συνέχεια, με κατάλληλα σωληνάκια, εφαρμόζεται κενό, το οποίο στην περίπτωσή μας ήταν 0.6 bar. Η διάρκεια κάθε curing ήταν 1 ημέρα. Μόλις ολοκληρωνόταν, αφαιρούνταν όλα τα πρόσθετα υλικά και η διαδικασία επαναλαμβανόταν στην άλλη πλευρά του συνδέσμου.

Γενικά, η διαδικασία ήταν ομοιόμορφη στην κατασκευή όλων των συνδέσμων και δεν παρατηρήθηκαν χαρακτηριστικά που να απαιτούσαν περαιτέρω μελέτη. Μία παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι κατά την κατασκευή του σύνθετου υλικού στη δεύτερη πλευρά του συνδέσμου A-100 δεν φάνηκε να έχει απορροφηθεί αρκετή ρητίνη από το σωληνάκι που ήταν υπεύθυνο για αυτή τη λειτουργία, γεγονός που μας προϊδεάζει ότι σε αυτή την πλευρά θα υπάρχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ρητίνη σε σχέση με την πρώτη πλευρά.

Επίσης, πρέπει να γίνει μία ακόμη παρατήρηση για έναν από τους συνδέσμους που κατασκευάστηκαν. Όταν κατασκευάστηκε η πρώτη πλευρά του συνδέσμου S-100, ο οποίος ήταν ο πρώτος σύνδεσμος που κατασκευάσαμε, παρατηρήθηκε ότι είχε περάσει ρητίνη στην άλλη πλευρά του συνδέσμου. Για το λόγο αυτό, πριν γίνει η κατασκευή του σύνθετου υλικού σε αυτή την πλευρά, κάναμε πάλι αμμοβολή στην ήδη κατεργασμένη με αμμοβολή επιφάνεια, με αποτέλεσμα όμως να δημιουργήσουμε μικρότερη τραχύτητα από αυτή που είχε προηγουμένως, κάτι που είναι πιθανό να επηρέασε την πρόσφυση του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια σε αυτή την πλευρά, σε σχέση με την αντίθετη πλευρά. Επομένως, κάποια ιδιαιτερότητα στα πειραματικά αποτελέσματα, πιθανώς θα δικαιολογηθεί από την προηγούμενη διαδικασία.

Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 3.9 – 3.17) φαίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των συνδέσμων. Στο Σχήμα 3.17 φαίνονται οι σύνδεσμοι H-50 και H-100, οι οποίοι κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα.

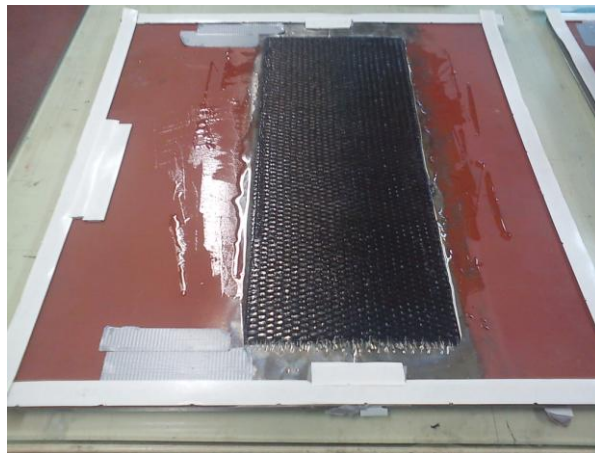


**Σχήμα 3.9:** Τοποθέτηση tacky tape στην ένωση των δύο μεταλλικών πλακών στην αντίθετη πλευρά από αυτή στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί το σύνθετο υλικό





**Σχήμα 3.10:** Τοποθέτηση tacky tape επάνω στις μεταλλικές επιφάνειες στην πλευρά όπου πρόκειται να κατασκευαστεί το σύνθετο υλικό, προκειμένου να επιτευχθεί αεροστεγές κλείσιμο με το vacuum bag



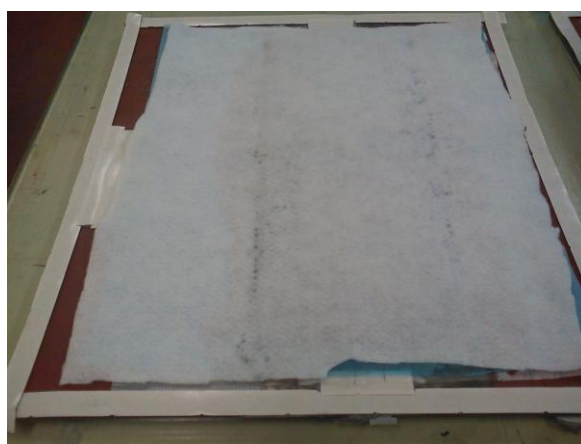
**Σχήμα 3.11:** Κατασκευή σύνθετου υλικού με διαδοχική τοποθέτηση ρητίνης και στρώσεων ινών άνθρακα και κατάλληλη εφαρμογή πίεσης



**Σχήμα 3.12:** Τοποθέτηση peel ply επάνω στο σύνθετο υλικό



**Σχήμα 3.13:** Τοποθέτηση perforated foil επάνω στο σύνθετο υλικό

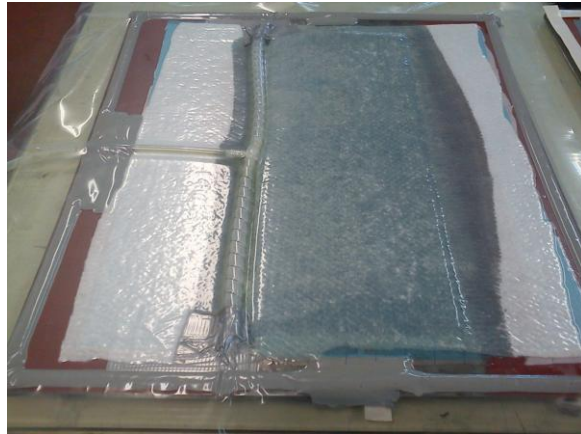


**Σχήμα 3.14:** Τοποθέτηση breather επάνω στο σύνθετο υλικό



**Σχήμα 3.15:** Τοποθέτηση σωλήνος για την εφαρμογή του κενού





**Σχήμα 3.16:** Τοποθέτηση vacuum bag και εφαρμογή κενού

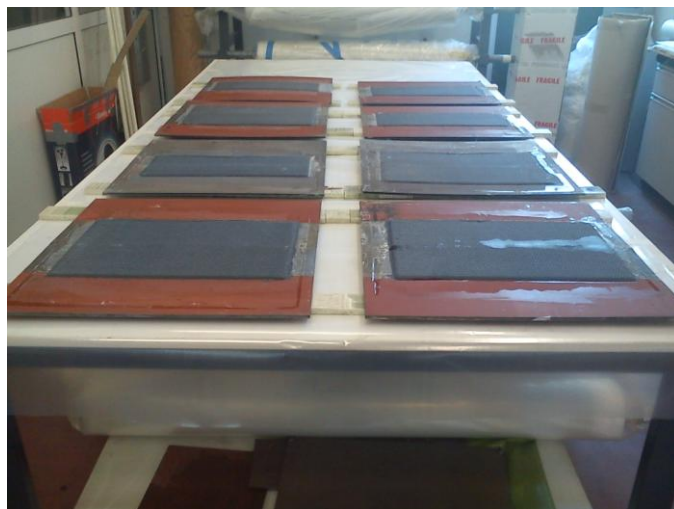


**Σχήμα 3.17:** Στερεοποίηση του σύνθετου υλικού επάνω στις μεταλλικές πλάκες

Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζεται ενδεικτικά ο σύνδεσμος στην τελική του μορφή και στο Σχήμα 3.19 φαίνονται και οι 8 σύνδεσμοι που κατασκευάστηκαν.



**Σχήμα 3.18:** Σύνδεσμος B-100



**Σχήμα 3.19:** Σύνδεσμοι που κατασκευάστηκαν

### 3.3 Κοπή δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, από κάθε έναν από τους 8 συνδέσμους που κατασκευάστηκαν, κόψαμε τελικά 7 δοκίμια. Η κοπή των δοκιμίων έγινε με τη μέθοδο της υδροκοπής στην εταιρία ΠΡΟΤΥΠΟ – ΜΕΤΑΛ. Η μέθοδος της υδροκοπής είναι κατάλληλη σε κοπές σύνθετων υλικών, καθώς ναι μεν μπορεί να κόψει αποτελεσματικά το σύνθετο υλικό μαζί με το μέταλλο με το οποίο συνιστούν τον κολλητό σύνδεσμο, αλλά επίσης δεν καταστρέφει το υλικό, όπως γίνεται με τις μεθόδους κοπής με laser, οι οποίες καίνε τις ίνες του σύνθετου υλικού. Οι κοπές έγιναν με αρκετά χαμηλή ταχύτητα, προκειμένου να μην εμφανίζονται πτυχώσεις και ανομοιομορφίες στην επιφάνεια κοπής των δοκιμίων. Η μηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι κοπές φαίνεται στο Σχήμα 3.20.



**Σχήμα 3.20:** Μηχανή υδροκοπής

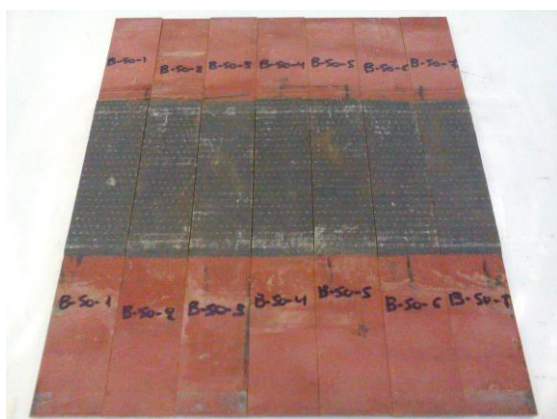
Αφού έγιναν οι κοπές όλων των συνδέσμων, σειρά είχε η συγκέντρωση όλων των δοκιμίων ανά ομάδα, η ταξινόμησή τους και η ονοματολογία τους. Όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την ονομασία των συνδέσμων χρησιμοποιούμε ένα γράμμα και έναν αριθμό, όπου το μεν γράμμα προσδιορίζει την επιφανειακή επεξεργασία

των μεταλλικών μερών, ενώ ο αριθμός δείχνει το μήκος επικάλυψης του σύνθετου υλικού επάνω στις μεταλλικές πλάκες του συνδέσμου. Για την ονομασία κάθε ενός από τα δοκίμια κάθε συνδέσμου χρησιμοποιούμε το όνομα του αντίστοιχου συνδέσμου στην ομάδα του οποίου ανήκει το εκάστοτε δοκίμιο, καθώς και έναν αριθμό από το 1 έως το 7, όσα δηλαδή είναι και τα δοκίμια που κόπηκαν από κάθε σύνδεσμο, π.χ. για την ομάδα του συνδέσμου S-100 έχουμε τα δοκίμια S-100-1, S-100-2, S-100-3, S-100-4, S-100-5, S-100-6 και S-100-7, κ.ο.κ.. Η επιλογή για την ταξινόμηση των δοκιμίων έγινε με βάση την καμπυλότητα κάθε δοκιμίου. Έτσι, αποφασίστηκε για κάθε ομάδα, ο αριθμός 1 να αναφέρεται στο πιο «ίσιο» δοκίμιο, δηλαδή σε αυτό με τη μικρότερη καμπυλότητα, ενώ ο αριθμός 7 να αναφέρεται στο πιο «στραβό» δοκίμιο, δηλαδή σε αυτό με τη μεγαλύτερη καμπυλότητα, με τους ενδιάμεσους αριθμούς να αντιστοιχούν σε κάποιο δοκίμιο της ομάδας με ανάλογη λογική.

Στα Σχήματα 3.21 – 3.28 που ακολουθούν, φαίνονται ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων για κάθε ομάδα.

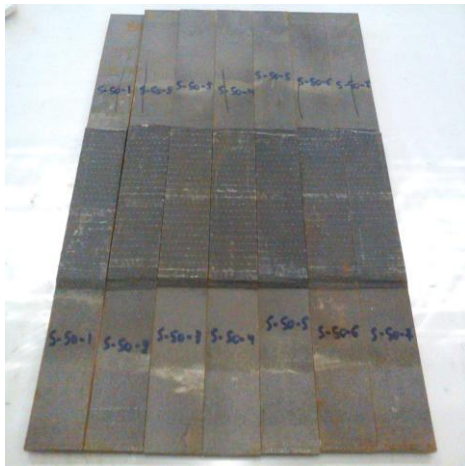


**Σχήμα 3.21:** Δοκίμια συνδέσμου A-50



**Σχήμα 3.22:** Δοκίμια συνδέσμου B-50





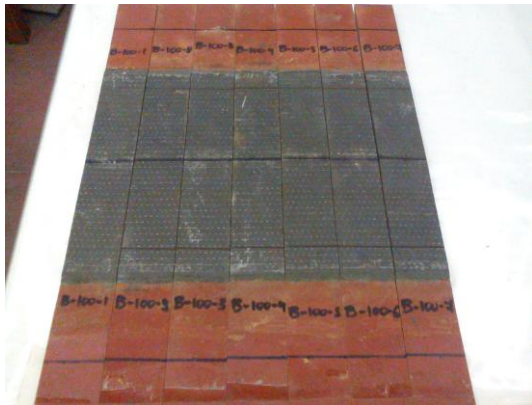
Σχήμα 3.23: Δοκίμια συνδέσμου S-50



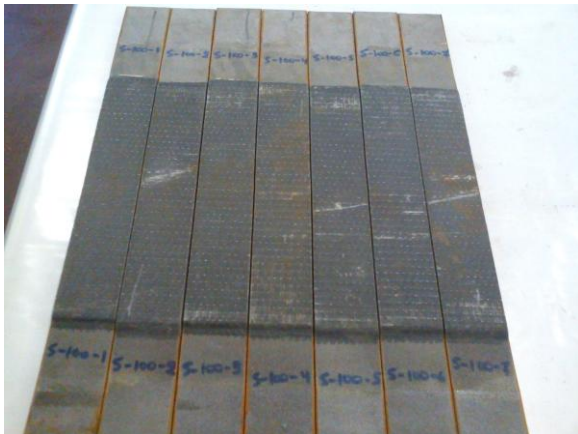
Σχήμα 3.24: Δοκίμια συνδέσμου H-50



Σχήμα 3.25: Δοκίμια συνδέσμου A-100



Σχήμα 3.26: Δοκίμια συνδέσμου Β-100



Σχήμα 3.27: Δοκίμια συνδέσμου S-100



Σχήμα 3.28: Δοκίμια συνδέσμου Η-100

Επόμενο απαραίτητο στάδιο πριν την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών είναι η διαστασιολόγηση όλων των δοκιμών. Ουσιαστικά, για κάθε ένα από τα δοκίμια μετρήσαμε το μήκος και το πλάτος τους, αλλά και το πάχος τους. Συγκεκριμένα, για το πάχος, πήραμε 6 μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο, προκειμένου να εξαχθεί ένας ενδεικτικός μέσος όρος του πάχους του.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 3.4 – 3.11), παρατίθενται αναλυτικά όλες οι διαστάσεις που αφορούν όλα τα δοκίμια ανά σύνδεσμο από τον οποίο προέρχονται. Στην 1η στήλη κάθε πίνακα, αναφέρεται το όνομα του αντίστοιχου δοκιμίου, στη 2η το συνολικό μήκος του, στην 3η και την 4η τα μήκη των δύο μεταλλικών πλακών κάθε δοκιμίου, στην 5η το μήκος επικάλυψης, στην 6η το συνολικό μήκος του σύνθετου υλικού (patch) (το οποίο είναι ουσιαστικά το διπλάσιο του μήκους επικάλυψης), στην 7η και την 8η τα ελεύθερα μήκη των χαλύβδινων πλακών, δηλαδή αυτά που δεν καλύπτονται από σύνθετο υλικό, στην 9η το πλάτος του δοκιμίου, στη 10η το συνολικό πάχος του δοκιμίου, στην 11η το πάχος του μετάλλου και στη 12η το πάχος του patch, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μετρήσεων.

**Πίνακας 3.4:** Διαστάσεις δοκιμίων A-50

A-50	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	400	200	200	50	100	150	150	49	11.49	5.58	2.955
2	400	200	200	50	100	150	150	49	11.45	5.58	2.935
3	400	200	200	50	100	150	150	49	11.49	5.58	2.955
4	400	200	200	50	100	150	150	49	11.52	5.58	2.97
5	400	200	200	50	100	150	150	49	11.56	5.58	2.99
6	400	200	200	50	100	150	150	49	11.53	5.58	2.975
7	400	200	200	50	100	150	150	49	11.51	5.58	2.965

**Πίνακας 3.5:** Διαστάσεις δοκιμών B-50

B-50	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	400	200	200	50	100	150	150	49	11.19	5.35	2.92
2	400	200	200	50	100	150	150	49	11.16	5.35	2.905
3	400	200	200	50	100	150	150	49	11.15	5.35	2.9
4	400	200	200	50	100	150	150	49	11.32	5.35	2.985
5	400	200	200	50	100	150	150	49	11.23	5.35	2.94
6	400	200	200	50	100	150	150	49	11.23	5.35	2.94
7	400	200	200	50	100	150	150	49	11.23	5.35	2.94

**Πίνακας 3.6:** Διαστάσεις δοκιμών S-50

S-50	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	450	250	200	50	100	200	150	49	11.89	5.92	2.985
2	450	250	200	50	100	200	150	49	11.84	5.92	2.96
3	450	250	200	50	100	200	150	49	11.71	5.92	2.895
4	450	250	200	50	100	200	150	49	11.73	5.92	2.905
5	450	250	200	50	100	200	150	49	11.8	5.92	2.94
6	450	250	200	50	100	200	150	49	11.83	5.92	2.955
7	450	250	200	50	100	200	150	49	11.87	5.92	2.975

**Πίνακας 3.7:** Διαστάσεις δοκιμών H-50

H-50	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	450	250	200	50	100	200	150	49	11.68	5.95	2.865
2	450	250	200	50	100	200	150	49	11.65	5.95	2.85
3	450	250	200	50	100	200	150	49	11.63	5.95	2.84
4	450	250	200	50	100	200	150	49	11.69	5.95	2.87
5	450	250	200	50	100	200	150	49	11.6	5.95	2.825
6	450	250	200	50	100	200	150	49	11.76	5.95	2.905
7	450	250	200	50	100	200	150	49	11.73	5.95	2.89

**Πίνακας 3.8:** Διαστάσεις δοκιμίων A-100

A-100	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	499	249	250	100	200	149	150	49	12.25	5.62	3.315
2	499	249	250	100	200	149	150	49	12.22	5.62	3.3
3	499	249	250	100	200	149	150	49	11.98	5.62	3.18
4	499	249	250	100	200	149	150	49	12.25	5.62	3.315
5	499	249	250	100	200	149	150	49	11.99	5.62	3.185
6	499	249	250	100	200	149	150	49	12.06	5.62	3.22
7	499	249	250	100	200	149	150	49	12.13	5.62	3.255

**Πίνακας 3.9:** Διαστάσεις δοκιμίων B-100

B-100	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	500	250	250	100	200	150	150	49	11.74	5.69	3.025
2	500	250	250	100	200	150	150	49	11.64	5.69	2.975
3	500	250	250	100	200	150	150	49	11.58	5.69	2.945
4	500	250	250	100	200	150	150	49	11.66	5.69	2.985
5	500	250	250	100	200	150	150	49	11.73	5.69	3.02
6	500	250	250	100	200	150	150	49	11.71	5.69	3.01
7	500	250	250	100	200	150	150	49	11.71	5.69	3.01

**Πίνακας 3.10:** Διαστάσεις δοκιμίων S-100

S-100	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	450	250	200	100	200	150	100	50	12.07	5.89	3.09
2	450	250	200	100	200	150	100	50	12	5.89	3.055
3	450	250	200	100	200	150	100	50	12.01	5.89	3.06
4	450	250	200	100	200	150	100	50	12.02	5.89	3.065
5	450	250	200	100	200	150	100	50	11.98	5.89	3.045
6	450	250	200	100	200	150	100	50	12	5.89	3.055
7	450	250	200	100	200	150	100	50	11.95	5.89	3.03



**Πίνακας 3.11:** Διαστάσεις δοκιμίων H-100

H-100	Μήκος (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Overlap (mm)	Συνολικό μήκος patch (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 1 (mm)	Ελεύθερο μήκος μεταλλικής πλάκας 2 (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος μετάλλου (mm)	Πάχος patch (mm)
1	450	250	200	100	200	150	100	50	11.92	5.94	2.99
2	450	250	200	100	200	150	100	50	11.9	5.94	2.98
3	450	250	200	100	200	150	100	50	11.92	5.94	2.99
4	450	250	200	100	200	150	100	50	11.92	5.94	2.99
5	450	250	200	100	200	150	100	50	11.88	5.94	2.97
6	450	250	200	100	200	150	100	50	11.91	5.94	2.985
7	450	250	200	100	200	150	100	50	11.91	5.94	2.985

### 3.4 Έλεγχος ποιότητας κολλητών συνδέσμων

Αφού κατασκευάστηκαν όλοι οι σύνδεσμοι, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι για τον έλεγχο της ποιότητάς τους από την κ. Χαρά Σαράφογλου, μέλος του ερευνητικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Με τις μεθόδους αυτές εντοπίζονται τυχόν ατέλειες του σύνθετου υλικού, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη κενών ή αποκολλήσεις στρώσεων του πολύστρωτου.

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η ακουστική επιθεώρηση με υπερήχους με έναν ανιχνευτή ατελειών, ο οποίος έχει την εμπορική ονομασία BondMaster 1000e+ και ανήκει στην εταιρία Olympus. Με τον ανιχνευτή αυτόν μπορούν να εντοπιστούν ατέλειες που οφείλονται σε αποκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού και γενικώς να ανιχνευτούν αποκολλήσεις σε περιπτώσεις κολλητών συνδέσμων. Η μέθοδος αυτή με χρήση του συγκεκριμένου οργάνου, από αποτελέσματα διαφόρων πειραματικών δοκιμών που έχουν αξιολογηθεί, έχει γενικά αποδειχτεί αρκετά αξιόπιστη και με αρκετές δυνατότητες για επιθεώρηση σύνθετων υλικών και γενικώς κολλητών συνδέσμων.

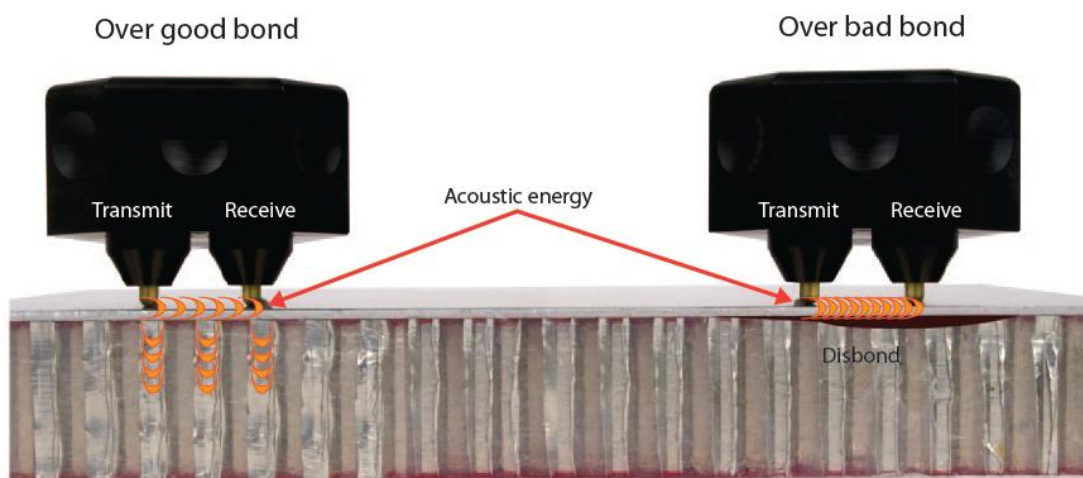
Το όργανο BondMaster 1000e+ που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο και στη δική μας περίπτωση, φαίνεται στο Σχήμα 3.29.

Πρόκειται για ένα πολύ ευέλικτο όργανο, με πολλαπλές λειτουργίες, το οποίο επιτρέπει χρήση της κατάλληλης λειτουργίας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση, μικρό βάρος και ανθεκτικότητα, που το καθιστούν ιδανική επιλογή για εφαρμογές που σχετίζονται με την κατασκευή, τη συντήρηση και την επιδιόρθωση σύνθετων υλικών. Γενικά, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ανιχνευτών, με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά ο καθένας και διαφορετική μέθοδο παρακολούθησης. Η συχνότητα κυμαίνεται από 250 Hz μέχρι 1.5 MHz (olympus.com).



**Σχήμα 3.29:** Όργανο BondMaster 1000e+ για την ανίχνευση αποκολλήσεων σε σύνθετα υλικά και κολλητούς συνδέσμους (olympus.com)

Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε απ' ευθείας στους συνδέσμους που κατασκευάστηκαν, προτού κοπούν τα δοκίμια. Με λίγα λόγια, ο τρόπος λειτουργίας του συγκεκριμένου οργάνου είναι η μέτρηση της ακουστικής ενέργειας που διαδίδεται μέσα στο υλικό και η καταγραφή της στο όργανο. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια αποκόλληση στο σύνθετο υλικό, η ακουστική ενέργεια που παρέχεται από το όργανο διαμοιράζεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια μέτρησης, με αποτέλεσμα η έξοδος στο όργανο να είναι ένα σήμα χαμηλότερης έντασης από το αρχικό. Σε περίπτωση αποκόλλησης, η ακουστική ενέργεια δεν μεταδίδεται στο υλικό, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται θόρυβος στην οθόνη του εργαλείου, η οποία υποδηλώνει την ατέλεια του δεσμού. Χαρακτηριστικά, η λειτουργία του οργάνου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.30.



**Σχήμα 3.30:** Τρόπος λειτουργίας οργάνου BondMaster 1000e+ (olympus.com)

Με αυτή τη μέθοδο, δεν εντοπίστηκαν ατέλειες στο σύνθετο υλικό σε κανέναν από τους συνδέσμους.

Η δεύτερη μέθοδος που εφαρμόστηκε για τον έλεγχο των δοκιμίων κάνει χρήση της συσκευής υπερήχων 38DL-Plus, η οποία είναι ένα πολύ καλό παχύμετρο, το οποίο με την κατάλληλη κεφαλή δίνει τη δυνατότητα μέτρησης πάχους με ακρίβεια 0.01 mm για τις βασικές κεφαλές. Ανάλογα με την κεφαλή που επιλέγεται υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης σε πολύ λεπτά δοκίμια αλλά και σε δοκίμια μεγάλου πάχους (σύνθετα και μη).

Η μέθοδος λειτουργίας της συσκευής αυτής είναι αυτή της παλμοχούς (μέθοδος NDT). Κατά την τεχνική αυτή, μικρής διάρκειας παλμοί υπερήχων εισάγονται στο εξεταζόμενο υλικό, σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Όταν στην πορεία τους συναντήσουν μια επιφάνεια ανάκλασης, ποσοστό της ακουστικής ενέργειας ανακλάται. Το ποσό της ανακλώμενης ενέργειας καταγράφεται, καθώς και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του αρχικού παλμού και της ανάκλασης που λαμβάνεται. Καθώς τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην οθόνη της συσκευής και με κυματομορφή (waveform) και όχι μόνο ως ένα απλό νούμερο μέτρησης, δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης και διαστασιολόγησης (μέγεθος, μορφή) ατελειών που τυχόν υπάρχουν (ύπαρξη κενών και αστοχιών), καθώς και η δυνατότητα μέτρησης του πάχους (Μπαδογιάννης 2009).

Τα σύνθετα υλικά, τα οποία μελετάμε στην περίπτωση μας, παρουσιάζουν διαφορετικές συνθήκες, οι οποίες δημιουργούν αρκετά μεγάλες δυσκολίες τόσο στη διεξαγωγή του ελέγχου όσο και στην αξιολόγηση – εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Η βασική αιτία των δυσκολιών οφείλεται στη μεγάλη εξασθένηση της ηχητικής ενέργειας από το υλικό λόγω απορρόφησης ή σκέδασης. Έτσι, καταγράφεται από το όργανο πλήθος ανακλάσεων, μικρής έντασης, οι οποίες δύνανται να οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες ή πολλές φορές στις ίδιες τις διαφορετικές στρώσεις ενίσχυσης που συνιστούν το υλικό.

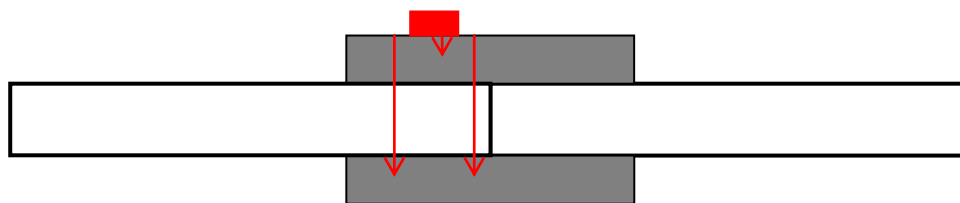
Η δεύτερη μέθοδος λοιπόν εφαρμόστηκε στα δοκίμια που κόπηκαν από τους συνδέσμους και συγκεκριμένα σε ένα δοκίμιο από κάθε σύνδεσμο, δηλαδή συνολικά σε 8 δοκίμια. Το όργανο μέτρησης για τη συγκεκριμένη μέθοδο φαίνεται στο Σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31: Όργανο μέτρησης για τη μέθοδο NDT

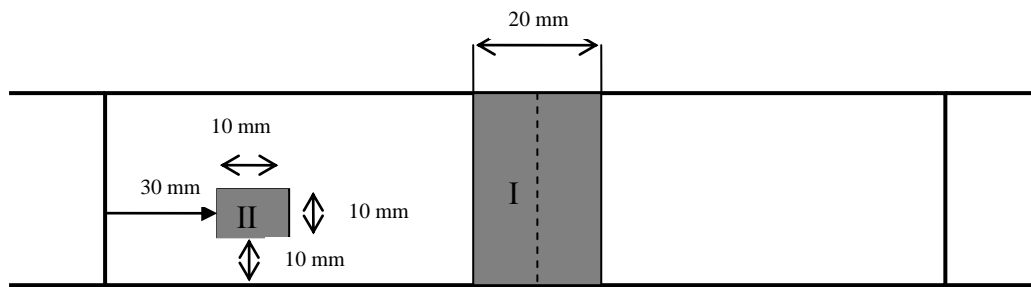
Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιήσαμε κάποιο δοκίμιο της αντίστοιχης ομάδας, το οποίο να χαρακτηρίζεται από υψηλή καμπυλότητα, δηλαδή να είναι από τα «χειρότερα» από άποψη καμπυλότητας δοκίμια. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκαν δοκίμια με αριθμό 5, 6 ή 7.

Με τη δεύτερη μέθοδο λοιπόν του NDT testing την οποία χρησιμοποιήσαμε για μετρήσεις του πάχους και εξέταση τοπικών ελαττωματικών στοιχείων, εντοπίστηκαν κάποιες ενδείξεις στο όργανο μέτρησης οι οποίες υποδηλώνουν κάποιες ασυνέχειες, που φαίνονται στη συνέχεια (Σχήματα 3.33 – 3.40). Στα σχήματα αυτά παρουσιάζεται η κάτοψη των δοκιμίων, δηλαδή φαίνεται η επιφάνεια του σύνθετου υλικού, επάνω στην οποία μετακινούμε το όργανο, προκειμένου να γίνουν οι επιθυμητές μετρήσεις. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ένωση των δύο χαλύβδινων πλακών. Το όργανο μέτρησης δίνει ενδείξεις σφαλμάτων κατά το πάχος του δοκιμίου. Οι λατινικοί αριθμοί επομένως αντιστοιχούν στις περιοχές ένδειξης σφάλματος σε συγκεκριμένο πάχος στο εκάστοτε δοκίμιο. Οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται οι ασυνέχειες στο σύνθετο υλικό φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα με γκρίζο χρώμα. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, στο σχήμα 3.32 φαίνεται η επιφάνεια επάνω στην οποία καταγράφει το όργανο τις ασυνέχειες του σύνθετου υλικού κατά το πάχος του. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το όργανο μέτρησης, το οποίο μετακινούμε επάνω στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού και οι ενδείξεις ασυνέχειας που παίρνουμε είναι ως προς το πάχος του δοκιμίου (ενδεικτικές κόκκινες γραμμές).



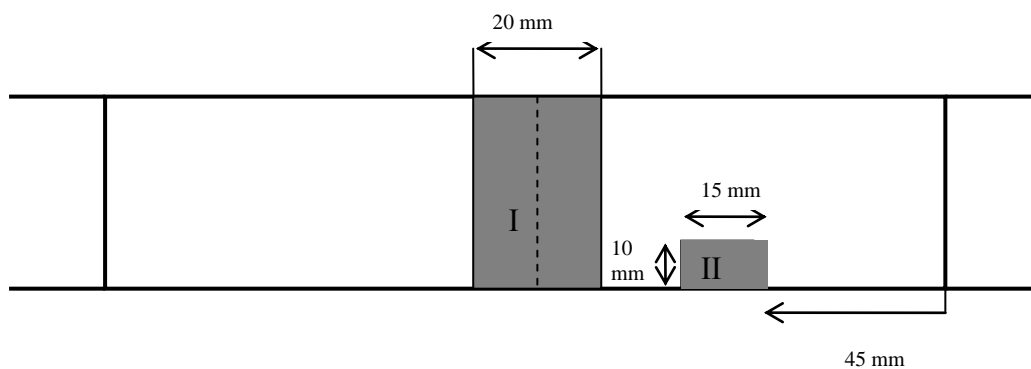
**Σχήμα 3.32:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο A-50-7

Στο δοκίμιο A-50-7 εντοπίστηκαν δύο ασυνέχειες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.33. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, η πρώτη ένδειξη έδωσε ασυνέχεια περίπου στα 10 mm από την επιφάνεια μέτρησης κατά το πάχος του δοκιμίου, ενώ η δεύτερη έδειξε ασυνέχεια περίπου στα 3 mm από την επιφάνεια μέτρησης κατά το πάχος του δοκιμίου στο αντίστοιχο σημείο μέτρησης.



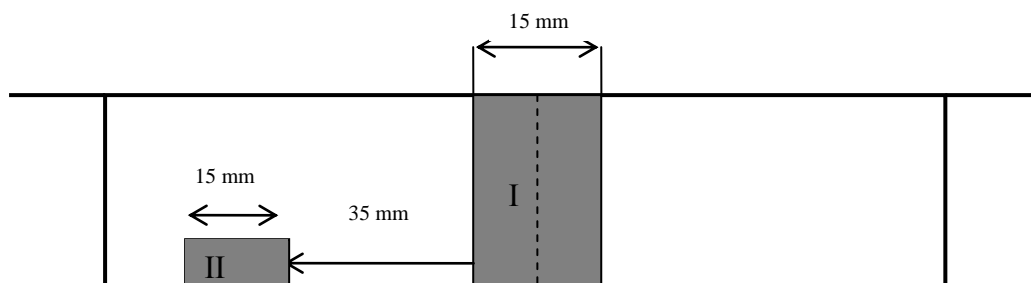
**Σχήμα 3.33:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο A-50-7

Τα ίδια με προηγουμένως φάνηκαν και για το δοκίμιο B-50-7, με δύο ασυνέχειες περίπου στα 9 mm ως προς το πάχος του δοκιμίου στις θέσεις που υποδηλώνουν οι λατινικοί αριθμοί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.34.



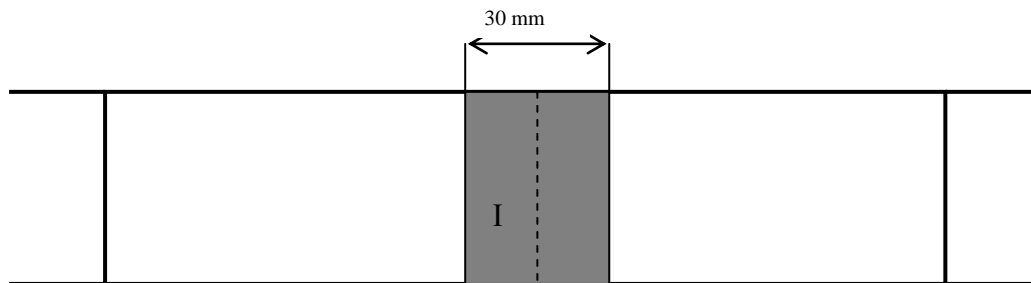
**Σχήμα 3.34:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο B-50-7

Στο δοκίμιο S-50-5, και πάλι εντοπίστηκαν δύο ασυνέχειες στα 9 mm περίπου από την επιφάνεια του σύνθετου υλικού ως προς το πάχος του δοκιμίου, στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 3.35.



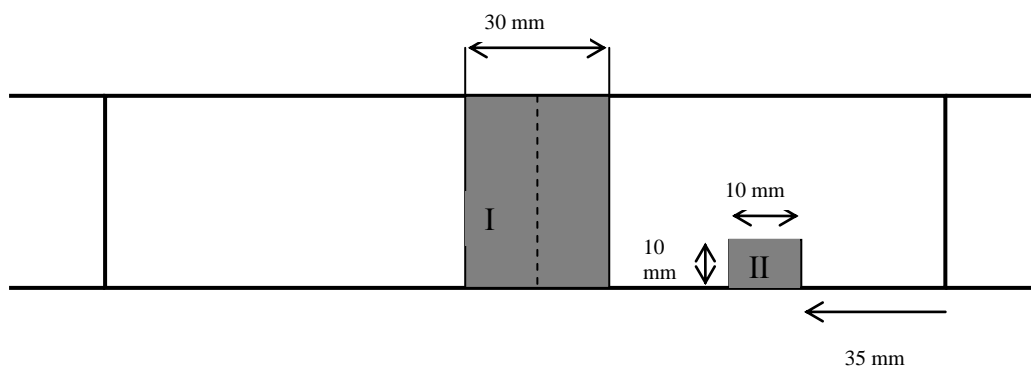
**Σχήμα 3.35:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο S-50-5

Στο δείγμα H-50-7 εμφανίστηκε μία ασυνέχεια σε βάθος 9 mm από την επιφάνεια του σύνθετου υλικού, στην περιοχή που φαίνεται στο Σχήμα 3.36.



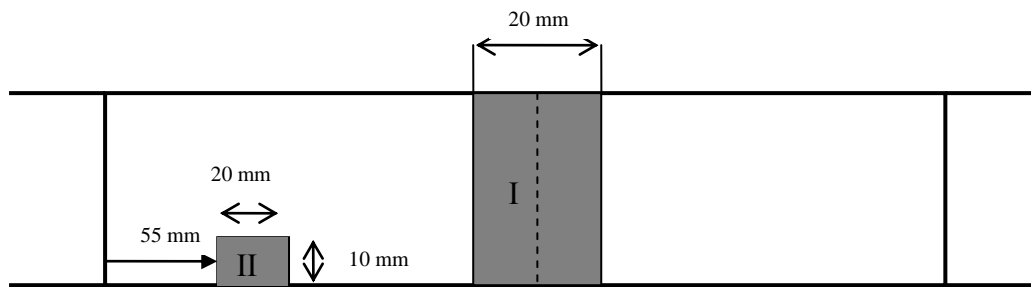
**Σχήμα 3.36:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο S-50-5

Στο δοκίμιο A-100-6 εντοπίστηκαν δύο ασυνέχειες, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.37. Στην περιοχή που υποδηλώνει η ένδειξη 1, το όργανο έδωσε μία ασυνέχεια στα 9 mm κατά το πάχος από την επιφάνεια μέτρησης, όπως επίσης και η ένδειξη 2 στην αντίστοιχη περιοχή μέτρησης.



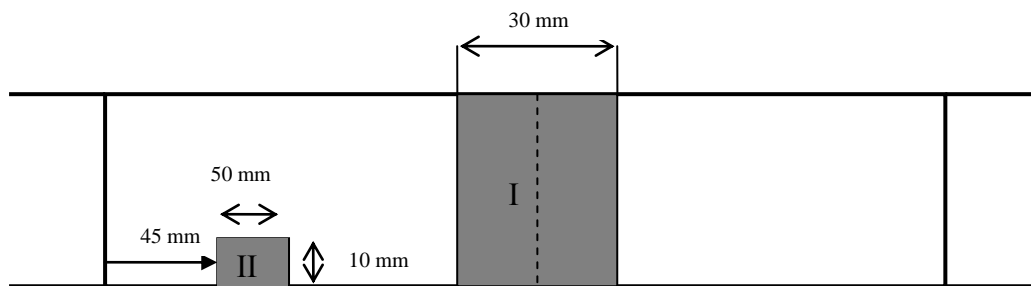
**Σχήμα 3.37:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο A-100-6

Συνεχίζοντας, στο δείγμα B-100-7 εντοπίστηκαν επίσης δύο ασυνέχειες, και οι δύο περίπου στα 9 mm από την επιφάνεια μέτρησης, στις περιοχές που φαίνονται στο Σχήμα 3.38.



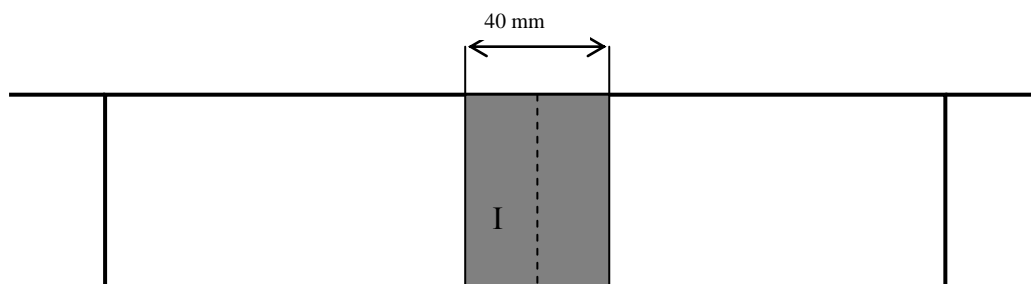
**Σχήμα 3.38:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο B-100-7

Όπως και στο προηγούμενο δοκίμιο, έτσι και στο δοκίμιο S-100-6, εντοπίστηκαν δύο ασυνέχειες στα 9 mm περίπου από την επιφάνεια μέτρησης, στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 3.39.



**Σχήμα 3.39:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο S-100-6

Τέλος, στο δείγμα H-100-6 εμφανίστηκε μία ασυνέχεια στα 9 mm από την επιφάνεια μέτρησης, στην περιοχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.40.



**Σχήμα 3.40:** Ατέλειες που εντοπίστηκαν στο δοκίμιο H-100-6

Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα που έδωσε η δεύτερη μέθοδος είναι ότι δεν εντοπίστηκαν ατέλειες στα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν. Οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν στα δοκίμια και των 8 ομάδων, παρατηρούμε ότι αναφέρονταν σχεδόν όλες στην ίδια περιοχή του πάχους του συνδέσμου, δηλαδή στα 9 mm περίπου την επιφάνεια μέτρησης ως προς το πάχος του δοκιμίου. Στη συγκεκριμένη θέση, ουσιαστικά το όργανο εντοπίζει την ένωση της μεταλλικής πλάκας με το σύνθετο υλικό που αντιστοιχεί στην κάτω επιφάνεια της μεταλλικής πλάκας, εφ' όσον το πάχος του σύνθετου υλικού είναι περίπου 3 mm, ενώ αυτό του μετάλλου περίπου 6 mm.

Τελικά, και από τις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε, συμπεραίνουμε ότι δεν εντοπίζονται ατέλειες και ασυνέχειες στα σύνθετα υλικά που κατασκευάσαμε.

### 3.5 Προετοιμασία δοκιμίων

Έχει ήδη αναφερθεί ότι μία από τις παραμέτρους που εξετάζουμε στη συγκεκριμένη εργασία είναι το overlap length, δηλαδή το μήκος που καλύπτει το σύνθετο υλικό επάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Όπως έχουμε δει, έχουν κατασκευαστεί δοκίμια με δύο διαφορετικά μήκη επικάλυψης, δηλαδή είτε με 50 mm, είτε με 100 mm. Για ένα δοκίμιο το οποίο έχει μήκος επικάλυψης ίσο με 50 mm, αυτό σημαίνει ότι το συνολικό μήκος που καλύπτει το σύνθετο υλικό και στις δύο διαφορετικές μεταλλικές πλάκες ισούται με 100 mm και ομοίως το ίδιο συμβαίνει και για τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 100 mm, όπου το συνολικό μήκος του σύνθετου υλικού επάνω στις χαλύβδινες πλάκες είναι ίσο με 200 mm. Ενώ λοιπόν κατά την κατασκευή των κολλητών συνδέσμων θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται φύλλα από ίνες άνθρακα με μήκος 100 mm και 200 mm αντιστοίχως προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος επικάλυψης σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν λίγο μεγαλύτερα φύλλα σε κάθε περίπτωση και συγκεκριμένα μήκους 150 mm και 250 mm αντιστοίχως.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν στρώσεις από ίνες άνθρακα μεγαλύτερου μήκους είναι προκειμένου να αφήσουμε κάποιο περιθώριο κατά την κατασκευή των δοκιμίων, σε περίπτωση που εμφανιζόταν οποιαδήποτε ατέλεια στις άκρες του σύνθετου υλικού. Συνεπάγεται λοιπόν ότι σε κάθε περίπτωση αφήναμε ένα περιθώριο 50 mm, δηλαδή κατασκευάζαμε σύνθετο υλικό μεγαλύτερο κατά 25 mm πάνω σε κάθε μεταλλική πλάκα. Προκειμένου να έχουμε το επιθυμητό μήκος επικάλυψης που εκλέξαμε κατά το σχεδιασμό των πειραματικών δοκιμών, ήταν απαραίτητο να αφαιρεθούν μετά την κοπή των δοκιμίων αυτά τα επιπλέον 25 mm από κάθε πλευρά του σύνθετου υλικού που κατασκευάσαμε.

Για τις κοπές του επιπλέον σύνθετου υλικού, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η φρέζα του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας με κονδύλι διαμέτρου 10 mm και να χρησιμοποιηθεί υγρό κοπής. Ουσιαστικά, σε κάθε ένα από τα δοκίμια που κόπηκαν, έπρεπε να πραγματοποιηθούν 4 κοπές, 2 σε κάθε μία πλευρά καθενός δοκιμίου. Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες (Σχήματα 3.41 και 3.42).

Στον Πίνακα 3.12 που ακολουθεί φαίνονται οι τελικές τιμές του μήκους επικάλυψης σε κάθε ένα από τα δοκίμια που θα εξεταστούν πειραματικά. Παρουσιάζονται 4 τιμές σε κάθε δοκίμιο, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις δύο πλευρές κάθε δοκιμίου και σε



κάθε μία από τις δύο μεταλλικές πλάκες. Τα μήκη  $L_1$  και  $L_2$ , αντιστοιχούν στο μήκος επικάλυψης του σύνθετου υλικού επάνω σε κάθε μία από τις δύο χαλύβδινες πλάκες, σε αντιπαράθεση με το Σχήμα 2.10. Για κάθε έναν από τους 8 διαφορετικούς συνδέσμους αποφασίστηκε να εξεταστούν πειραματικά τα 6 πρώτα δοκίμια της αντίστοιχης ομάδας, τα οποία είναι και αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.12 που ακολουθεί. Οι διαστάσεις είναι σε mm.



**Σχήμα 3.41:** Κοπές σύνθετου υλικού για την επίτευξη του επιθυμητού μήκους επικάλυψης



**Σχήμα 3. 42:** Κοπές σύνθετου υλικού για την επίτευξη του επιθυμητού μήκους επικάλυψης

**Πίνακας 3.12:** Τελικές τιμές του μήκους επικάλυψης στα δοκίμια που θα εξεταστούν σε εφελκυσμό

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΛΕΥΡΑ 1		ΠΛΕΥΡΑ 2	
	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)
A-50-1	50	50	50	50
A-50-2	50	50	50	50
A-50-3	50	50	51	50
A-50-4	50	50	50	50
A-50-5	50	50	50	50
A-50-6	50	50	49	50
B-50-1	50	51	50	51
B-50-2	50	50	50	50
B-50-3	51	50	51	50
B-50-4	50	50	51	50
B-50-5	49	50	49	50
B-50-6	50	50	49	50
S-50-1	50	51	50	51
S-50-2	50	50	50	50
S-50-3	50	50	50	50
S-50-4	50	50	50	51
S-50-5	50	51	50	50
S-50-6	50	51	50	51
H-50-1	50	50	50	50
H-50-2	50	51	50	50
H-50-3	50	50	50	50
H-50-4	50	50	50	50
H-50-5	50	50	50	50
H-50-6	50	50	51	50
A-100-1	100	101	100	100
A-100-2	100	100	100	100
A-100-3	100	100	100	100
A-100-4	101	100	101	101
A-100-5	101	100	101	100
A-100-6	100	99	99	100
B-100-1	101	101	100	100
B-100-2	100	101	100	100
B-100-3	100	101	100	100
B-100-4	100	100	100	100
B-100-5	100	100	100	100
B-100-6	100	99	100	100
S-100-1	100	100	99	100
S-100-2	100	100	100	100
S-100-3	100	100	100	100
S-100-4	100	100	100	100
S-100-5	100	100	100	100
S-100-6	100	100	100	100
H-100-1	100	100	100	100
H-100-2	100	100	101	101
H-100-3	101	101	100	100
H-100-4	100	100	100	100
H-100-5	102	100	100	100
H-100-6	100	101	101	100

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Πειραματικές δοκιμές – Ανάλυση μετρήσεων

#### 4.1 Πειραματικές δοκιμές

Εφ' όσον τα δοκίμια έχουν κοπεί και έχουν μορφοποιηθεί σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, το επόμενο στάδιο είναι η διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών. Όπως προαναφέραμε, αποφασίστηκε για κάθε μία από τις 8 διαφορετικές ομάδες συνδέσμων να εξεταστούν πειραματικά τα 6 πρώτα δοκίμια. Όλα τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό στη μεγαλύτερη από τις δύο μηχανές του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

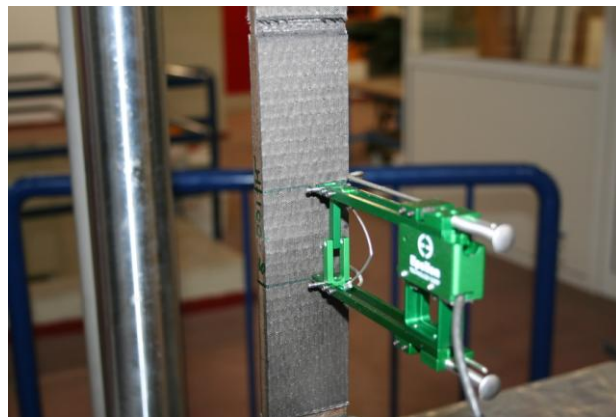
Σε όλα τα δοκίμια, εφαρμόστηκε έλεγχος μετατόπισης (displacement control) κατά την πειραματική διαδικασία. Επίσης, στα δοκίμια τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα, προκειμένου να μπορεί να μετρηθεί η παραμόρφωσή τους κατά τον εφελκυσμό. Το επιμηκυνσιόμετρο σε κάθε δοκίμιο τοποθετούνταν επάνω στο σύνθετο υλικό, ακριβώς στο σημείο που αντιστοιχούσε η ένωση των δύο χαλύβδινων πλακών και σε πλάτος 25 mm από κάθε πλευρά, δηλαδή είχε συνολικό άνοιγμα ίσο με 50 mm. Σε κάθε πειραματική δοκιμή λοιπόν, καταγραφόταν η δύναμη και η παραμόρφωση κάθε δοκιμίου, συναρτήσει της εφαρμοζόμενης μετατόπισης.

Η ταχύτητα μετακίνησης του εμβόλου της μηχανής ήταν 0.1 mm/min και η συχνότητα λήψης δεδομένων ίση με 10 Hz. Το πιάσιμο του δοκιμίου από τις αρπάγες της μηχανής γινόταν στα 50 mm εσωτερικά από το άκρο κάθε πλευράς του. Δεδομένου ότι το συνολικό μήκος των δοκιμίων των ομάδων A-100 και B-100 είναι ίσο με 500 mm, συνεπάγεται ότι το ελεύθερο μήκος τους, δηλαδή αυτό που βρίσκεται εκτός των αρπαγών ισούται με 400 mm, δηλαδή το ελεύθερο μήκος κάθε πλάκας είναι ίσο με 200 mm. Αντίστοιχα, το ελεύθερο μήκος των δοκιμίων A-50 και B-50 είναι ίσο με 300 mm, αφού το συνολικό μήκος τους ισούται με 400 mm, δηλαδή το ελεύθερο μήκος κάθε πλάκας είναι ίσο με 150 mm. Δεδομένων λοιπόν των παραπάνω, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια των προηγούμενων ομάδων ακολουθούν μια ομοιομορφία σε σχέση με το ελεύθερο μήκος κάθε μεταλλικής πλάκας, εφ' όσον οι δύο μεταλλικές πλάκες κάθε δοκιμίου έχουν το ίδιο συνολικό μήκος, επομένως και το ίδιο ελεύθερο μήκος, όταν το δοκίμιο πιάνεται από τις αρπάγες.

Κάτι τέτοιο όμως δεν συμβαίνει και για τα δοκίμια των ομάδων S και H, καθώς όπως έχουμε αναφέρει, αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες διαφορετικού μήκους μεταξύ τους, εφ' όσον η μία ισούται με 250 mm και η μία με 200 mm. Ωστόσο, και σε αυτά τα δοκίμια, το πιάσιμο του δοκιμίου από τις αρπάγες της μηχανής γινόταν στα 50 mm εσωτερικά από το άκρο κάθε πλευράς του. Αυτό δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα στα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς όπως αποδείχτηκε στην παράγραφο 2.5, από τη μοντελοποίηση του προβλήματος από τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Κουλουκούρα φάνηκε ότι το διαφορετικό ελεύθερο μήκος στις μεταλλικές πλάκες επιφέρει πολύ μικρές διαφορές στην αντοχή του συνδέσμου, σε σχέση με την περίπτωση όπου τα ελεύθερα μήκη είναι ίσα. Ειδικότερα, η προσομοίωση έδειξε ότι τα διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης είναι

περίπου ίδια, είτε το ελεύθερο μήκος των μεταλλικών πλακών είναι ίδιο είτε διαφορετικό, είτε δηλαδή οι αρπάγες μπαίνουν κατά διαφορετικό μήκος μέσα στο δοκίμιο, είτε κατά ίδιο. Με δεδομένα λοιπόν αυτά τα αποτελέσματα, αποφασίζουμε και στα δοκίμια των ομάδων S και H, το μήκος των πλακών που μπαίνει μέσα στις αρπάγες να ισούται με 50 mm και από τις δύο πλευρές, έστω και αν αυτό αφήνει διαφορετικό ελεύθερο μήκος στις δύο πλάκες, προκειμένου να αποφεύγονται φαινόμενα ανομοιόμορφης στήριξης των δοκιμίων.

Ως προς το χρόνο διάρκειας των πειραμάτων, αυτός κυμαινόταν από 3 λεπτά έως 20 λεπτά, ανάλογα με τη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας των μεταλλικών πλακών και το overlap length, όπως θα φανεί στη συνέχεια. Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 που ακολουθούν, παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες από την πειραματική διαδικασία.



Σχήμα 4.1: Στιγμιότυπο από την πειραματική διαδικασία

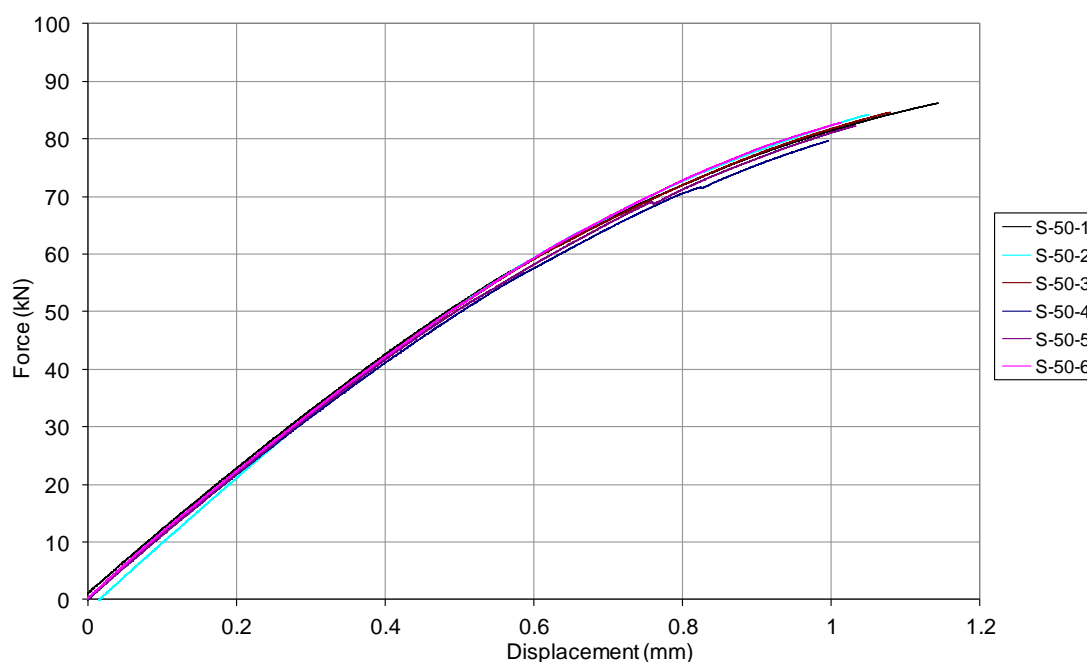


Σχήμα 4.2: Στιγμιότυπο από την πειραματική διαδικασία

## 4.2 Ανάλυση μετρήσεων

Το βασικό χαρακτηριστικό το οποίο θέλουμε να αξιολογήσουμε από τις πειραματικές δοκιμές είναι η δύναμη αστοχίας των δοκιμίων σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στον οποίο υπεβλήθησαν. Επιπλέον, μπορεί να αξιολογηθεί το μέτρο δυσκαμψίας των δοκιμίων, καθώς και οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κατά την καταπόνησή τους. Επιπλέον, ο στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης των δύο παραμέτρων που εξετάζουμε, δηλαδή της επιφανειακής επεξεργασίας των χαλύβδινων πλακών και του μήκους επικάλυψης, στα προηγούμενα μεγέθη.

Ξεκινώντας από τη μελέτη των αναπτυσσόμενων δυνάμεων των δοκιμίων, παραθέτουμε αρχικά τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης (force – displacement) για όλες τις ομάδες δοκιμίων. Αρχικά, στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για την ομάδα δοκιμίων S-50, δηλαδή για τα 6 δοκίμια της συγκεκριμένης ομάδας. Αυτό που μπορεί να εξαχθεί από τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι η επαναληψιμότητα στα 6 δοκίμια της συγκεκριμένης ομάδας. Αυτό γενικώς παρατηρείται, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, στα δοκίμια όλων των ομάδων, όπως θα φανεί στη συνέχεια.



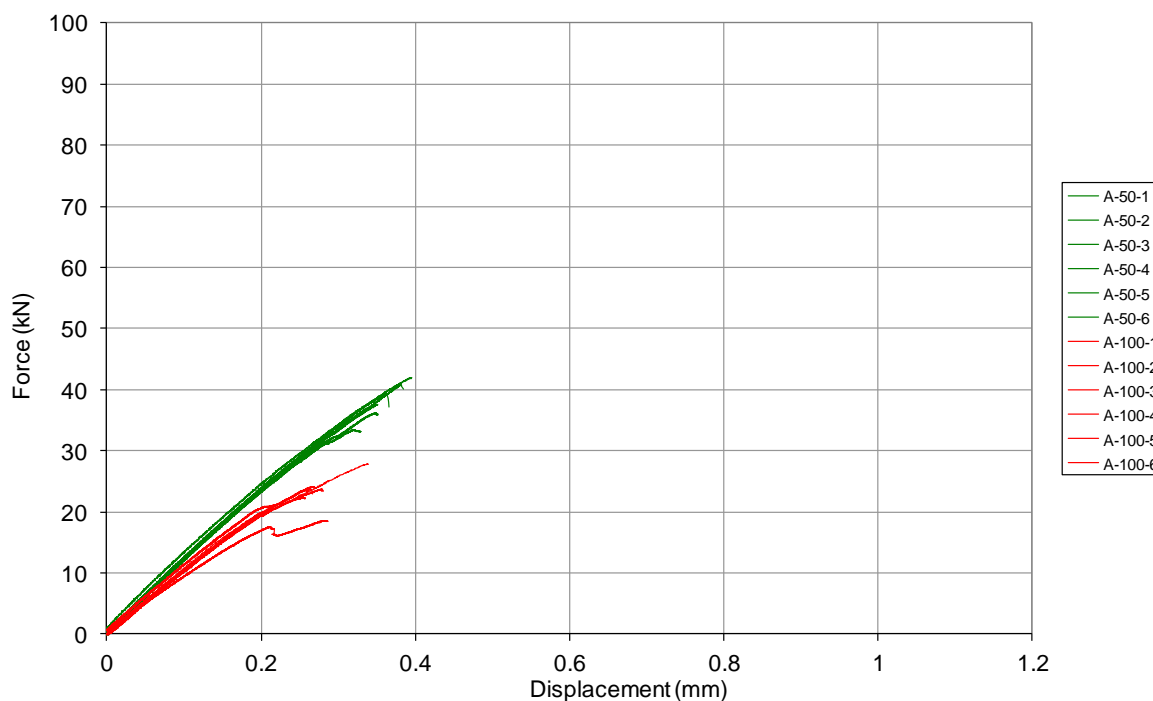
Σχήμα 4.3: Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης των δοκιμίων της ομάδας S-50

### 4.2.1 Επίδραση του μήκους επικάλυψης στην αντοχή

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του μήκους επικάλυψης στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις και κατ' επέκταση στις δυνάμεις αστοχίας των δοκιμίων, παρατίθενται στη συνέχεια τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για κάθε επιφανειακή επεξεργασία των

μεταλλικών πλακών, τόσο για μήκος επικάλυψης ίσο με 50 mm, όσο και για μήκος επικάλυψης ίσο με 100 mm.

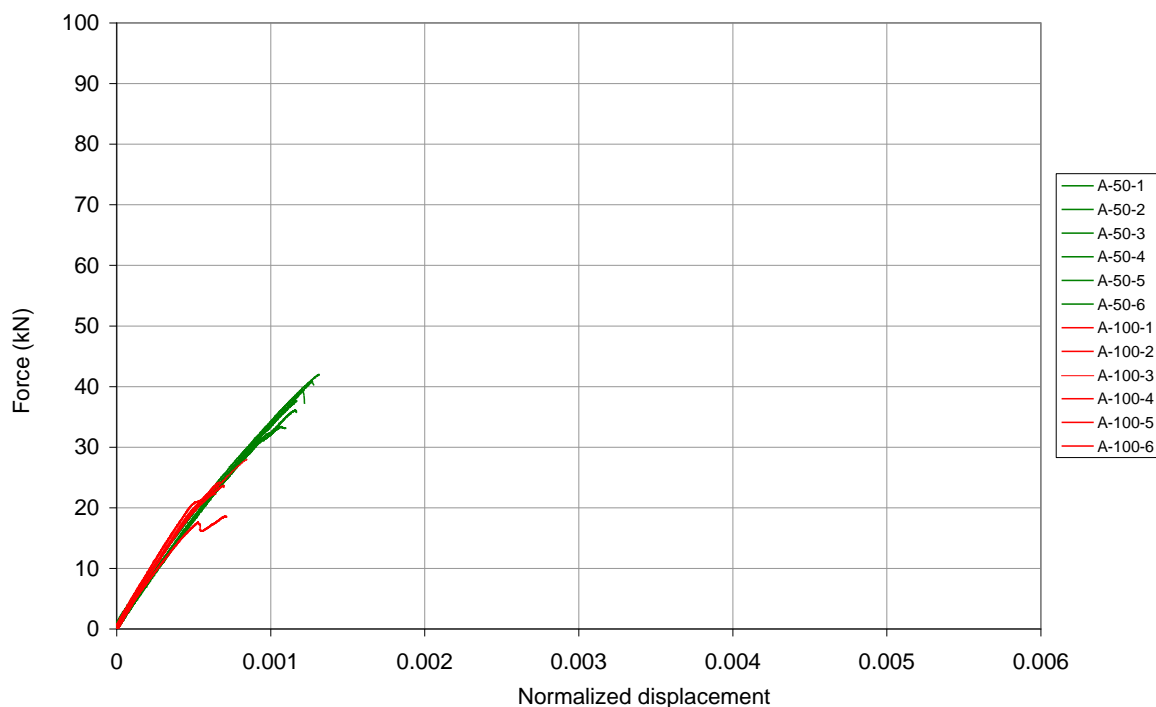
Ξεκινώντας από την επιφανειακή επεξεργασία με laser A, παρατίθενται στο Σχήμα 4.4 τα αντίστοιχα διαγράμματα όλων των δοκιμών των ομάδων A-50 και A-100. Σε κάθε περίπτωση, το πράσινο χρώμα στα διαγράμματα αναφέρεται στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm, ενώ το κόκκινο στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 100 mm.



**Σχήμα 4.4:** Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης των δοκιμών A-50 και A-100

Όπως είναι αντιληπτό, τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα συγκεκριμένα διαγράμματα δεν είναι αντιπροσωπευτικά, καθώς δεν είναι συγκρίσιμα τα μεγέθη στον άξονα των μετατοπίσεων για τις δύο διαφορετικές ομάδες δοκιμών, καθώς είναι διαφορετικό το αρχικό μήκος των δοκιμών αυτών. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια, στα διαγράμματα που παρουσιάζονται, στον άξονα x χρησιμοποιείται η ανηγμένη μετατόπιση (normalized displacement), δηλαδή η πραγματική μετατόπιση διαιρούμενη με το αρχικό μήκος του εκάστοτε δοκιμίου, προκειμένου τα διαγράμματα να είναι συγκρίσιμα.

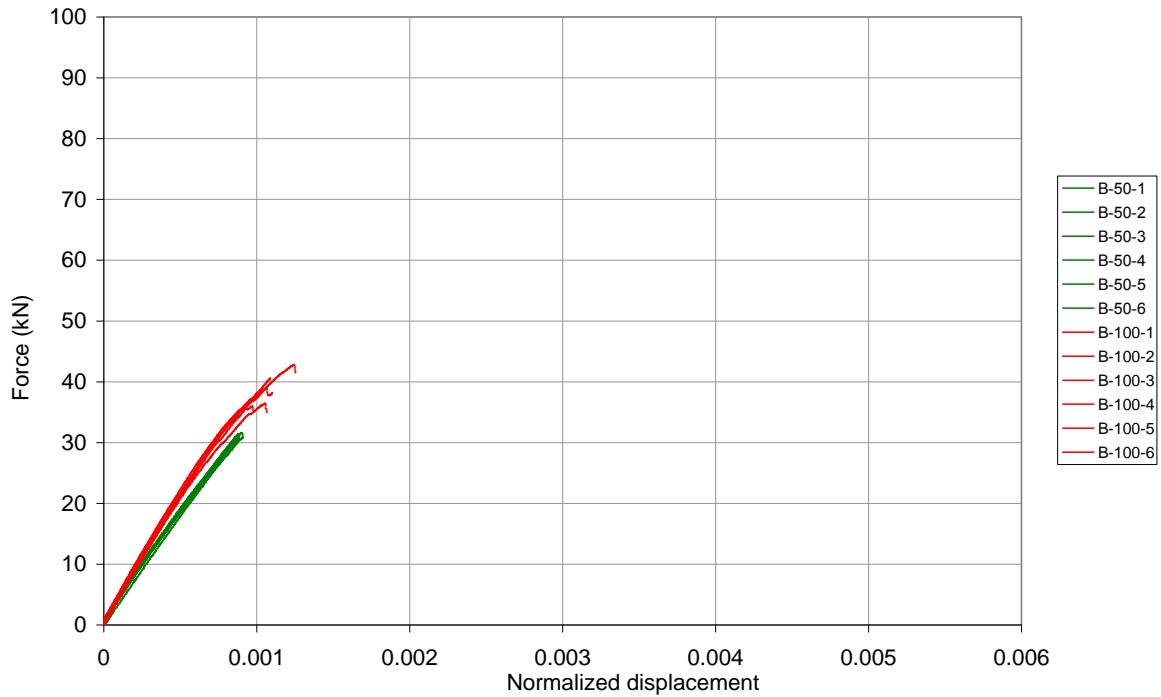
Στο Σχήμα 4.5 λοιπόν, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δοκιμών A-50 και A-100, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά την ανηγμένη μετατόπιση. Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι ότι τα δοκίμια A-50 παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές από τα δοκίμια A-100, φαίνεται δηλαδή πως το μικρότερο μήκος επικάλυψης οδηγεί σε μεγαλύτερες δυνάμεις αστοχίας για τα δοκίμια στα οποία οι χαλύβδινες επιφάνειες έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με laser τύπου A.



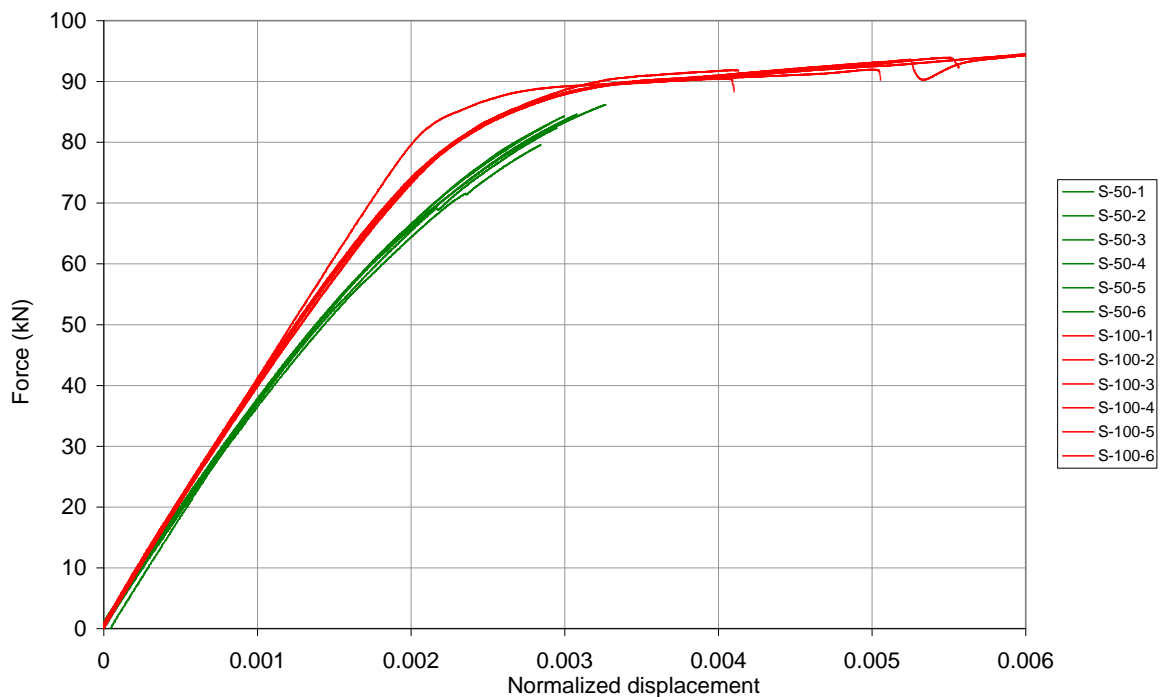
**Σχήμα 4.5:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων A-50 και A-100

Συνεχίζοντας, παραθέτουμε τα διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης για τα δοκίμια που έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με laser τύπου B, τόσο για αυτά με μήκος επικάλυψης 50 mm, όσο και για αυτά με μήκος επικάλυψης 100 mm. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, σε αυτή την περίπτωση τα δοκίμια B-50 έχουν μικρότερες δυνάμεις αστοχίας σε σχέση με τα δοκίμια B-100, δηλαδή το μεγαλύτερο μήκος επικάλυψης των δοκιμίων με τη συγκεκριμένη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας οδηγεί και σε μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια με το μικρότερο μήκος επικάλυψης.

Με το ίδιο σκεπτικό, στη συνέχεια παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης για τα δοκίμια της ομάδας S, δηλαδή για τα δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με αμμοβολή στα μεταλλικά μέρη τους. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα force – normalized displacement των δοκιμίων S-50 και S-100. Συγκρίνοντας τα δοκίμια αυτά μεταξύ τους, μπορούμε αρχικά να παρατηρήσουμε ότι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα δοκίμια με το μεγαλύτερο μήκος επικάλυψης, δηλαδή τα δοκίμια S-100, παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια S-50, που έχουν την ίδια επιφανειακή επεξεργασία αλλά μικρότερο μήκος επικάλυψης. Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε όσον αφορά στη μορφή των καμπυλών για τα διαγράμματα των ομάδων S-50 και S-100 είναι πως σε αυτά τα δοκίμια τα διαγράμματα παρουσιάζουν καμπυλότητα καθώς αυξάνεται η δύναμη και η μετατόπισή τους. Αυτό είναι ακόμη πιο έντονο για τα δοκίμια S-100, τα οποία παρουσιάζουν και τις μεγαλύτερες αντοχές. Κάτι τέτοιο δεν συνέβαινε στα δοκίμια των προηγούμενων ομάδων, όπου όπως είδαμε οι καμπύλες δύναμης – μετατόπισης ήταν σχεδόν γραμμικές μέχρι την αστοχία. Αυτό σημαίνει πως στα δοκίμια της ομάδας S-100, ο χάλυβας είχε περάσει το όριο διαρροής και είχε μπει στην πλαστική περιοχή μέχρι τη θραύση των δοκιμίων.



**Σχήμα 4.6:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμών B-50 και B-100

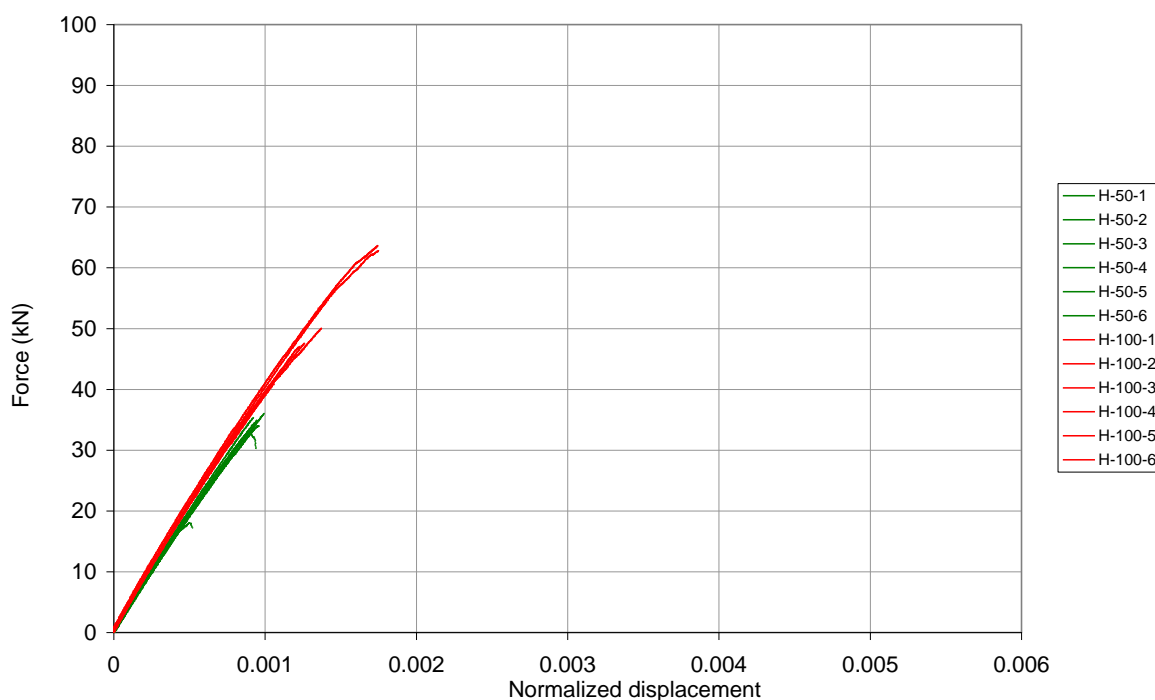


**Σχήμα 4.7:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμών S-50 και S-100

Προχωρώντας στην καταγραφή των αποτελεσμάτων, στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης για τα δοκίμια της ομάδας Η, δηλαδή για τα δοκίμια στα οποία οι χαλύβδινες πλάκες έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με γυαλόχαρτο. Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι ότι και σε αυτή τη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας, όπως και στις δύο προηγούμενες, τα δοκίμια με μεγαλύτερο



μήκος επικάλυψης, δηλαδή τα δοκίμια H-100, έχουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια H-50, που έχουν μικρότερο μήκος επικάλυψης.



**Σχήμα 4.8:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων H-50 και H-100

Εφ' όσον έχουμε παρουσιάσει τα αποτελέσματα όλων των ομάδων με ίδια επιφανειακή επεξεργασία των χαλύβδινων πλακών αλλά για τις δύο διαφορετικές τιμές του μήκους επικάλυψης σε κάθε περίπτωση, μπορούμε να εξάγουμε ένα αρχικό συμπέρασμα για την επίδραση του μήκους επικάλυψης στην αντοχή των δοκιμίων με ίδια επιφανειακή επεξεργασία. Αυτό που μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε είναι ότι στις ομάδες δοκιμίων B, S και H, τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 100 mm, παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 50 mm, κάτι που είναι λογικό και αναμενόμενο, καθώς το μεγαλύτερο μήκος επικάλυψης, σημαίνει μεγαλύτερο τμήμα σύνθετου υλικού στον εκάστοτε σύνδεσμο και συνεπώς συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή του συνδέσμου.

Αντιθέτως, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει για τα δοκίμια της ομάδας A, καθώς τα δοκίμια A-50, αν και έχουν μικρότερο μήκος επικάλυψης από τα δοκίμια A-100, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τα δεύτερα. Ο κύριος λόγος για τον οποίο συμβαίνει κάτι τέτοιο, είναι η έντονη καμπυλότητα των δοκιμίων της ομάδας A-100, η οποία επιφέρει σημαντική μείωση των αντοχών των δοκιμίων. Ένας άλλος λόγος για τον οποίο μπορεί να συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι το γεγονός πως κατά την κατασκευή της μίας πλευράς του συνδέσμου A-100, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, φάνηκε να μην έχει περάσει αρκετή ρητίνη στο σωληνάκι που απορροφούσε την περίσσεια ρητίνης κατά τη διάρκεια στερεοποίησης. Το γεγονός αυτό μπορεί να σημαίνει ότι δεν επετεύχθη το κατάλληλο κενό κατά τη διάρκεια στερεοποίησης, με αποτέλεσμα να μην απορροφάται όλη η περίσσεια

ρητίνης και στη συγκεκριμένη πλευρά το σύνθετο υλικό να έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε ρητίνη σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Αυτό επηρεάζει άμεσα την αντοχή του σύνθετου υλικού και κατ' επέκταση την αντοχή του κολλητού συνδέσμου, η οποία μπορεί και για αυτό το λόγο να είναι αρκετά μειωμένη. Επομένως, δεν είναι ενδεικτική και αξιόπιστη η σύγκριση των αντοχών ανάμεσα στα δοκίμια A-50 και A-100.

Για να έχουμε και μία πιο ποσοτική εικόνα των αντοχών των δοκιμίων, στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι δυνάμεις αστοχίας όλων των δοκιμίων για κάθε ομάδα και στο τέλος φαίνεται ο μέσος όρος των δυνάμεων αστοχίας για κάθε ομάδα δοκιμίων. Επιπλέον, για κάθε ομάδα παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση, καθώς και ο συντελεστής μεταβλητότητας C.V., που υπολογίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο. Από τον πίνακα, είναι εμφανείς οι πολύ μεγάλες αντοχές που παρουσιάζουν τα δοκίμια S-50 και S-100 σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Φαίνεται επίσης ότι την καλύτερη επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα παρουσιάζουν επίσης οι ομάδες S-50 και S-100. Αντιθέτως, τη χειρότερη επαναληψιμότητα παρουσιάζουν οι ομάδες H-50 και H-100, που παρουσιάζουν πολύ μεγάλες τιμές του C.V.. Ο λόγος που υπάρχει αυτή η μεγάλη μεταβλητότητα στα αποτελέσματα των δοκιμίων των ομάδων H-50 και H-100 είναι καθαρά συνέπεια της επιφανειακής επεξεργασίας. Με την επεξεργασία των χαλύβδινων επιφανειών με γυαλόχαρτο δεν μπορεί να επιτευχθεί η ίδια τραχύτητα σε όλη τη μεταλλική επιφάνεια, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανομοιομορφία στις δυνάμεις πρόσφυσης που αναπτύσσονται με το σύνθετο υλικό, τόσο από δοκίμιο σε δοκίμιο κάθε ομάδας, όσο και ανάμεσα στις ομάδες δοκιμίων H-50 και H-100.

**Πίνακας 4.1:** Δυνάμεις αστοχίας και μέσος όρος τους για όλες τις ομάδες δοκιμίων

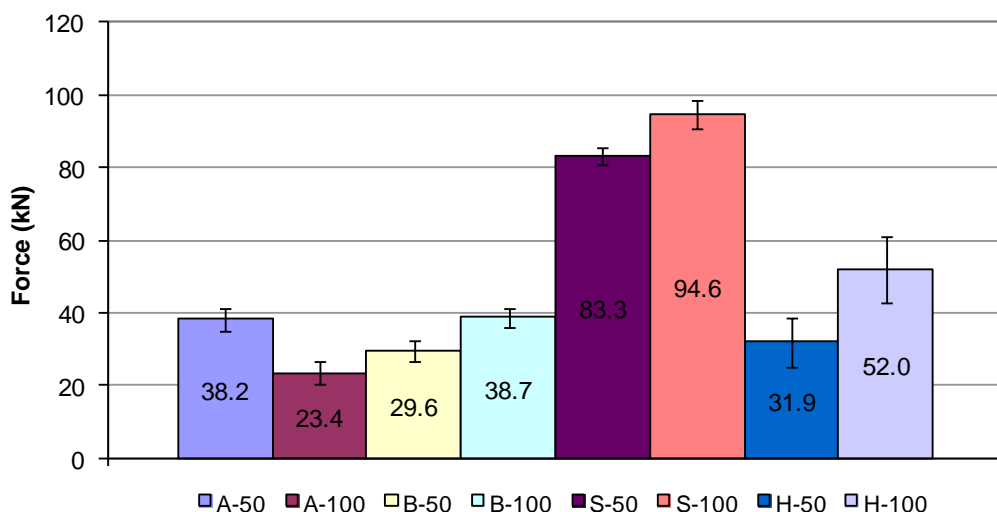
kN	A-50	A-100	B-50	B-100	S-50	S-100	H-50	H-100
1	39.3	23.67	30.8	36.45	86.2	99.6	35.3	47.0
2	40.9	23.7	24.0	40.6	84.3	94.0	18.0	63.7
3	42.0	22.4	31.0	39.0	84.6	99.6	33.1	62.8
4	36.1	28.0	31.5	36.0	79.6	91.9	34.9	40.9
5	33.4	24.2	28.5	37.3	82.3	92.0	34.0	50.0
6	37.6	18.6	31.6	42.8	82.9	90.5	36.0	47.6
<b>M.O.</b>	<b>38.2</b>	<b>23.4</b>	<b>29.6</b>	<b>38.7</b>	<b>83.3</b>	<b>94.6</b>	<b>31.9</b>	<b>52.0</b>
<b>T.A.</b>	3.2	3.0	3.0	2.6	2.3	4.0	6.9	9.2
<b>C.V.</b>	<b>8.3 %</b>	<b>12.9 %</b>	<b>10.0 %</b>	<b>6.8 %</b>	<b>2.7 %</b>	<b>4.3 %</b>	<b>21.6 %</b>	<b>17.7 %</b>

Στο Σχήμα 4.9 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα ραβδόγραμμα, στο οποίο απεικονίζονται οι δυνάμεις αστοχίας όλων των ομάδων, καθώς επίσης και η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση. Αναφορικά και με τον Πίνακα 4.1, φαίνονται οι μεγάλες αντοχές των ομάδων S-50 και S-100, που μπορεί να φτάνουν έως και σε διπλάσιες τιμές σε σχέση με τις αντοχές των άλλων δοκιμίων. Επιπλέον, φαίνεται η μεγάλη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων στις ομάδες H-50 και H-100.

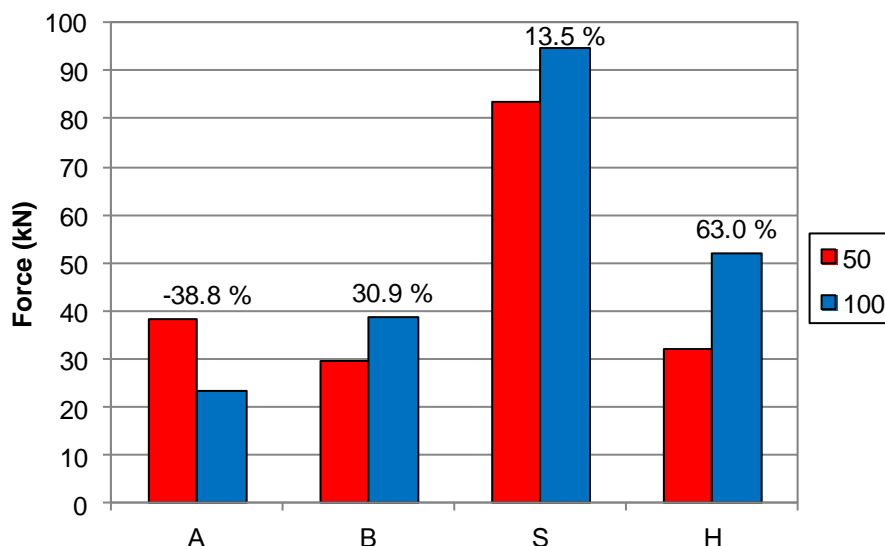
Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται και πάλι ένα ραβδόγραμμα, στο οποίο γίνεται ομαδοποίηση των δοκιμίων ανάλογα με τη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας. Σε κάθε περίπτωση, πάνω στο διάγραμμα αναγράφεται η διαφορά των δυνάμεων αντοχής των δοκιμίων με μήκος επικάλυψης 100 mm, σε σχέση με τις δυνάμεις αντοχής των δοκιμίων

με μήκος επικάλυψης 50 mm, για κάθε μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας. Παρατηρούμε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ότι στις 3 από τις 4 μεθόδους επιφανειακής επεξεργασίας, δηλαδή τις B, S και H, τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 100 mm παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm. Η μόνη περίπτωση που δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι στη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας με laser τύπου A, όπου τα δοκίμια με μικρότερο μήκος επικάλυψης παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή. Αυτό, όπως έχουμε αναφέρει, οφείλεται στη μεγάλη καμπυλότητα των δοκιμίων A-100 αλλά και στο γεγονός ότι, κατά τα φαινόμενα, το σύνθετο υλικό στη μία πλευρά του συγκεκριμένου συνδέσμου έχει μικρότερη αντοχή σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, καθώς λόγω κατασκευαστικού λάθους, δεν επετεύχθη το επιθυμητό κενό, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ρητίνη στο σύνθετο υλικό αυτής της πλευράς. Για το λόγο αυτό, η σύγκριση των αντοχών των δοκιμίων A-50 και A-100 δεν θα χρησιμοποιηθεί στην τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς δεν είναι ενδεικτική και αξιόπιστη.

Επιπλέον, από το Σχήμα 4.10, παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά στις δυνάμεις αστοχίας εμφανίζεται για τα δοκίμια H, όπου τα δοκίμια H-100 παρουσιάζουν κατά 63 % μεγαλύτερες αντοχές κατά μέσο όρο σε σχέση με τα δοκίμια H-50. Αυτή η μεγάλη διακύμανση στα αποτελέσματα των δοκιμίων H-50 και H-100, τόσο μεμονωμένα σε κάθε ομάδα όσο και συγκρίνοντας τις δύο ομάδες μεταξύ τους, είναι όπως έχουμε ήδη αναφέρει, συνέπεια των διαφορετικών δυνάμεων πρόσφυσης που αναπτύσσονται στους συγκεκριμένους συνδέσμους, λόγω της μεγάλης ανομοιομορφίας στην τραχύτητα των χαλύβδινων επιφανειών που επιτυγχάνεται με χρήση του γυαλόχαρτου.



**Σχήμα 4.9:** Ραβδόγραμμα που απεικονίζει τους μέσους όρους των δυνάμεων αστοχίας και τη μεταβλητότητα όλων των συνδέσμων

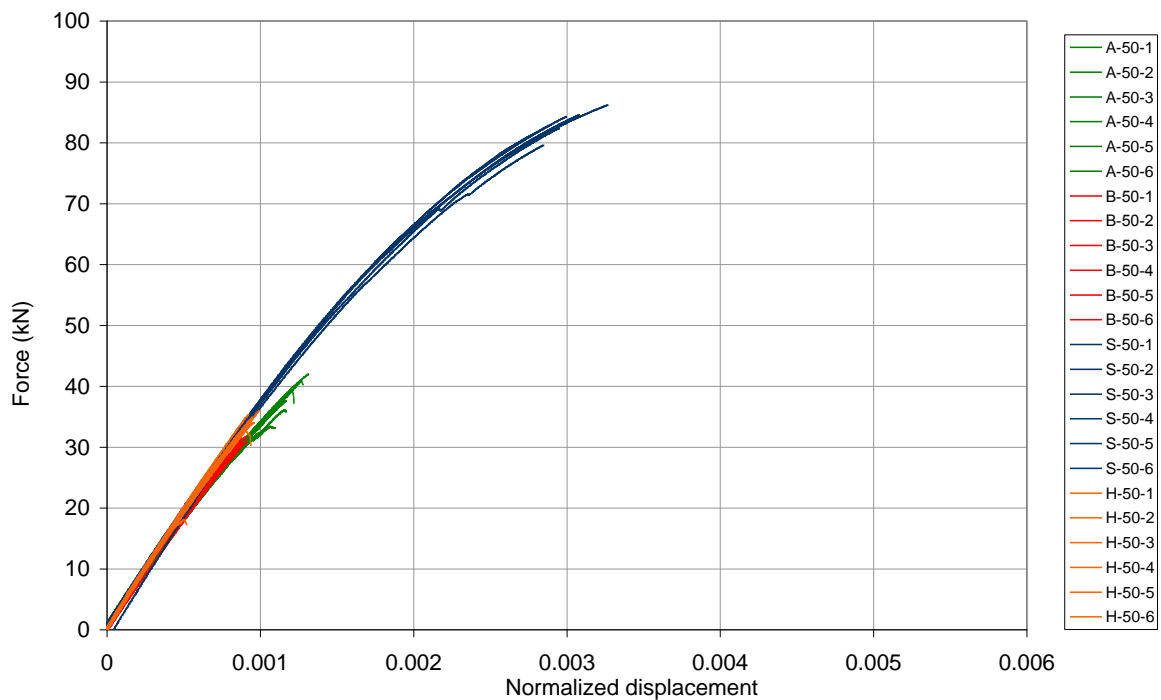


**Σχήμα 4.10:** Ραβδόγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των δυνάμεων αστοχίας ανάμεσα στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm και 100 mm για κάθε επιφανειακή επεξεργασία

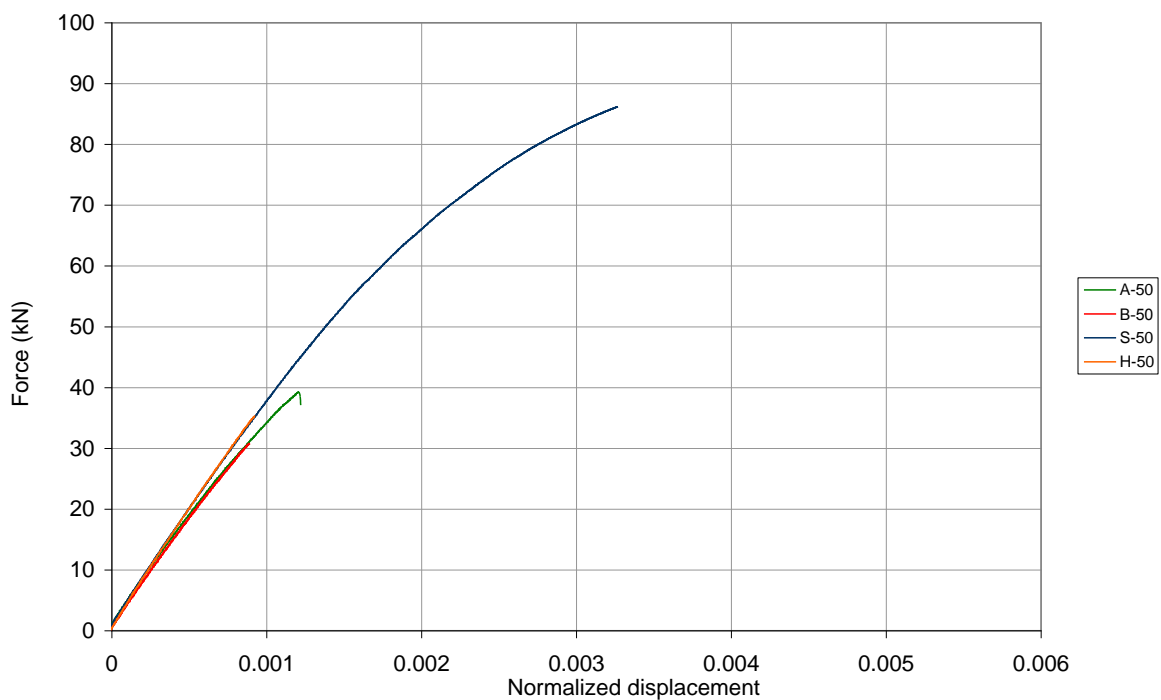
#### 4.2.2 Επίδραση της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας των χαλύβδινων πλακών στην αντοχή

Μέχρι τώρα έχει γίνει η μελέτη της επίδρασης της μίας παραμέτρου από τις δύο που εξετάζουμε, δηλαδή του μήκους επικάλυψης, καθώς στα προηγούμενα διαγράμματα έγινε σύγκριση των δύο διαφορετικών τιμών του μήκους επικάλυψης για κάθε επιφανειακή επεξεργασία ξεχωριστά. Στη συνέχεια λοιπόν, εξετάζεται η επίδραση της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας των χαλύβδινων πλακών στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις. Για το λόγο αυτό, στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης για όλα τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 50 mm, και για τις 4 επιφανειακές επεξεργασίες που εφαρμόστηκαν στα δοκίμια μας. Το πράσινο χρώμα αναφέρεται στα δοκίμια που έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με laser τύπου A, το κόκκινο σε αυτά που έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με laser τύπου B, το μπλε σε αυτά που έχουν υποστεί επεξεργασία με αμμοβολή και το πορτοκαλί σε αυτά που έχουν υποστεί επεξεργασία με γυαλόχαρτο.

Για λόγους ευκρίνειας, στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα, αλλά σε αυτή την περίπτωση σε κάθε μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας αντιστοιχεί ένα από τα 6 δοκίμια της εκάστοτε ομάδας, απεικονίζεται δηλαδή μόνο ένα δοκίμιο για κάθε ομάδα και όχι και τα 6.



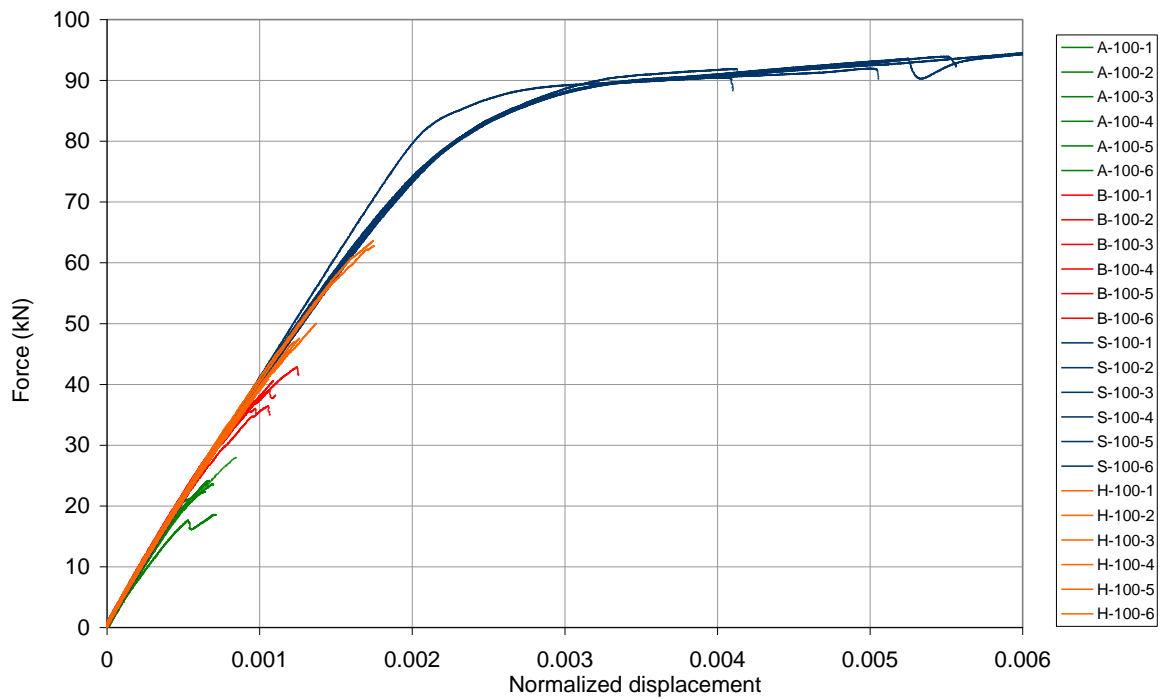
**Σχήμα 4.11:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων με μήκος επικάλυψης 50 mm



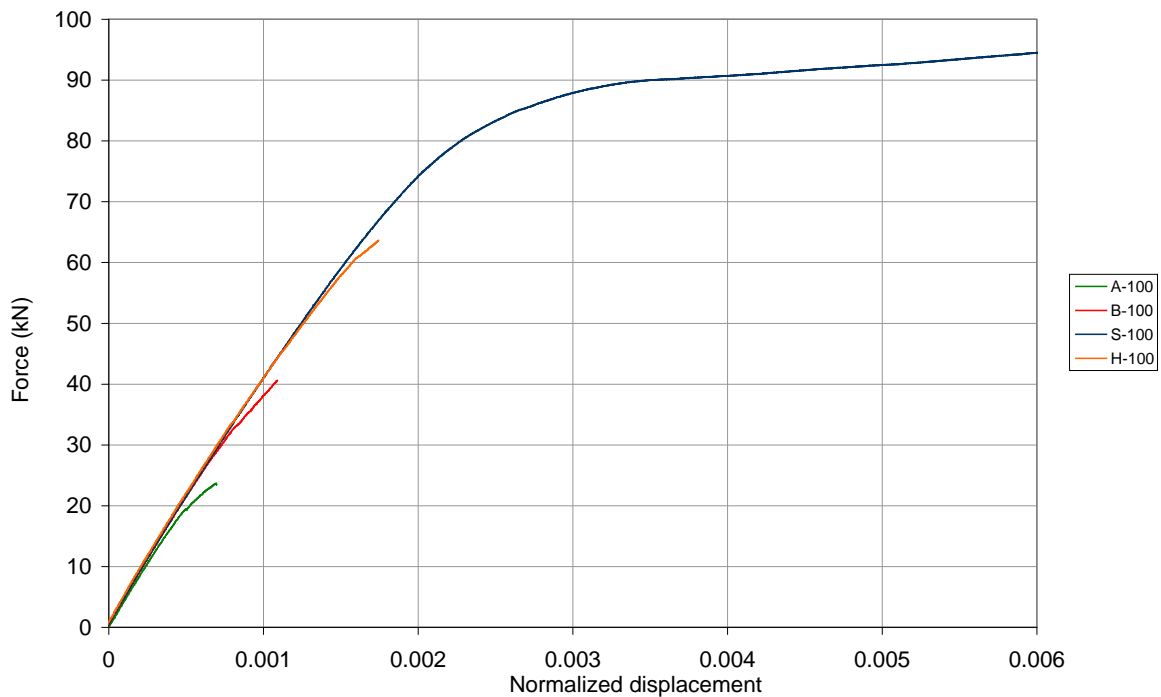
**Σχήμα 4.12:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων με μήκος επικάλυψης 50 mm (ενδεικτικά ένα για κάθε μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας)

Με το ίδιο σκεπτικό, στα Σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης ίσο με 100 mm για όλες τις επιφανειακές επεξεργασίες. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια, δηλαδή και

τα 6 δοκίμια κάθε ομάδας, ενώ στο Σχήμα 4.14 φαίνεται μόνο ένα δοκίμιο για κάθε ομάδα συνδέσμων, για λόγους ευκρίνειας.



**Σχήμα 4.13:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων με μήκος επικάλυψης 100 mm



**Σχήμα 4.14:** Διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων με μήκος επικάλυψης 100 mm (ενδεικτικά ένα για κάθε μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας)

Η πρώτη σημαντική παρατήρηση που μπορεί να γίνει για τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι οι πολύ μεγάλες αντοχές που εμφανίζουν τα δοκίμια, των οποίων οι χαλύβδινες πλάκες έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με αμμοβολή. Παρατηρούμε ότι όλα τα δοκίμια τύπου S, παρουσιάζουν πολύ μεγάλες δυνάμεις αστοχίας και στις δύο περιπτώσεις του μήκους επικάλυψης. Οι δυνάμεις αστοχίας των δοκιμίων τύπου S μπορεί να φτάνουν και σε διπλάσιες τιμές σε σχέση με άλλα δοκίμια με ίδιο μήκος επικάλυψης και άλλη επιφανειακή επεξεργασία. Αυτές οι μεγάλες αντοχές των δοκιμίων τύπου S οφείλονται στο γεγονός ότι με τη μέθοδο της αμμοβολής επιτυγχάνεται μία ομοιόμορφη τραχύτητα επιφανείας, η οποία οδηγεί σε πιο ευνοϊκές δυνάμεις πρόσφυσης και πιο ικανοποιητικές συνθήκες συγκράτησης του σύνθετου υλικού με τις χαλύβδινες πλάκες.

Προχωρώντας στην ερμηνεία των διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι για τις δύο διαφορετικές τιμές του μήκους επικάλυψης, δεν ακολουθείται η ίδια σειρά στην απόδοση των μεθόδων επιφανειακής επεξεργασίας από πλευράς αντοχής. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm, παρατηρούμε ότι η δεύτερη πιο ικανοποιητική μέθοδος από πλευράς αντοχής είναι η μέθοδος laser τύπου A, ακολουθεί η μέθοδος που κάνει χρήση γυαλόχαρτου (H), ενώ η μέθοδος που οδηγεί στις πιο χαμηλές δυνάμεις αστοχίας είναι η μέθοδος με laser τύπου B. Από την άλλη μεριά, στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 100 mm, φαίνεται ότι η δεύτερη πιο ικανοποιητική μέθοδος είναι αυτή που κάνει χρήση γυαλόχαρτου (H), ακολουθεί η μέθοδος laser τύπου B και τελευταία είναι η μέθοδος laser τύπου A, η οποία παρουσιάζει τις χαμηλότερες αντοχές στα αντίστοιχα δοκίμια.

Ενδεικτικά, για λόγους πληρότητας, αναφέρεται ότι στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm, τα δοκίμια B-50 παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή κατά 22.6 % από τα δοκίμια A-50, τα δοκίμια S-50 παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή κατά 118 % σε σχέση με τα A-50, ενώ τα δοκίμια H-50 παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή κατά 16.5 % σε σχέση με τα δοκίμια A-50. Από την άλλη μεριά, στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 100 mm, τα δοκίμια B-100 παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή κατά 65.4 % σε σχέση με τα δοκίμια A-100, τα δοκίμια S-100 παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή κατά 304.2 % σε σχέση με τα δοκίμια A-100, ενώ τα δοκίμια H-100 παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή κατά 122.2 % σε σχέση με τα δοκίμια A-100.

Είναι λοιπόν προφανές πως σε κάθε περίπτωση τα δοκίμια που έχουν υποστεί αμμοβολή έχουν πολύ μεγαλύτερες αντοχές σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια, ενώ για τις υπόλοιπες μεθόδους υπάρχει μια ανομοιομορφία στην επίδρασή τους στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, ανάλογα με το μήκος επικάλυψης. Για μήκος επικάλυψης 50 mm, τις μικρότερες αντοχές παρουσιάζουν τα δοκίμια της ομάδας B, ενώ για μήκος επικάλυψης 100 mm, τις μικρότερες αντοχές παρουσιάζουν τα δοκίμια της ομάδας A, λόγω της έντονης καμπυλότητάς τους και της μειωμένης αντοχής του σύνθετου υλικού. Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο εδάφιο, λόγω των ελαττωμάτων των συνδέσμων A-100, τα δοκίμια αυτής της ομάδας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τελική αξιολόγηση των αντοχών όλων των συνδέσμων.

Επομένως, προκειμένου να κάνουμε μια σύγκριση ανάμεσα στις αντοχές των δοκιμίων A και B, που έχουν υποστεί επιφανειακή επεξεργασία με δύο διαφορετικές μεθόδους laser,

θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm και για τις δύο ομάδες. Το συμπέρασμα λοιπόν που μπορεί να εξαχθεί συγκρίνοντας τις αντοχές των δοκιμίων A-50 και B-50 είναι πως με τη μέθοδο laser A επιτυγχάνονται μεγαλύτερες αντοχές στα αντίστοιχα δοκίμια κατά 22.6 % κατά μέσο όρο σε σχέση με τη μέθοδο laser B. Αυτή η διαφορά στις αντοχές των δοκιμίων που έχουν υποστεί επεξεργασία με τις δύο διαφορετικές μεθόδους laser, οφείλεται στη διαφορά των μικροδομών που σχηματίζονται με κάθε μέθοδο. Όπως είχε αναφερθεί στην παράγραφο 2.2, με τη μέθοδο A, η μικροδομή που έχει σχήμα άκρου τόξου δεν χαρακτηρίζεται από τόση ομοιομορφία σε σχέση με τη μικροδομή της μεθόδου B, που έχει σχήμα αστερίσκου και έχει την ίδια μορφή προς όλες τις κατευθύνσεις. Ωστόσο, όσον αφορά στη μέθοδο A, τα σχήματα της μικροδομής έχουν την ίδια φορά, με την κορυφή του τόξου να «κοιτάει» σε κάθε περίπτωση προς την ακατέργαστη επιφάνεια κάθε πλάκας. Όπως είδαμε, αυτή είναι και η φορά άσκησης της δύναμης σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στον οποίο υπεβλήθησαν όλα τα δοκίμια. Αυτή η ομοιομορφία στη φορά των σχημάτων της μικροδομής σε σχέση με τη φορά άσκησης της δύναμης σε μονοαξονικό εφελκυσμό, οδήγησε τελικά σε αυξημένες αντοχές των δοκιμίων A σε σχέση με τα δοκίμια B.

#### 4.2.3 Μελέτη ακαμψίας δοκιμίων

Με παρόμοια λογική με αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα, θα ακολουθήσει μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που αφορούν στην ακαμψία των δοκιμίων όλων των ομάδων. Η ακαμψία των δοκιμίων ισούται με την κλίση του γραμμικού τμήματος των καμπυλών στα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης και μετράται σε N/mm.

Για να έχουμε μία ποσοτική εικόνα της ακαμψίας των δοκιμίων, στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ακαμψίες όλων των δοκιμίων για κάθε ομάδα και στο τέλος φαίνεται ο μέσος όρος της ακαμψίας για κάθε ομάδα δοκιμίων. Επιπλέον, για κάθε ομάδα παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση, καθώς και ο συντελεστής μεταβλητότητας C.V..

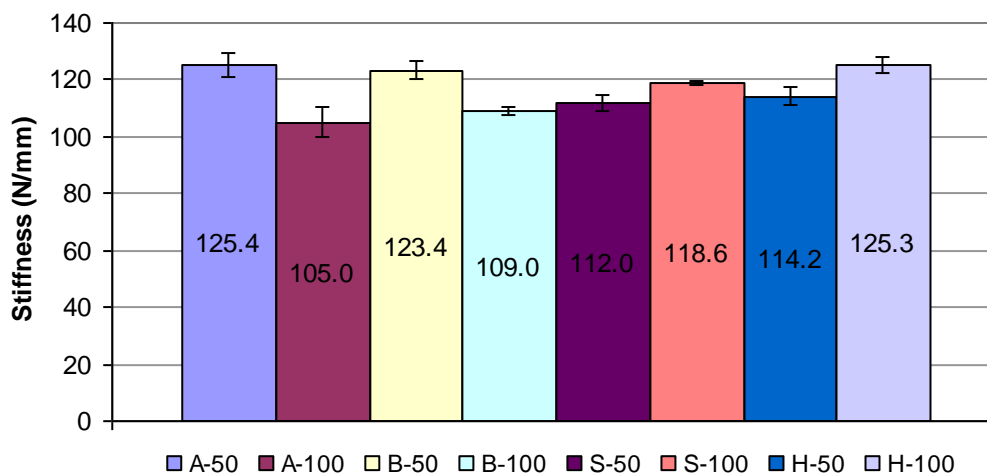
**Πίνακας 4.2:** Ακαμψίες για όλες τις ομάδες δοκιμίων (N/mm)

N/mm	<b>A-50</b>	<b>A-100</b>	<b>B-50</b>	<b>B-100</b>	<b>S-50</b>	<b>S-100</b>	<b>H-50</b>	<b>H-100</b>
<b>1</b>	123.70	105.64	123.68	107.63	110.54	119.12	113.94	125.98
<b>2</b>	124.34	108.75	119.69	107.56	115.86	118.57	117.92	128.69
<b>3</b>	133.85	108.11	120.38	110.02	113.89	119.09	113.36	122.02
<b>4</b>	125.31	106.32	127.10	111.39	110.71	119.16	117.85	122.68
<b>5</b>	121.20	106.38	125.96	108.61	108.44	118.15	109.88	127.31
<b>6</b>	124.27	94.63	123.35	109.06	112.43	117.48	112.51	124.98
<b>M.O.</b>	<b>125.44</b>	<b>104.97</b>	<b>123.36</b>	<b>109.05</b>	<b>111.98</b>	<b>118.60</b>	<b>114.24</b>	<b>125.28</b>
<b>T.A.</b>	<b>4.34</b>	<b>5.20</b>	<b>2.94</b>	<b>1.47</b>	<b>2.65</b>	<b>0.68</b>	<b>3.14</b>	<b>2.60</b>
<b>C.V.</b>	<b>3.46 %</b>	<b>4.96 %</b>	<b>2.38 %</b>	<b>1.35 %</b>	<b>2.37 %</b>	<b>0.57 %</b>	<b>2.75 %</b>	<b>2.07 %</b>

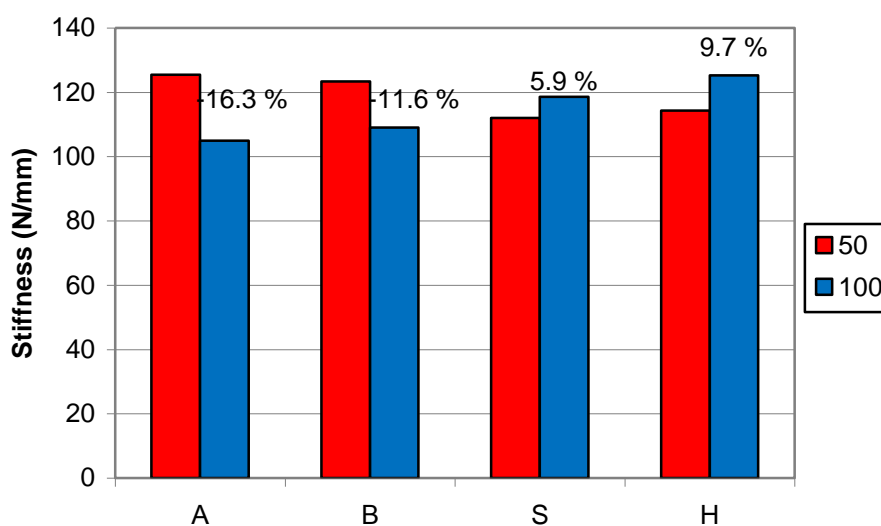
Στο Σχήμα 4.15 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα ραβδόγραμμα, στο οποίο απεικονίζονται οι ακαμψίες όλων των ομάδων, καθώς επίσης και η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε περίπτωση.



Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται και πάλι ένα ραβδόγραμμα, στο οποίο γίνεται ομαδοποίηση των δοκιμών ανάλογα με τη μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας. Σε κάθε περίπτωση, πάνω στο διάγραμμα αναγράφεται η διαφορά της ακαμψίας των δοκιμών με μήκος επικάλυψης 100 mm, σε σχέση με τις δυνάμεις αντοχής των δοκιμών με μήκος επικάλυψης 50 mm, για κάθε μέθοδο επιφανειακής επεξεργασίας.



**Σχήμα 4.15:** Ραβδόγραμμα που απεικονίζει τους μέσους όρους της ακαμψίας και τη μεταβλητότητα όλων των συνδέσμων



**Σχήμα 4.16:** Ραβδόγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά της ακαμψίας ανάμεσα στα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm και 100 mm για κάθε επιφανειακή επεξεργασία

Από τα προηγούμενα αποτελέσματα, μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του μήκους επικάλυψης και της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας των χαλύβδινων πλακών στην ακαμψία των συνδέσμων. Αρχικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στις δύο από τις τέσσερις επιφανειακές επεξεργασίες, και

συγκεκριμένα στις A και B, που κάνουν χρήση laser, η μικρότερη τιμή του μήκους επικάλυψης, δηλαδή τα 50 mm, οδηγεί σε μεγαλύτερες ακαμψίες τα αντίστοιχα δοκίμια, σε σχέση με αυτά με μήκος επικάλυψης ίσο με 100 mm. Αντίθετα, για τους συνδέσμους S και H, που αντιστοιχούν σε χρήση αμμοβολής και γυαλόχαρτου αντίστοιχα για την επιφανειακή επεξεργασία των μεταλλικών πλακών, το μεγαλύτερο μήκος επικάλυψης οδηγεί και σε μεγαλύτερη ακαμψία. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.12, στο οποίο φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης – ανηγμένης μετατόπισης που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση σε περιβάλλον ANSYS από τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Κουλουκούρα, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με μεγαλύτερο μήκος επικάλυψης έχουν και μεγαλύτερη ακαμψία, η οποία ισούται με την κλίση των καμπυλών. Αυτό επαληθεύεται πειραματικά, όπως είδαμε, για τα δοκίμια των ομάδων S και H. Ωστόσο, δεν επαληθεύεται για τα δοκίμια A και B. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, στα δοκίμια A-100 παρατηρήθηκαν κάποιες ατέλειες, οι οποίες και σε αυτή την περίπτωση είναι πιθανό να είναι υπεύθυνες για τη μειωμένη ακαμψία των συγκεκριμένων δοκιμίων σε σχέση με τα δοκίμια A-50. Ωστόσο, μία αντίστοιχη ερμηνεία δεν είναι δυνατό να γίνει για τα δοκίμια της ομάδας B, επομένως διαπιστώνουμε ότι η μειωμένη ακαμψία των δοκιμίων B-100 σε σχέση με τα δοκίμια B-50 οφείλεται σε δευτερογενείς παράγοντες.

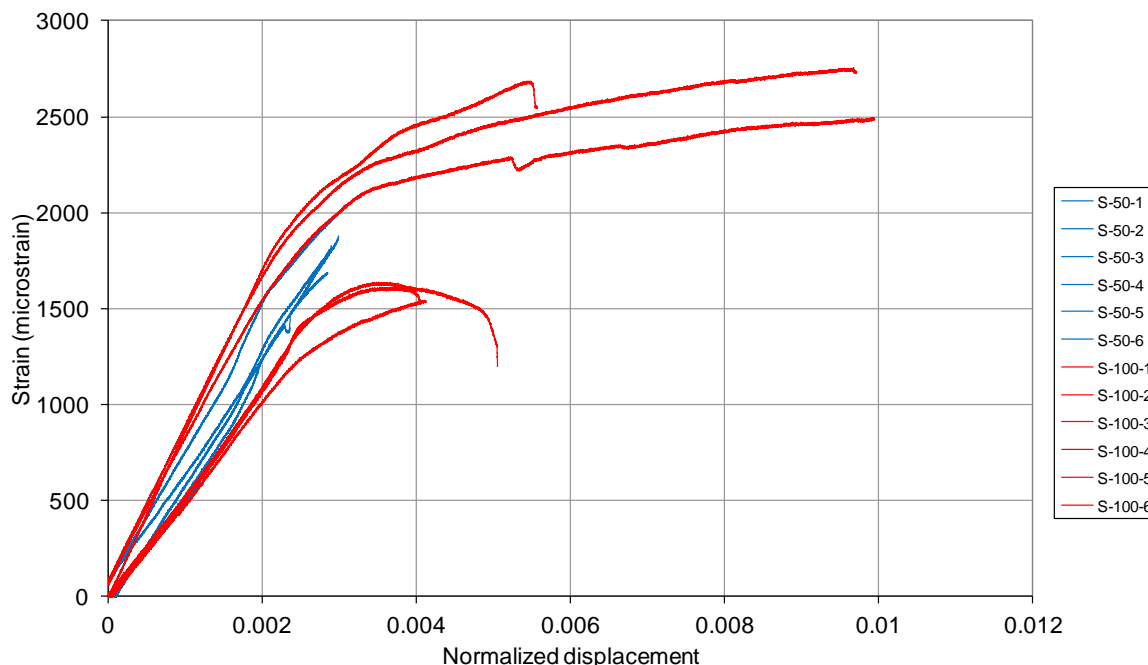
Όσον αφορά στην επίδραση της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας στην ακαμψία, από τα προηγούμενα διαγράμματα παρατηρούμε ότι για μήκος επικάλυψης 50 mm, τη μεγαλύτερη ακαμψία παρουσιάζουν τα δοκίμια A-50 και ακολουθούν τα δοκίμια B-50 και H-50, με τη μικρότερη ακαμψία να παρατηρείται στα δοκίμια S-50. Για μήκος επικάλυψης 100 mm, τη μεγαλύτερη ακαμψία παρουσιάζουν τα δοκίμια H-100 και ακολουθούν τα δοκίμια S-100 και B-100, με τη μικρότερη ακαμψία να παρατηρείται στα δοκίμια A-100.

Μία γενική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι ότι διαπιστώνεται πολύ καλή επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα της ακαμψίας, τόσο από δοκίμιο σε δοκίμιο κάθε ομάδας όσο και ανάμεσα στις διαφορετικές ομάδες δοκιμίων. Από τον Πίνακα 4.2 και το Σχήμα 4.15 βλέπουμε ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας (C.V.) παίρνει χαμηλές τιμές, γεγονός που αποδεικνύει την πολύ καλή επαναληψιμότητα στις τιμές της ακαμψίας. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν παρατηρείται ομοιομορφία στην κατάταξη των δοκιμίων από την πλευρά της ακαμψίας τους για τις διαφορετικές τιμές του μήκους επικάλυψης.

#### **4.2.4 Μελέτη παραμορφώσεων**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα για ανάλυση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων σε κάθε περίπτωση. Λόγω όμως της μεγάλης καμπυλότητας που παρουσίαζαν τα δοκίμια και η οποία δεν ήταν σε καμία περίπτωση ομοιόμορφη, το επιμηκυνσιόμετρο λάμβανε σε κάθε περίπτωση και τις καμπτικές δυνάμεις που αναπτύσσονταν στο εκάστοτε δοκίμιο, μέχρι να γίνει η συγκράτησή του από τις αρπάγες. Λόγω λοιπόν αυτών των μετρήσεων και της μεγάλης καμπυλότητας των δοκιμίων, δεν είναι δυνατό να ερμηνευθούν σωστά τα αποτελέσματα και να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων μέσω

μελέτης της επίδρασης των δύο παραμέτρων σε αυτές, καθώς παρατηρείται μεγάλη μεταβλητότητα στις μετρήσεις. Ωστόσο, παρατίθεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.17 ένα διάγραμμα παραμόρφωσης – ανηγμένης μετατόπισης (strain – normalized displacement) για τα δοκίμια S-50 και S-100.



**Σχήμα 4.17:** Διαγράμματα παραμόρφωσης – ανηγμένης μετατόπισης των δοκιμίων S-50 και S-100

Στο συγκεκριμένο σχήμα, οι μπλε καμπύλες αναφέρονται στα δοκίμια S-50 και οι κόκκινες καμπύλες στα δοκίμια S-100. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει ικανοποιητική επαναληψιμότητα στις παραμορφώσεις των δοκιμίων της ίδιας ομάδας, λόγω των όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως. Παρατηρούμε δηλαδή ότι υπάρχουν περιπτώσεις δοκιμίων με μήκος επικάλυψης 100 mm, τα οποία παρουσιάζουν μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με δοκίμια που έχουν μήκος επικάλυψης 50 mm, αλλά και το αντίστροφο. Γεγονός είναι, ωστόσο, ότι τα δοκίμια δεν παρουσίασαν μεγάλες παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση τους.

### 4.3 Τρόπος αστοχίας δοκιμίων

Όσον αφορά στον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων, σε όλες τις περιπτώσεις προκαλούνταν αποκόλληση του σύνθετου υλικού από τις μεταλλικές πλάκες, η οποία κατ' επέκταση οδηγούσε σε αποχωρισμό των δύο μεταλλικών πλακών μεταξύ τους, αφού η συγκράτηση των δύο πλακών επιτυγχανόταν ουσιαστικά μέσω του σύνθετου υλικού, το οποίο υπήρχε και στις δύο πλευρές της ένωσης.

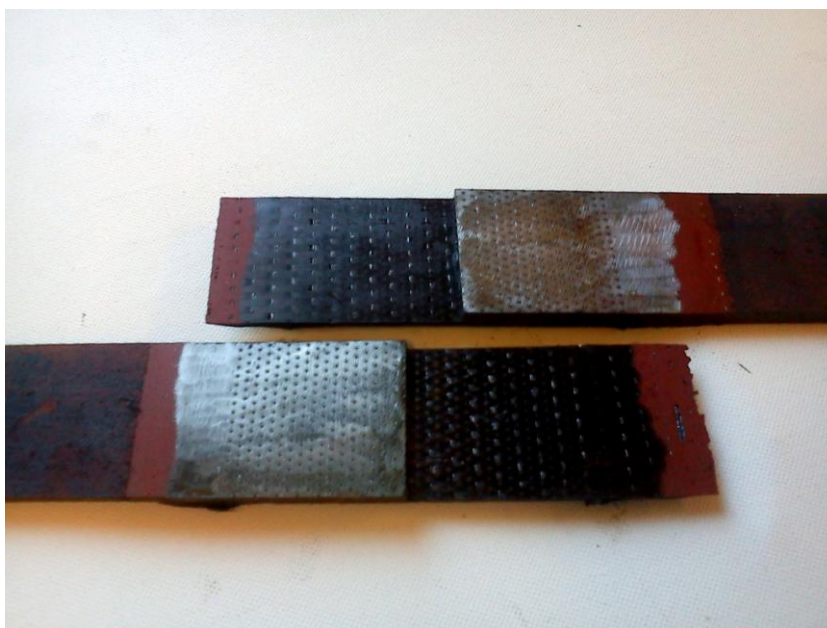
Ο πιο συχνά εμφανιζόμενος τρόπος αστοχίας ήταν η αποκόλληση του σύνθετου υλικού αντισυμμετρικά, δηλαδή από την πάνω πλευρά της μίας πλάκας και την κάτω πλευρά της

άλλης. Συγκεκριμένα, σε 32 από τα 48 δοκίμια που έσπασαν συνολικά, εμφανίστηκε αυτός ο τρόπος αστοχίας. Εκτός από αυτόν τον τρόπο αστοχίας υπήρχαν και περιπτώσεις όπου εμφανιζόταν πλήρης αποκόλληση του σύνθετου υλικού από τη μία πλευρά μόνο του συνδέσμου. Αυτό συνέβη σε 12 δοκίμια και συγκεκριμένα σε αυτά των ομάδων S-50 και S-100, που παρουσίασαν τις μεγαλύτερες αντοχές, ενώ στα υπόλοιπα 4 δοκίμια παρατηρήθηκε αποκόλληση στην πάνω και την κάτω πλευρά μίας μόνο από τις δύο πλάκες.

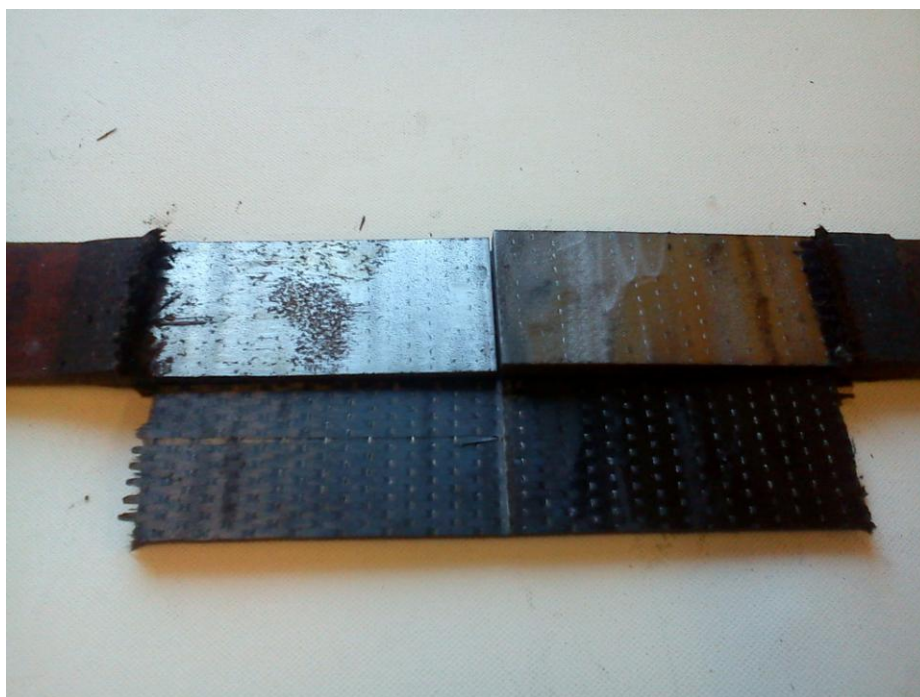
Στα Σχήματα 4.18 – 4.21 που ακολουθούν, φαίνονται ενδεικτικοί τρόποι αστοχίας των δοκιμίων.



**Σχήμα 4.18:** Θραύση δοκιμίου με αποκόλληση του σύνθετου υλικού αντισυμμετρικά



**Σχήμα 4.19:** Θραύση δοκιμίου με αποκόλληση του σύνθετου υλικού αντισυμμετρικά – επιφάνειες θραύσης

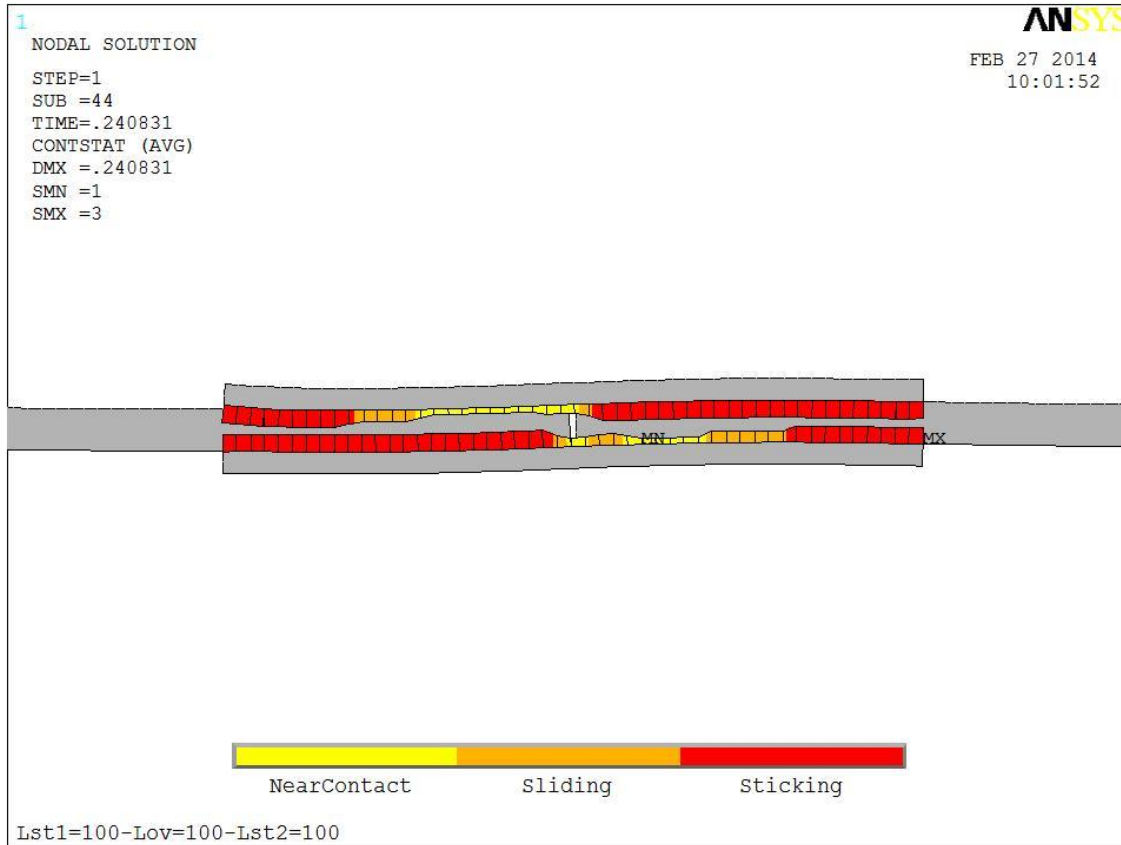


**Σχήμα 4.20:** Θραύση δοκιμίου με πλήρη αποκόλληση του σύνθετου υλικού από τη μία πλευρά και των δύο μεταλλικών πλακών



**Σχήμα 4.21:** Θραύση δοκιμίου με πλήρη αποκόλληση του σύνθετου υλικού από τις δύο πλευρές της μίας μεταλλικής πλάκας

Ο αντισυμμετρικός τρόπος αστοχίας των δοκιμίων επιβεβαιώνεται και από την προσομοίωση των πειραματικών συνθηκών σε περιβάλλον ANSYS από τον υποψήφιο διδάκτορα Ιωάννη Κουλουκούρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.22.



**Σχήμα 4.22:** Μορφή αστοχίας συνδέσμων από τη μοντελοποίηση σε περιβάλλον ANSYS

Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται η αποκόλληση του σύνθετου υλικού από τις μεταλλικές πλάκες επάνω αριστερά και κάτω δεξιά της ένωσης των δύο μεταλλικών πλακών (αντισυμμετρικός τρόπος αστοχίας). Σε αυτές τις περιοχές, που απεικονίζονται με πορτοκαλί χρώμα, έχει επέλθει αστοχία στο σύνδεσμο, ενώ επάνω δεξιά και κάτω αριστερά της ένωσης δεν έχει επέλθει αποκόλληση ανάμεσα στο σύνθετο υλικό και τις μεταλλικές πλάκες (κόκκινο χρώμα – sticking).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη εργασία, έγινε μια προσπάθεια μελέτης της επίδρασης δύο διαφορετικών παραμέτρων στην αντοχή σε εφελκυσμό κολλητών συνδέσμων χάλυβα – σύνθετου υλικού. Αυτές οι δύο παράμετροι είναι η μέθοδος επιφανειακής επεξεργασίας των χαλύβδινων πλακών που ανήκουν στους κολλητούς συνδέσμους, καθώς και το μήκος επικάλυψης του σύνθετου υλικού επάνω στις μεταλλικές πλάκες. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκαν κολλητοί σύνδεσμοι μεταβάλλοντας σε κάθε περίπτωση μία από τις δύο προηγούμενες παραμέτρους. Αυτό που παρατηρήθηκε από τις πειραματικές δοκιμές των δοκιμίων σε μονοαξονικό εφελκυσμό είναι πως υπάρχει αρκετά μεγάλη επίδραση των δύο παραμέτρων στην αντοχή των δοκιμίων..

Ξεκινώντας από τη μελέτη των αντοχών που ανέπτυξαν τα δοκίμια όλων των συνδέσμων, αναφέρεται αρχικά η επίδραση του μήκους επικάλυψης στις δυνάμεις αστοχίας τους. Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τις πειραματικές δοκιμές είναι ότι τα δοκίμια με μεγαλύτερο και συγκεκριμένα διπλάσιο μήκος επικάλυψης, οδηγούν και σε μεγαλύτερες, αλλά όχι διπλάσιες απαραίτητα δυνάμεις αστοχίας, δηλαδή αντοχές.

Πιο αναλυτικά, παρατηρήθηκε ότι για τις 3 ομάδες συνδέσμων, δηλαδή τις B, S και H, το διπλάσιο μήκος επικάλυψης στα δοκίμια, δηλαδή το μήκος επικάλυψης των 100 mm σε σχέση με αυτό των 50 mm, οδήγησε και στις 3 περιπτώσεις σε μεγαλύτερες αντοχές των δοκιμίων, στη μεν πρώτη ομάδα, δηλαδή τη B, κατά 31 %, στη δεύτερη, δηλαδή την S, κατά 14 % περίπου, και στην τρίτη, δηλαδή την H, κατά 63 %.

Κάτι τέτοιο δεν συνέβη για την ομάδα A, όπου τα δοκίμια A-50 με το μικρότερο μήκος επικάλυψης, αποδείχτηκε ότι είχαν κατά 39 % περίπου μεγαλύτερες αντοχές από τα A-100 με το μικρότερο μήκος επικάλυψης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το γεγονός αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι η πολύ έντονη καμπυλότητα των δοκιμίων A-100. Ο δεύτερος λόγος είναι κατασκευαστικό λάθος, κατά το οποίο επετεύχθη κατά τη στερεοποίηση του πολύστρωτου στη μία πλευρά του συνδέσμου A-100 μικρότερο κενό από το επιθυμητό, με αποτέλεσμα να παραμείνει περίσσεια ρητίνης στο πολύστρωτο. Αυτή η περίσσεια ρητίνης οδήγησε σε μείωση της περιεκτικότητας του σύνθετου υλικού σε ίνες και αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του σύνθετου υλικού και κατ' επέκταση και τη μείωση της αντοχής του κολλητού συνδέσμου. Για τους λόγους αυτούς, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν είναι ενδεικτικά για την αξιολόγηση της επίδρασης του μήκους επικάλυψης στην αντοχή των συνδέσμων.

Η διαφορά στις μεταβολές των ποσοστών για τις δύο τιμές του μήκους επικάλυψης στους συνδέσμους, μπορεί να ερμηνευθεί από τη διαφορά στην καμπυλότητα ανάμεσα στους συνδέσμους 50 και 100 κάθε ομάδας. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι η μικρή διαφορά αντοχών ανάμεσα στους συνδέσμους S-50 και S-100 είναι πιθανό να οφείλεται στην αρκετά μεγαλύτερη καμπυλότητα που παρουσίαζαν τα δοκίμια S-100 σε σχέση με τα S-50,

που αν δεν υπήρχε μπορεί να οδηγούσε σε μεγαλύτερη διαφορά των αντοχών των δύο ομάδων. Με παρόμοια σκέψη, η μεγαλύτερη διαφορά στις αντοχές των δοκιμίων B-50 και B-100 είναι πιο λογική, καθώς η καμπυλότητα των δύο ομάδων κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα.

Όσον αφορά στα δοκίμια των ομάδων H-50 και H-100, και πάλι έχουμε μεγάλη διαφορά στις αντοχές τους, η οποία και πάλι μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι τα δοκίμια H-50 είχαν αρκετά μεγαλύτερη καμπυλότητα σε σχέση με τα δοκίμια H-100, η οποία επέφερε μεγαλύτερη μείωση στην αντοχή τους σε σχέση με τη μείωση της αντοχής για τα δοκίμια H-100.

Γενικά, υπήρχε ικανοποιητική επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων στα δοκίμια των ίδιων ομάδων, με εξαίρεση τα δοκίμια H-50 και H-100, που παρουσίαζαν μεγάλη ανομοιομορφία. Γενικώς, η έλλειψη επαναληψιμότητας στα δοκίμια ήταν κατά κύριο λόγο συνέπεια της έντονης και ανομοιόμορφης καμπυλότητάς τους και γι' αυτό το λόγο σε όλες τις περιπτώσεις οι αντοχές ήταν μικρότερες από αυτές που θα μπορούσαν να επιτευχθούν εάν τα δοκίμια δεν παρουσίαζαν έντονη καμπυλότητα. Συγκεκριμένα, για τα δοκίμια H-50 και H-100, ο λόγος στον οποίο οφείλεται η έντονη ανομοιομορφία στα αποτελέσματα των αντοχών είναι η ίδια η μέθοδος επιφανειακής τροποποίησης των χαλύβδινων πλακών με γυαλόχαρτο, η οποία επιφέρει ανομοιομορφία στην τραχύτητα των επιφανειών και στις δυνάμεις πρόσφυσης που αναπτύσσονται ανάμεσα στο σύνθετο υλικό και το χάλυβα.

Για την επίδραση του μήκους επικάλυψης λοιπόν στις αναπτυσσόμενες αντοχές μπορούμε να πούμε ότι διπλασιασμός του μήκους επικάλυψης του σύνθετου υλικού επιφέρει αύξηση της αντοχής του κολλητού συνδέσμου, όχι όμως με τον ίδιο ρυθμό.

Όσον αφορά στην επίδραση της μεθόδου επιφανειακής τροποποίησης των μεταλλικών πλακών στις αναπτυσσόμενες αντοχές των συνδέσμων, οι πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι τις μεγαλύτερες αντοχές και με πολύ μεγάλη διαφορά μάλιστα, τις προσφέρει η μέθοδος επιφανειακής επεξεργασίας με αμμοβολή. Μέσω της αμμοβολής, επιτυγχάνεται ομοιόμορφη τραχύτητα επιφάνειας σε ολόκληρη τη μεταλλική επιφάνεια με αποτέλεσμα να υπάρχει ομοιομορφία στις δυνάμεις πρόσφυσης και συγκράτησης του σύνθετου υλικού με τις χαλύβδινες πλάκες.

Όσον αφορά στις υπόλοιπες μεθόδους, υπάρχει μία μεταβολή της επίδρασης κάθε μεθόδου στην τελική αντοχή των δοκιμίων, ανάλογα και με το μέγεθος του μήκους επικάλυψης. Ενώ λοιπόν για τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 50 mm, τις μικρότερες αντοχές παρείχε η μέθοδος με Laser τύπου B, για τα δοκίμια με μήκος επικάλυψης 100 mm, τις μικρότερες αντοχές παρείχε η μέθοδος με Laser τύπου A, κάτι που βέβαια δεν είναι πολύ ενδεικτικό, λόγω των ελαττωμάτων που είδαμε ότι έχουν τα δοκίμια A-100.

Το βασικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί λοιπόν από όλα τα παραπάνω είναι πως τις μεγαλύτερες αντοχές προσφέρουν οι σύνδεσμοι στους οποίους έχει γίνει αμμοβολή στις μεταλλικές επιφάνειες και μάλιστα με πολύ μεγάλη διαφορά αντοχών σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Στη συνέχεια, ακολουθεί κατά βάση η μέθοδος που κάνει χρήση γυαλόχαρτου, η οποία όμως για να επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα προϋποθέτει να προηγείται αυτοματοποίηση της διαδικασίας και έλεγχος της ομοιόμορφης τραχύτητας που επιφέρει στις επιφάνειες, προκειμένου να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τις δυνατότητές



της. Τελευταίες από πλευράς αντοχής είναι οι μέθοδοι που κάνουν χρήση laser για την επιφανειακή τροποποίηση των χάλυβων με τη χειρότερη να είναι η μέθοδος Β. Ο λόγος που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι πως με τις συγκεκριμένες μεθόδους δεν επιτυγχάνεται ομοιομορφία στην τραχύτητα των επιφανειών, μέσω των μικροδομών που σχηματίζονται, με αποτέλεσμα να επέρχεται πιο εύκολα ο αποχωρισμός του σύνθετου υλικού από το χάλυβα.

Προχωρώντας στη μελέτη της ακαμψίας των συνδέσμων, οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν είναι πως γενικά παρουσιάζεται αρκετά μεγάλη επαναληψιμότητα τόσο ανάμεσα στα δοκίμια των ίδιων ομάδων όσο και ανάμεσα στις διαφορετικές ομάδες. Λόγω λοιπόν του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν πολύ μεγάλες διαφορές στην ακαμψία των διαφόρων δοκιμίων, δεν είναι δυνατό να εξαχθεί ένα συνολικό συμπέρασμα για την επίδραση του μήκους επικάλυψης και της μεθόδου επιφανειακής επεξεργασίας στην ακαμψία.

Όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις των δοκιμίων, οι οποίες μετρήθηκαν μέσω επιμηκυνσιομέτρων, αυτές δεν είναι δυνατό να εκτιμηθούν, λόγω ενός λόγου, ο οποίος είναι και πολύ βασικός. Η έντονη καμπυλότητα των δοκιμίων δημιουργούσε έντονα φαινόμενα και μεγάλες παραμορφώσεις από την κάμψη των δοκιμίων μέχρι αυτά να πιαστούν από τις αρπάγες της μηχανής, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη ανομοιομορφία στα αποτελέσματα των παραμορφώσεων, η οποία προκαλείται από αυτά ακριβώς τα φαινόμενα κάμψης.

Τέλος, όσον αφορά στον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων, αυτό που σε κάθε περίπτωση παρατηρούνταν ήταν η αποκόλληση του σύνθετου υλικού από το χάλυβα, συνήθως αντισυμμετρικά της πάνω και της κάτω πλευρά του συνδέσμου. Βέβαια, υπήρχαν και περιπτώσεις όπου υπήρχε αποκόλληση του σύνθετου υλικού στη μία μόνο μεταλλική πλάκα από τη μία ή και τις δύο πλευρές της. Στις περιπτώσεις εκείνες που επετεύχθη μεγάλη αντοχή των συνδέσμων, δηλαδή στις ομάδες S-50 και S-100, παρατηρούνταν πλήρης αποκόλληση του σύνθετου υλικού από τη μία ή και τις δύο πλευρές του συνδέσμου, ενώ αντιθέτως, στις περιπτώσεις όπου οι δυνάμεις αστοχίας ήταν μικρές, η αποκόλληση ήταν μικρή και συνήθως σε μία μόνο πλευρά του συνδέσμου.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μπαδογιάννης, Ε.Γ. (2009). ‘Αναλυτικές εργαστηριακές σημειώσεις μαθήματος «Ναυπηγική Τεχνολογία & Εργαστήριο», Άσκηση 3: Παχυμετρήσεις και έλεγχος συγκολλήσεων με υπερήχους’.

Τσουβάλης, Ν.Γ. (1998). ‘Τεχνολογία και μηχανική σύνθετων υλικών – Σημειώσεις’.

Abdelaziz, A.T., Boukhili, R., Achiou, S., Gordon, S., Boukehili, H. (2005). ‘Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture’. International Journal of Adhesion & Adhesives **26**, pp. 226-236.

Al-Zubaidy, H., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L. (2012). ‘Experimental investigation of bond characteristics between CFRP fabrics and steel plate joints under impact tensile loads’. Composite Structures **94**, pp. 510–518.

Anyfantis, K.N., Tsouvalis, N.G. (2013). ‘Loading and fracture response of CFRP-to-steel adhesively bonded joints with thick adherends – Part I: Experiments’. Composite Structures **96**, pp. 850–857.

Ebnesajjad, S (2011). ‘Handbook of Adhesives and Surface Preparation. Technology, Applications and Manufacturing’. William Andrew, pp. 83-106.

Ebnesajjad, S., Ebnesajjad, C. (2014). ‘Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding (Second Edition)’. William Andrew, pp. 95-138.

Fawzia, S., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L. (2006). ‘Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP’. Composite Structures **75**, pp. 156–162.

Kim, K.S., Yoo, J.S., Yi, Y.M., Kim, C.G. (2006). ‘Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods’. Composite Structures **72**, pp. 477–485.

Lee, H.K., Pyo, S.H, Kim, B.R. (2009). ‘On joint strengths, peel stresses and failure modes in adhesively bonded double-strap and supported single-lap GFRP joints’. Composite Structures **87**, pp. 44–54.

Nguyen, T.C., Bai, Y., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. (2011). ‘Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures’. Composite Structures **93**, pp. 1604–1612.

Nguyen, T.C., Bai, Y., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. (2012). ‘Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity’. Composite Structures **94**, pp. 1834–1845.

Wu, C., Zhao, X., Duan, W.H., Al-Mahaidi, R. (2012). ‘Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel’. Thin-Walled Structures **51**, pp. 147-157.

Zhao, X.L., Zhang, L. (2007). ‘State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures’. Engineering Structures **29**, pp. 1808–1823.

## **ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΚΑΛΤΕΡΕΜΙΔΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ - ΑΡΤΕΜΗ**

### **ΑΤΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

**Ημερομηνία Γέννησης:** 11 Νοεμβρίου 1989  
**Τόπος Γέννησης :** Αθήνα  
**Οικογενειακή κατάσταση:** Άγαμη  
**Διεύθυνση :** Υπερείδου 11β, Αθήνα, ΤΚ 16343  
**Τηλέφωνα :** 210-9707855, 6972106033  
**E-mail:** artekal2@yahoo.gr

---

### **ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

Οκτώβριος 2012 – Μάρτιος 2014

**Μεταπτυχιακές Σπουδές στο Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου**

**Μεταπτυχιακή Εργασία:** Επίδραση του τρόπου προετοιμασίας της επιφάνειας στην αντοχή κολλητού συνδέσμου χάλυβα – σύνθετου υλικού

2007 – 2012

**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**

- Ολοκλήρωση ανώτατων σπουδών και απόκτηση διπλώματος με βαθμό Λίαν Καλώς 8.04 /10

- **Διπλωματική Εργασία:** «Προσομοίωση κοπής σε νανοκλίμακα με τη μέθοδο της Μοριακής Δυναμικής»  
Βαθμός: 10/10

### **ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ**

**Αγγλικά:** Άριστη γνώση, πτυχίο: Certificate of Proficiency in English, University of Cambridge

**Γερμανικά:** Πολύ καλή γνώση, πτυχίο: Zentrale Mittelstufe, Goethe Institut

### **ΓΝΩΣΕΙΣ Η/Υ**

**Λειτουργικά Συστήματα:** WINDOWS 2000/XP

**European Computer Driving License (ECDL) Syllabus Version: 4.0 στις ενότητες:**

Βασικές Έννοιες της Πληροφορικής, Χρήση του Η/Υ και Διαχείριση Αρχείων, Επεξεργασία Κειμένου, Υπολογιστικά Φύλλα, Βάσεις Δεδομένων, Παρουσιάσεις, Υπηρεσίες Διαδικτύου

**Σχεδιαστικά Πακέτα:** SolidWorks, Ansys, AdvantEdge, LS Dyna

**Γλώσσες Προγραμματισμού:** FORTRAN 77

**Λογισμικά:** Matlab

### **ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ**

- **Αποδοχή συμμετοχής στο: 16<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials, ECCM 16, June 22<sup>nd</sup> – 26<sup>th</sup>, 2014, Seville, Spain για την εργασία με θέμα: «Experimental Study of Composite-to-Steel Adhesive Joints with Laser Treated Surfaces» στα πλαίσια της συγκεκριμένης Μεταπτυχιακής Εργασίας**

- Συμμετοχή στο συνέδριο: 7<sup>th</sup> International Congress on Precision Machining, ICPM 2013, October 3<sup>rd</sup> – 5<sup>th</sup> 2013, Miscohc, Hungary

#### **ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ**

- A.P. Markopoulos, K.A.L. Kalteremidou, “Molecular Dynamics Modelling of Nanometric Cutting”, Key Engineering Materials, Vol. 581, pp. 298 – 303, 2014

#### **ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ**

Φεβρουάριος 2012

Έπαινος από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για το διαγωνισμό του Βραβείου Καινοτομικής Φοιτητικής Εργασίας του έτους 2011 για εργασία με θέμα: "Σύστημα Υποστήριξης Εγχείρισης Μεσοσπονδύλιων Δίσκων"