



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ,
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΥΑΛΟΥ-
ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΚΑΙ ΥΑΛΟΥ- ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ/ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ NANO PULSED LASER.***

Τόλιας Απόστολος

A.M: 1054566

Επιβλέπων: Αλεξανδρόπουλος Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος
Επιστήμης των Υλικών του Παν/μίου Πατρών
Άτυπη Συνεπίβλεψη: Από τον Ομότιμο Καθηγητή Γ. Παπανικολάου του Τμήματος
Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Παν/μίου Πατρών
Συνεπιβλέπων: Κωστόπουλος Βασίλειος, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και
Αεροναυπηγών Μηχανικών του Παν/μίου Πατρών

Πάτρα 2021

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών
Μηχανικών
Τόλιας Απόστολος
© 2021 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

Τόλια Απόστολο

1054566

την Τέταρτη 9/3/2022

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμών του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΥΑΛΟΥ- ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΚΑΙ ΥΑΛΟΥ- ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ/ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ NANO PULSED LASER

Τόλιας Απόστολος

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασία ερευνήθηκαν και αναπτύχθηκαν σύνδεσμοι επικάλυψης ανόμοιων υλικών και συγκεκριμένα γυαλιού-μετάλλου και πολυμερικών υλικών με τη χρήση αναπτυσσόμενων τεχνολογιών που βασίζονται αποκλειστικά σε συστήματα Laser. Η μελέτη μπορεί να διαχωριστεί σε δυο βασικά τμήματα, το πρώτο αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση πληροφοριών σχετικών με τους συνδέσμους ανόμοιων υλικών που μας ενδιαφέρουν και οι οποίες αξιοποιούνται στη πειραματική έρευνα που ακολουθεί στο δεύτερο τμήμα. Αρχικά, αναλύονται οι σύνδεσμοι δυο υλικών υπό την ευρεία έννοια του όρου ενώ ακολουθεί κατηγοριοποίηση αυτών σε μηχανικούς και συγκολλητούς. Στην συνέχεια, παρατίθενται κάποιες από τις βασικές μεθόδους συγκόλλησης πλαστικών με τη χρήση θερμικών διαδικασιών καθώς και με τη χρήση κόλλας. Έχοντας αναφέρει τις προηγούμενες μεθόδους έπεται μια γενική παράθεση πληροφοριών σχετικά με τα συστήματα laser και την αλληλεπίδραση της ύλης με τη δέσμη φωτός καθώς επίσης παρουσιάζονται οι πληροφορίες που ανέκυσαν από βιβλιογραφική ερευνά σε επιστημονικά άρθρα, δημοσιεύσεις, ιστοσελίδες και διδακτορικές διατριβές που αφορούν στο αντικείμενο της συγκόλλησης ανόμοιας φύσης υλικών όπως είναι τα πλαστικά (θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα), τα μέταλλα και τα γυαλιά. Με γνώμονα πλέον αυτές τις πληροφορίες ακολουθεί η πειραματική μέθοδος της ανάπτυξης των συνδέσμων. Οι ιδιαιτερότητες της φύσης των πειραμάτων επιβάλλουν την κατασκευή ιδιοσυσκευών, τον συνδυασμό δυο μεθόδων συγκόλλησης (LTW και DLW) και την διερεύνηση μιας πληθώρας παραμέτρων για την επίτευξη ισχυρών συνδέσμων. Τέλος τα συγκριτικά αποτελέσματα φανερώνουν αύξηση της τάξεως των 500 % στην μηχανική αντοχή των συνδέσμων με Laser έναντι της συμβατικής μεθόδου συγκόλλησης ανόμοιων υλικών με κόλλα.

Λέξεις κλειδιά: Laser Welding, Glass to Metal, Joints, Glass to Polymer

ABSTRACT

Laser Assisted Joining of Glass to Metal and Glass to Polymer Composites

Tolias Apostolos

In the present thesis, lap joints of dissimilar materials such as glass, metals and polymer matrix were investigated and developed using emerging technologies based on pulsed laser source systems. The study consists of a wide literature review on the joining of materials, the experimental set up investigation, the experiment procedure and the mechanical characterization of the joints. Firstly, the broad usage of the term “joining” two materials was defined, while in the second chapter a comparison between the two basic categories of joints (mechanical and welded) is taking place. Moreover, to have a better understanding of the available thermal bonding and adhesive bonding methods used by the industries to join polymer plastics to each other, a review of them was carried out, while all the available information obtained from literature research in several scientific articles, publications, websites and doctoral dissertation theses, related to the laser welding of different types of materials such as plastics (thermoplastics and thermosets), metals and glasses are presented. One method of interest is to join dissimilar materials using laser source. Laser joining has many advantages such as short processing time, small heat affected zone and effective usage on different types of materials. Two material combinations were used in the Laser welding experimental procedure, Extra Clear Glass to Aluminium and Extra Clear Glass to 3D printed PLA samples. Polylactic Acid (PLA) being one of the most common and promising biopolymers used with increasing consumption day by day, it is emerging as a substitute for petroleum-based polymers which are used as a matrix in the composite materials. The samples were joint via Laser Transmission Welding (LTW) and Laser Direct Welding (LDW) principals, furthermore laser related parameters were clearly determined in order to get a strong adhesion. Finally, the mechanical shear strength obtained by laser welding methodology can outreach by surpassingly high percentage, 400 – 500 %, the ultimate adhesive bond strength.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	10
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....	11
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ I : ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ.....	14
1.1 Γενικά Στοιχεία Συνδέσμων	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ II : ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ	15
2.1 Μηχανικοί Σύνδεσμοι.....	15
2.2 Συγκολλητοί Σύνδεσμοι.....	17
2.2.1 Συγκολλήσεις Πολυμερών με Θερμικές Κατεργασίες	18
2.2.1.1 Συγκολλήσεις Τριβής.....	19
2.2.1.2 Συγκόλληση με εξωτερική παροχή θερμότητας (Thermal Welding)	22
2.2.2 Συγκόλληση με χρήση Κόλλας (Adhesive Bonding)	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ III : ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LASER.....	27
3.1 Τύποι Συστημάτων Laser.....	27
3.2 Αλληλεπίδραση της ύλης με την ακτινοβολία Laser	29
3.3 Γεωμετρία Συγκολλητών Συνδέσμων με χρήση Laser :.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER.....	34
4.1 Πλαστικά.....	34
4.1.1 Συγκόλληση θερμοπλαστικών και συνθέτων υλικών με θερμοπλαστική μήτρα.....	36
4.1.2 Συγκόλληση Συνθέτων Με Θερμοσκληρυνόμενη Μήτρα	44
4.2 Γυαλιά	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V: ΥΛΙΚΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	54
5.1 Αλουμίνιο.....	54
5.2 Γυαλί	55
5.3 Θερμοπλαστικό Πολυμερές (Πολυγαλακτικό Οξύ)	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ/PLA – ΓΥΑΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΟΞΙΚΗΣ ΚΟΛΛΑΣ	58
6.1 Προετοιμασία και συγκόλληση των δοκιμών.....	59
6.1.1 Αλουμίνιου- Γυαλιού	59
6.1.2 PLA - Γυαλιού	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ/PLA – ΓΥΑΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER	62
7.1 Το Σύστημα Laser.....	62
7.2 Η Ιδιοσυσκευή Σύσφιξης	66
7.3 Πειραματική Διαδικασία Συγκόλλησης των Συνδέσμων με Laser	68
7.3.1 Αλουμίνιο – Γυαλί	68
7.3.2 PLA – Φύλλο Αλουμίνιου - Γυαλί.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII: ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ	78
8.1 Αποτελέσματα Δοκιμής Διάτμησης.....	80
8.2 Στατιστική Μελέτη της Αντοχής των Συνδέσμων.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ IX: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	90
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	102
Μηχανολογικά Σχέδια της Ιδιοσυσκευής Διάτμησης.....	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Τιμές των παραμέτρων της πειραματικής διαδικασίας. [35]	43
Πίνακας 2 Κατηγορίες και ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για SIPN [19].	48
Πίνακας 3 Θερμικές και Μηχανικές ιδιότητες των υλικών.	57
Πίνακας 4 Παράμετροι 3D εκτύπωσης.	60
Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος Laser	64
Πίνακας 6 Παράμετροι Συγκόλλησης Αλουμινίου – Γυαλιού.	71
Πίνακας 7 Περίγραμμα και διαστάσεις του μοτίβου συγκόλλησης των συνδέσμων PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί.	74
Πίνακας 8 Συνδυασμοί παραμέτρων που διερευνήθηκαν.	76
Πίνακας 9 Παράμετροι συγκόλλησης PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί.	77
Πίνακας 10 Μέση Διατμητική Αντοχή των συνδέσμων με κόλλα.	82
Πίνακας 11 Οργανωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων Al-Glass	84
Πίνακας 12 Μέση Διατμητική Αντοχή των συνδέσμων με Laser.	85
Πίνακας 13 Συγκριτικός Πίνακας αποτελεσμάτων αντοχής για τις δυο μεθόδους συγκόλλησης	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Χαρακτηριστικές καμπύλες μετάδοσης ακτινοβολίας σε πλαστικό.....	30
Διάγραμμα 2 Διάγραμμα Weibull της πιθανότητας επιβίωσης ενός BK7-Al:6082 με διάμετρο συγκόλλησης 2.5 mm και μη βελτιστοποιημένη συγκόλληση[24].	52
Διάγραμμα 3 Το ποσοστό διάδοσης του φωτός συναρτήσει του μήκους κύματος για Extra Clear και Soda Lime Glass.	56
Διάγραμμα 4 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων PLA-Glass με κόλλα.....	81
Διάγραμμα 5 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων Al - Glass με κόλλα.....	81
Διάγραμμα 6 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων PLA- Al Foil -Glass με Laser	84
Διάγραμμα 7 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων Al - Glass με Laser.....	85
Διάγραμμα 8 Weibull Plot των συνδέσμων Al – Glass (Linear Fitting).	87
Διάγραμμα 9 Weibull Plot των συνδέσμων PLA- Al Foil – Glass (Linear Fitting).....	87
Διάγραμμα 10 Weibull Distribution των συνδέσμων Al – Glass.	88
Διάγραμμα 11 Weibull Distribution των συνδέσμων PLA - Al – Glass.	88
Διάγραμμα 12 Συγκριτικό διάγραμμα της αντοχής των συνδέσμων με τη χρήση κόλλας και Laser.....	90

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

• λ (m)	Μήκος Κύματος
• f (Hz)	Συχνότητα Επανάληψης
• T (sec)	Διάρκεια Παλμού
• P (Watt)	Ακτινοβολούμενη ισχύς
• E (Joule)	Ακτινοβολούμενη ενέργεια
• E_{pulse} (Joule)	Ενέργεια του παλμού
• P_{peak} (Watt)	Εσχύς του παλμού
• I (W/cm ²)	Πυκνότητα ισχύος ή ένταση ακτινοβολίας
• T_g, T_m, T_d (°C)	Θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, τήξης, θερμικής αποσύνθεσης
• $P_s(\sigma)$	Συνάρτηση πιθανότητας Weibull
• CTE (1/K)	Συντελεστής θερμικής διαστολής
• $2w_0$ (m)	Διάμετρος δέσμης
• D	Κύκλος λειτουργίας
• k (J/mm)	Παράγοντας ροής ενέργειας
• τ (MPa)	Διατμητική τάση
• A (mm ²)	Επιφάνεια συγκόλλησης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτό το σημείο της Διπλωματικής μου Εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου αρχικά ως προς τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Γεώργιο Παπανικολάου για την προτροπή του να μελετήσω το παρόν θέμα και την προσωπική του υποστήριξη, το ενδιαφέρον του αναφορικά με την ομαλή εξέλιξη αυτού και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε τόσο σε θεωρητικά όσο και σε τεχνικά ζητήματα κατά τη διάρκεια της συχνής επικοινωνίας μας. Επίσης βαθιά ευγνώμων είμαι στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλεξανδρόπουλο Δημήτριο για την σημαντική αρωγή του, η καθοδήγηση και η συνδρομή του οποίου σε επίπεδο γνώσεων και οργάνωσης της έρευνας όλο αυτό το διάστημα διαδραμάτισε καταλυτικό ρολό στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου στον καθηγητή Κωστόπουλο Βασίλειο για την επιθυμία που έδειξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου να μεταλαμπαδεύσει τις γνώσεις του σε εμένα και στους συμφοιτητές μου. Κλείνοντας οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την οικονομική, πνευματική και ηθική στήριξη σε κάθε στάδιο της ζωής μου, καθώς και τους ανθρώπους που μου συμπαραστάθηκαν και έκαναν αυτό το ταξίδι γνώσεων και εμπειριών πιο όμορφο.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρακολουθώντας κανείς την εξέλιξη και μετάβαση από τα απλά εργαλεία της Λίθινης Εποχής, όπως ήταν το σφυρί και το δόρυ, στις σύνθετες και πολύπλοκες κατασκευές της σημερινής εποχής γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα της τεχνολογίας σύνδεσης όμοιων και ανόμοιων υλικών μεταξύ τους. Πλέον, οι κατασκευές απαρτίζονται από πλήθος εξαρτημάτων όπου η σύνδεση τους είναι αναγκαίο να γίνεται με αξιόπιστο, αποδοτικό και συγχρόνως οικονομικό τρόπο. Η πλειοψηφία των στοιχείων αυτών αποτελείται συνήθως από υλικά ανόμοια μεταξύ τους, γεγονός που καθιστά την σύνδεση τους απαιτητική. Η χρήση συγκολλητών μέσων για την σύνδεση πλαστικών, πολυμερικών συνθέτων υλικών αλλά και μεταξύ ανομοιογενών υλικών όπως είναι το γυαλί και το μέταλλο, είναι η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται παρουσιάζοντας όμως αρκετά μειονεκτήματα τόσο ως προς την πολυπλοκότητα των τεχνικών και της προετοιμασίας που απαιτείται όσο και από την πλευρά της επισκευής. Σε αυτή την εργασία εξετάζονται συγκολλητοί σύνδεσμοι υάλου – μετάλλου και υάλου – πολυμερούς υλικού με χρήση της τεχνολογίας Laser. Στην βιβλιογραφία εντοπίζεται μικρός όγκος δημοσιευμένου υλικού που να αναφέρεται αυτούσια στους συνδέσμους αυτού του τύπου. Υπάρχουν μελέτες στις οποίες θα αναφερθούμε σχετικά με συνδέσμους μεταξύ σύνθετων υλικών θερμοπλαστικής και θερμοσκληρυνόμενη μήτρας, σύνθετων υλικών και μετάλλων, γυαλιού και μετάλλου και τέλος μια μελέτη για συνδέσμους γυαλιού - θερμοπλαστικού. Έπειτα από τη βιβλιογραφική αναφορά ακολουθεί η κατασκευή των συνδέσμων Αλουμινίου – Γυαλιού και PLA – Γυαλιού με την ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθόδου Laser. Το PLA (Πολυγαλακτικό οξύ) είναι το πιο διαδομένο βιοπολυμερές. Παράγεται σε παγκόσμια κλίμακα και βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, δύναται επίσης να αποτελέσει τη θερμοπλαστική μήτρα συνθέτων υλικών ενισχυμένων τόσο με ίνες όσο και με μικροσωματίδια. Είναι λοιπόν σκόπιμο να μελετηθεί η δυνατότητα συγκόλλησης του. Τόσο η πληθώρα παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν όσο και τα πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης ανόμοιων υλικών καθορίζουν το βαθμό δυσκολίας της πειραματικής διαδικασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι : ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 Γενικά Στοιχεία Συνδέσμων

Στη Μηχανική, με τον γενικότερο όρο “σύνδεσμος”, νοείται οποιοδήποτε μηχανολογικό στοιχείο ή διαδικασία οδηγεί σε σύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων στοιχείων της συνολικής κατασκευής. Με τη διαδικασία της σύνδεσης επιδιώκεται η ικανότητά μεταβίβασης φορτίων από το ένα στοιχείο στο άλλο, καθώς και ο, κατά περίπτωση, περιορισμός βαθμών ελευθέριας του συνδεόμενου στοιχείου αναλόγως του τύπου της κατασκευής. Η κατασκευή συνήθως αποτελείται από τμήματα συναρμολογημένα μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτελούν κάποιες από τις βασικές λειτουργίες ενός συστήματος. Οι λειτουργίες ενός συστήματος μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες : δομικές, μηχανικές και ηλεκτρικές [1]. Τα διάφορα μέρη των δομικών συστημάτων έχουν ως βασική λειτουργία να παραλαμβάνουν και να μεταβιβάζουν τα στατικά και δυναμικά φορτία. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων/κατασκευών αποτελούν τα κτήρια, τα πλαίσια οχημάτων, οι άτρακτοι αεροσκαφών, οι γέφυρες κτλ. Όσον αφορά στα τμήματα των μηχανικών συστημάτων, βασική τους λειτουργία είναι να επιτρέπουν και να ενεργοποιούν κάποιους βαθμούς ελευθέριας προκαθορισμένων κινήσεων μέσω της αλληλεπίδρασης των συνδεόμενων τμημάτων. Μηχανές και μηχανισμοί αποτελούν παραδείγματα τέτοιων συστημάτων. Συνήθως, οι συναρμολογημένες κατασκευές επιτελούν παραπάνω από μια λειτουργίες, με κάποιες να είναι κύριες και κάποιες δευτερεύουσες. Ασχέτως όμως της πρωταρχικής τους λειτουργίας οι σύνδεσμοι μεταξύ των τμημάτων της κατασκευής είναι εξαιρετικά σημαντικοί ενώ χωρίς την παρουσία των συνδέσμων θα ήταν αδύνατη η δημιουργία πολύπλοκων συστημάτων.

Οι τύποι των συνδέσμων καθορίζονται άμεσα από τη φύση των δυνάμεων που μπορούν να αναπτυχθούν μεταξύ των δυο υλικών. Οι δυνάμεις αυτές μπορεί να είναι μηχανικές, όπως για παράδειγμα σε μακροσκοπικό επίπεδο δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τον περιορισμό της κίνησης των στοιχείων λόγω της διαμόρφωσης της γεωμετρίας τους, δηλαδή διάτμηση, εφελκυσμός - θλίψη, και η τριβή, η οποία σε μικροσκοπικό επίπεδο οφείλεται στην τραχύτητα των επιφανειών (interlocking) ή χημικές. Οι χημικές δυνάμεις διακρίνονται σε ατομικές και ενδομοριακές. Καταλήγουμε λοιπόν σε δυο βασικούς τύπους συνδέσμων: α) τους Μηχανικούς συνδέσμους, και β) τους Συγκολλητούς είτε με χρήση κόλλας, είτε με σύντηξη [1]. Η σύνδεση μπορεί είναι είτε μόνιμη (συγκολλήσεις, ηλώσεις, σφιχτή συναρμογή κτλ.) είτε λυόμενη όπως για παράδειγμα οι κοχλιοτοί σύνδεσμοι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ II : ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Μηχανικοί Σύνδεσμοι

Αναμφισβήτητα, μια από τις παλαιότερες και πιο διαδεδομένες μορφές σύνδεσης υπήρξε η μηχανική, προσφέροντας ευκολία και αμεσότητα κατά την συναρμολόγηση αλλά και επισκευή της κατασκευής. Βασικό πλεονέκτημα των συνδέσμων αυτών, σε μια εποχή όπου οι κατασκευές συνίστανται από πλήθος μελών, είναι η ικανότητα αποσυναρμολόγησης δίχως να προκύπτει φθορά στα συνδεόμενα μέλη, αποσκοπώντας έτσι στην εύκολη και οικονομική συντήρηση και επισκευή τους.

Δεύτερο, και εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ανεξαρτησία της σύνδεσης από τον τύπο του υλικού. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σε αυτόν τον τύπο σύνδεσης τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα συνδεόμενα τμήματα δεν αναπτύσσουν μεταξύ τους χημικούς δεσμούς γεγονός που επιτρέπει την χρήση ανόμοιων υλικών χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα συμβατότητας.

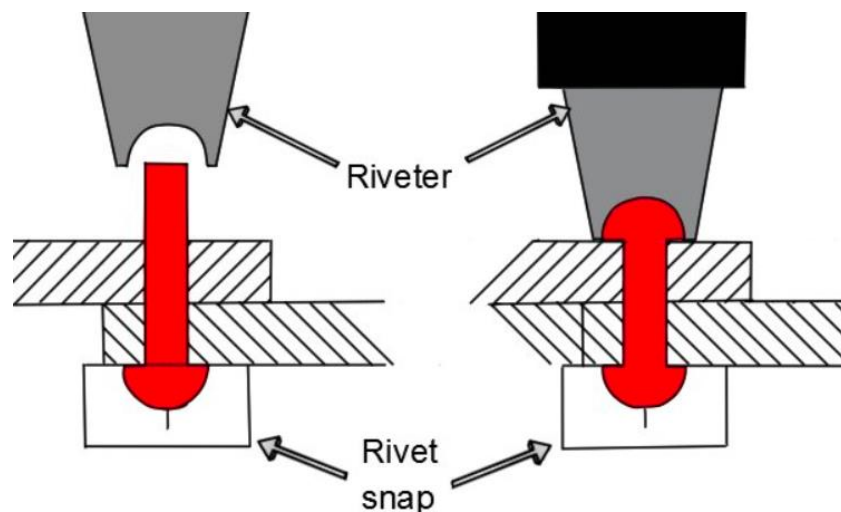
Στα πλεονέκτημα συγκαταλέγονται επιπρόσθετα η απουσία των θερμικά επηρεαζομένων ζωνών περίξ της σύνδεσης, όπως συμβαίνει στις συγκολλήσεις και η διατήρηση της μικροδομής του υλικού των μελών, χωρίς να επηρεάζεται από τις τεχνικές σύνδεσης.

Παρά την πληθώρα των πλεονεκτημάτων που συγκεντρώνουν οι μηχανικοί σύνδεσμοι δεν παύουν να υπάρχουν συγκεκριμένα μειονέκτημα. Το σοβαρότερο εξ αυτών είναι η ανάπτυξη περιοχών συγκέντρωσης τάσεων στις οπές οι οποίες απαιτούνται προκειμένου να χρησιμοποιηθούν κοχλίες ή ήλוי. Οι περιοχές αυτές είναι πιθανές για την έναρξη ρωγμών και συχνά προκαλείται αστοχία της σύνδεσης εάν δεν έχει προβλεφθεί σωστά από πριν ο τύπος και το μέγεθος της φόρτισης. Επιπλέον, εξαιτίας αυτού του φαινομένου, η μέθοδος περιορίζεται στα υλικά με όλκιμη συμπεριφορά καθώς στις περιοχές των μεγίστων τάσεων, η πλαστική διαρροή είναι έντονη. Κατά συνεπεία, επικρατούν μεγάλες παραμορφώσεις του υλικού και ανακούφιση των τάσεων. Αντίθετα, αυτό δεν συμβαίνει στα ψαθυρά υλικά.

Ακόμη ένα μειονέκτημα είναι η ανάγκη για τακτική επιθεώρηση των συνδέσμων. Ειδικότερα, η βισκοελαστική συμπεριφορά των υλικών επιφέρει χαλάρωση των τάσεων με αποτέλεσμα να πρέπει να γίνεται επανασύσφιξη των κοχλίων ή αλλαγή των ήλων σε τακτά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με το υλικό. Τέλος, ο μηχανικός σύνδεσμος συχνά δεν παρέχει επαρκή στεγανότητα, ενώ πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η διάβρωση που μπορεί να υποστεί το υλικό στα σημεία ασυνέχειας που δημιουργούν οι οπές.

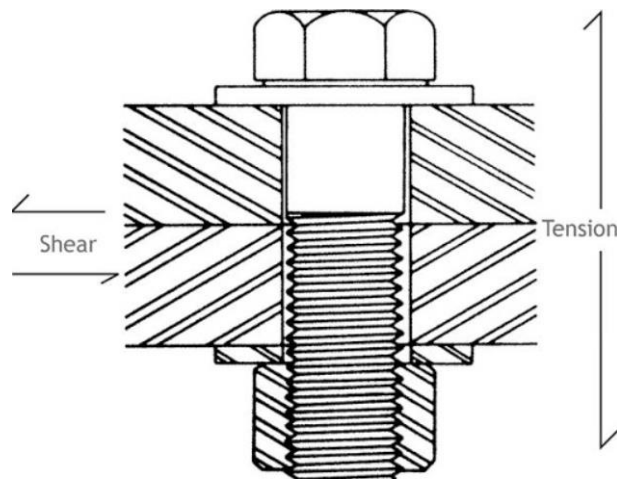
Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως η σύνδεση με κοχλίες, με ηλώσεις και οι σφιχτές συναρμογές.

Η ήλωση χρησιμοποιείται για την μόνιμη σύνδεση κυρίως μεταλλικών πλακών ή κελυφών. Τα τεμάχια έχουν οπές στις αντίστοιχες θέσεις όπου τοποθετούνται οι ήλοι. Συνήθως απαιτούνται πρόσθετα μέρη όπως κομβοελάσματα, παρεμβλήματα και λοιπά. Η γεωμετρία των ήλων διαμορφώνεται από τον κυλινδρικό κορμό που στην άκρη του φέρει μία κεφαλή. Κατά την σύνδεση η άλλη άκρη του κορμού, είτε με σφυρηλάτηση είτε με την επιβολή πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας, διαστέλλεται και δημιουργείται μια δεύτερη κεφαλή. Σήμερα, οι ηλώσεις πλέον τείνουν να αντικατασταθούν από τους συγκολλητούς συνδέσμους.



Εικόνα 1: Διαδικασία Δημιουργίας Ήλωσης

Η κοχλίωση είναι όμοια σύνδεση με την ήλωση με τη διαφορά ότι εδώ αντί ήλων χρησιμοποιούνται κοχλίες και έτσι η σύνδεση είναι απλή και λυόμενη, άρα παρουσιάζει και το πλεονέκτημα της ευχερούς αντικατάστασης μερών ή της επαναχρησιμοποίησης τους. Η κοχλιωτή σύνδεση συνίσταται από τον κοχλία (βίδα) και το περικόχλιο (παξιμάδι).



Εικόνα 2: Κοχλιωτή σύνδεση κα φορτία που παραλαμβάνει

Σε αεροπορικού τύπου κατασκευές χρησιμοποιούνται κατά βάση ήλοι έναντι των κοχλιών καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια και η επιθεώρηση τους είναι πιο εύκολη. Κατά την παραλαβή δυναμικών φορτίων, οι ταλαντώσεις μπορούν να επιφέρουν χαλάρωση στη κοχλιωτή σύνδεση με καταστροφικές συνέπειες στη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.



Εικόνα 3: Ηλώσεις σε τμήμα αεροσκάφους τύπου 747 Dreamlifter

2.2 Συγκολλητοί Σύνδεσμοι

Μια ακόμη μέθοδος σύνδεσης υλικών είναι η συγκόλληση. Οι συγκολλήσεις διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες: α) την συγκόλληση με κόλλα (adhesive bonding) και β) την συγκόλληση με σύντηξη (welding). Υπάρχουν ωστόσο και υποκατηγορίες ανάλογα με

την θερμοκρασία που πραγματοποιείται η σύνδεση και την τεχνική που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Βασικά προτερήματα των συγκολλητών συνδέσμων είναι πως δεν χρειάζονται επιπλέον εξαρτήματα όπως στους μηχανικούς συνδέσμους μειώνοντας έτσι το βάρος της κατασκευής, ενώ παράλληλα δεν παρουσιάζεται εξασθένηση του υλικού λόγω των οπών, οι οποίες δημιουργούν ασυνέχειες στο υλικό και κατά συνέπεια συγκεντρώσεις τάσεων. Επιπρόσθετα, οι συγκολλητοί σύνδεσμοι προσφέρουν υψηλή δομική ακεραιότητα και ενδείκνυνται για εφαρμογές όπου απαιτείται καλή στεγανότητα.

Όσον αφορά στις συγκολλήσεις με χρήση κόλλας, συγκεντρώνουν κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα όπως είναι η ικανότητα σύνδεσης ανόμοιων υλικών μεταξύ τους χωρίς να επηρεάζονται από το πάχος των μελών. Επίσης δεν αλλοιώνουν τις ιδιότητες και την μικροδομή των υλικών ενώ τέλος, εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε κυκλικές και κρουστικές φορτίσεις.

Οι συγκολλητοί σύνδεσμοι ανήκουν στην κατηγορία των μόνιμων συνδέσμων με αποτέλεσμα η αποσυναρμολόγηση τους να είναι εξαιρετικά δύσκολη και συνήθως επιφέρει φθορά στα συνδεόμενα μέλη. Επίσης, στην περίπτωση της συγκόλλησης με σύντηξη η μικροδομή του υλικού αλλάζει τοπικά μεταβαλλώντας/υποβαθμίζοντας τις ιδιότητες του. Για τους συνδέσμους με κόλλα, συμπληρωματικά μειονεκτήματα κατά τη χρήση τους είναι πως οι επιφάνειες συγκόλλησης θα πρέπει από πριν να έχουν προετοιμαστεί κατάλληλα, ο χρόνος ζωής της κόλλας είναι σχετικά περιορισμένος λόγω γήρανσης και εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο είναι εκτεθειμένη ενώ επίσης χρειάζεται χρόνος για την στερεοποίηση της κόλλας κατά την εφαρμογή της.

2.2.1 Συγκολλήσεις Πολυμερών με Θερμικές Κατεργασίες

Ο συνδυασμός της θερμοκρασίας και της πίεσης κατά τη συγκόλληση διαφέρει ανάλογα με τα υλικά. Η συγκόλληση μεταξύ δύο υλικών, μπορεί να επιτευχθεί με μία μεγάλη ποικιλία συνθηκών, με αποτέλεσμα σήμερα να χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων συγκόλλησης. Οι συνθήκες μπορούν να κυμαίνονται από υψηλή θερμοκρασία με καθόλου πίεση μέχρι υψηλή πίεση με χαμηλή θερμοκρασία.

Η συγκόλληση πολυμερών υλικών μοιάζει αρκετά με αυτή των μετάλλων. Γενικά υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες συγκολλήσεων: α) οι αυτογενείς συγκολλήσεις και β) οι ετερογενείς συγκολλήσεις. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις διαδικασίες κατά τις οποίες προκαλείται τοπική τήξη των επιφανειών ή ακμών που πρόκειται να συνδεθούν χωρίς να χρησιμοποιείται πρόσθετο συγκολλητικό μέσο. Σε αντίθεση, οι ετερογενείς συγκολλήσεις δεν

απαιτούν τη τήξη των συνδεόμενων τμημάτων αλλά την τοπική θέρμανση τους και την εναπόθεση μεταξύ των επιφανειών κατάλληλου συγκολλητικού μέσου σε μορφή τήγματος.

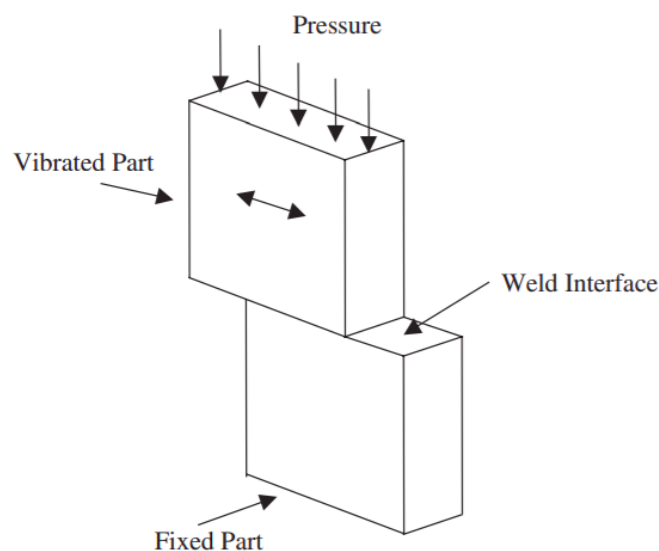
Οι αυτογενείς συγκολλήσεις μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το μηχανισμό παραγωγής θερμότητας που χρησιμοποιείται. Ονομαστικά υπάρχουν τρεις μηχανισμοί: α) η συγκόλληση με τριβή, β) η συγκόλληση με εξωτερική παροχή θερμότητας και γ) η επαγωγική συγκόλληση.

2.2.1.1 Συγκολλήσεις Τριβής

Η ιδέα πίσω από αυτή τη μέθοδο είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια των συνδεόμενων μελών μέσω της μετατροπής της ενέργειας τριβής σε θερμότητα. Κάποιες από τις παραλλαγές της μεθόδου είναι η περιστροφική συγκόλληση, η συγκόλληση υπερήχων και η συγκόλληση με χρήση δονήσεων [2-3].

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΝΗΣΕΩΝ (Linear Vibration Welding)

Αυτή η μέθοδος απαντάται στη βιβλιογραφία και ως συγκόλληση γραμμικής τριβής. Τα δυο τμήματα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους υπό πίεση με το ένα να κρατείται σταθερό ενώ το άλλο ταλαντώνεται γραμμικά παράλληλα της διεπιφάνειας σύνδεσης με κατάλληλη συχνότητα, έως ότου να αναπτυχθεί αρκετή θερμοκρασία ώστε να τακούν τα υλικά στο σημείο της τριβής και σε αυτή τη ρευστή μορφή να αναμειχθούν μεταξύ τους. Έπειτα, οι δονήσεις σταματούν και τα δύο μέλη ευθυγραμμίζονται και αφήνονται να στερεοποιηθούν προκειμένου να δημιουργηθεί η κόλληση. Η μέθοδος είναι μια παραλλαγή της περιστροφικής συγκόλλησης τριβής, με την κίνηση όμως να είναι γραμμική και όχι περιστροφική.

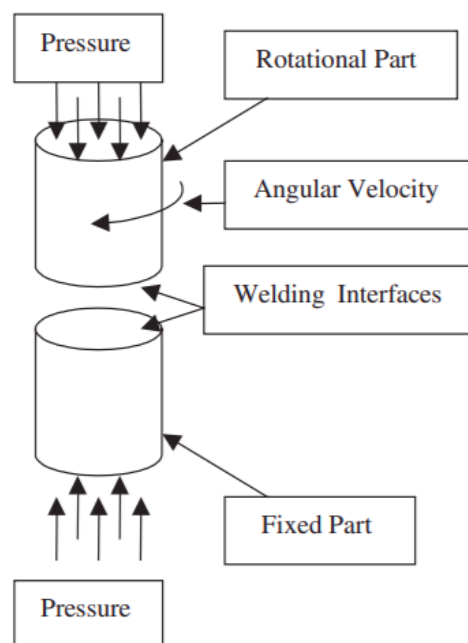


Εικόνα 4 Συγκόλληση με χρήση δονήσεων [2].

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι οι μεγάλοι ρυθμοί παραγωγής που προσφέρει, ο μικρός παραγωγικός κύκλος και η δυνατότητα της ταυτόχρονης συγκόλλησης πολλών τμημάτων. Επίσης, η απλότητα της και η καταλληλότητα για συγκόλληση όλων των θερμοπλαστικών (ακόμη και ενισχυμένων) την καθιστά συχνά χρήσιμη μέθοδο στην αυτοκινητοβιομηχανία και τη βιομηχανία οικιακών συσκευών.

ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ (Spin Welding)

Η περιστροφική συγκόλληση αποτελεί μια από τις πιο κοινές μεθόδους συγκόλλησης με τριβή που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για την ένωση θερμοπλαστικών και μεταλλικών εξαρτημάτων κατά μήκος κυκλικών επιφανειών σύνδεσης. Σε αυτή τη διαδικασία, το ένα από τα δυο μέρη διατηρείται σταθερό ενώ το άλλο περιστρέφεται πάνω στην επιφάνεια σύνδεσης του σταθερού τμήματος με μια συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα και πίεση ώσπου η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια να ανέλθει στη θερμοκρασία τήξης των υλικών. Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με την προηγούμενη μέθοδο συγκόλλησης. Αφού τα υλικά τακούν, σταματά ακαριαία η περιστροφή και υπό πίεση ακολουθεί η τοπική ψύξη της περιοχής και η φάση της στερεοποίησης.



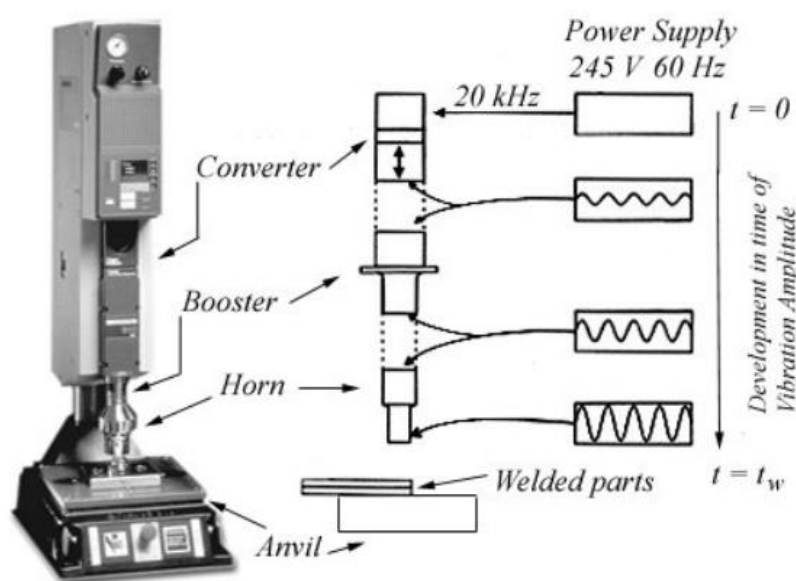
Εικόνα 5 Περιστροφική Συγκόλληση [2].

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με περιστροφή είναι η υψηλή ποιότητα συγκόλλησης, η απλότητα, οι μικροί κύκλοι παραγωγής και η επαναληψιμότητα που παρέχει. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την συγκόλληση εξαρτημάτων κυρίως κυλινδρικής γεωμετρίας όπως είναι για παράδειγμα πυξίδες, κυλινδρικά δοχεία, φίλτρα καυσίμων, μεταλλικοί άξονες, στελέχη υδραυλικών κυλίνδρων κλπ.

Λόγω της εξάρτησης της θερμοκρασίας από τη γραμμική ταχύτητα περιστροφής, το εξωτερικό τμήμα της διατομής πάντα θα θερμαίνεται παραπάνω καθώς κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα, συνεπώς η μη ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια δημιουργεί παραμένουσες τάσεις στη συγκόλληση. Αυτός ο περιορισμός καθιστά τις κοίλες διατομές με λεπτά τοιχώματα πιο κατάλληλες για συγκόλληση με αυτή τη μέθοδο.

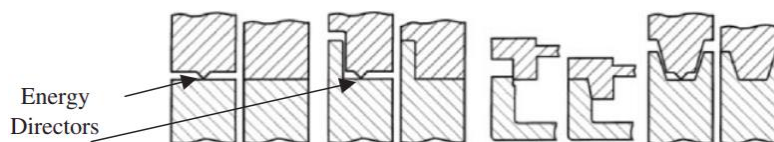
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ (Ultrasonic Welding)

Η συγκόλληση με χρήση υπερήχων είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί μηχανικές δονήσεις υψηλής συχνότητας. Εφαρμόζεται στη βιομηχανία για τη συγκόλληση πολυμερών με μέταλλα. Το ένα μέλος των συνδεόμενων τμημάτων προσαρμόζεται σταθερά στο ακίνητο μέρος της μηχανής συγκόλλησης ενώ το άλλο υποβάλλεται σε μία αρμονική ταλάντωση υπερήχων συχνότητας από 20 μέχρι 40 kHz. Τα δυο τμήματα είναι πάντα σε επαφή μεταξύ τους υπό πίεση. Η διαμοριακή τριβή μεταξύ των μορίων του υλικού και η τριβή μεταξύ των επιφανειών παράγουν θερμότητα με αποτέλεσμα την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 6 Μηχανή συγκόλλησης με υπέρηχους (Alejandro A Espinoza Orías).

Στη συγκόλληση με υπέρηχους, η γεωμετρία των επιφανειών σύνδεσης πρέπει να είναι καλά καθορισμένη. Η επιφάνεια του παλλόμενου τμήματος έχει διαμορφωθεί έτσι από τον κατασκευαστή ώστε να σχηματίζονται επιφανειακές προεξοχές, οι οποίες στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως κατευθυντές ενέργειας (energy directors). Κατά την συγκόλληση ο ενεργειακός κατευθυντής λειώνει καθώς η ενέργεια συγκεντρώνεται σε αυτές τις ανομοιογένειες της επιφάνειας, και με την ψύξη του δημιουργεί την ένωση και την συγκόλληση των στοιχείων. Γεωμετρικά, ο ενεργειακός κατευθυντής κατασκευάζεται έτσι ώστε να έχει τη μικρότερη επιφάνεια επαφής ώστε να μεγιστοποιηθεί η συγκεντρωμένη ενέργεια και να αρχίσει η τήξη από αυτή τη περιοχή.



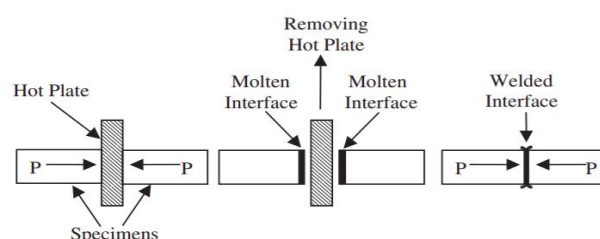
Εικόνα 7 Παραδείγματα σχεδιασμού συνδέσμων με υπέρηχους [3].

2.2.1.2 Συγκόλληση με εξωτερική παροχή θερμότητας (Thermal Welding)

Σε αυτή τη μέθοδο, μια εξωτερική πηγή θερμότητας παρέχει απευθείας θερμική ενέργεια στα τμήματα που πρόκειται να συνδεθούν. Η θερμότητα αυξάνει την θερμοκρασία των συνδεόμενων επιφανειών μέχρι την τοπική τήξη του υλικού. Στη συνέχεια, τα τμήματα έρχονται σε επαφή ή είναι ήδη σε επαφή υπό πίεση και αφήνονται να ψυχθούν δημιουργώντας την κόλληση [2-3].

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΛΑΚΑ (Hot Tool Welding)

Μια θερμαινόμενη πλακά τοποθετείται ενδιάμεσα από τις δυο επιφάνειες συγκόλλησης και έρχεται σε επαφή με αυτές. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω αγωγής και η θερμοκρασία του υλικού αυξάνεται. Στη συνέχεια, η πλακά αφαιρείται και τα δυο τμήματα συμπιέζονται μεταξύ τους μέχρι να στερεοποιηθεί η περιοχή της κόλλησης.

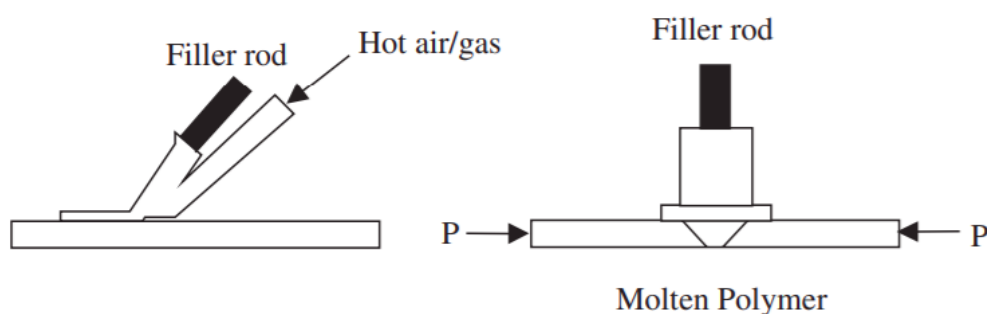


Εικόνα 8 Σχεδιάγραμμα συγκόλλησης με θερμή πλάκα [2]

Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να παραχθούν συγκολλήσεις με αντοχή ίση με το αρχικό πολυμερές ενώ επίσης ανόμοια πολυμερή μπορούν να συγκολληθούν μεταξύ τους αρκεί να έχει εξασφαλιστεί η χημική τους συμβατότητα. Το στοιχείο θέρμανσης είναι κατασκευασμένο από μεταλλικό ή κεραμικό υλικό που δεν κολλάει με το πολυμερές και η διάρκεια συγκόλλησης κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα για μικρού μεγέθους στοιχεία μέχρι 30 λεπτά για μεγαλύτερα.

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ

Αέρια όπως το άζωτο, το διοξείδιο του άνθρακα, το οξυγόνο, ο αέρας κλπ. θερμαίνονται σε κατάλληλη διάταξη και στη συνέχεια με εφαρμογή πίεσης κατευθύνονται στην περιοχή όπου θα γίνει η κόλληση ώστε να λιώσει το πολυμερές. Πρόσθετο υλικό πλήρωσης, συμβατό με το πολυμερές, σε μορφή ράβδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την συγκόλληση. Το υπόστρωμα και το υλικό πλήρωσης στερεοποιούνται μαζί δημιουργώντας την κόλληση.



Εικόνα 9 Διαδικασία συγκόλλησης με καυτά αέρια [2]

2.2.2 Συγκόλληση με χρήση Κόλλας (Adhesive Bonding)

Στις συγκολλήσεις με χρήση κόλλας τα υλικά ενώνονται μεταξύ τους με τη χρήση κατάλληλης συγκολλητικής ουσίας. Η ένωση επιτυγχάνεται χάρη σε ένα συνδυασμό δυνάμεων που οφείλονται τόσο στην χημική αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων και μορίων των προς συγκόλληση υλικών και της κόλλας (δυνάμεις συνάφειας) όσο και της μηχανικής πρόσφυσης μεταξύ της κόλλας και των επιφανειών [1]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, παγκοσμίως υπάρχουν 250.000 διαφορετικές κόλλες, κάποιες από τις βασικές κατηγορίες αυτών είναι οι ακόλουθες :

Κυανοακρυλικές

Οι κυανοακρυλικές κόλλες πολυμερίζονται αντιδρώντας με την υγρασίας στην επιφάνεια συγκόλλησης, είναι ταχείας πήξεως καθώς στερεοποιούνται σε δευτερόλεπτα και είναι κατάλληλες για συνδέσεις όπου υπάρχει καλή επαφή μεταξύ των δύο υλικών.

Εποξικές

Οι κόλλες αυτού του τύπου αποτελούνται από την εποξειδική ρητίνη και τον σκληρυντή, και είναι κατάλληλες για την συγκόλληση των περισσότερων τύπων υλικών ενώ προσφέρουν πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά του συνδέσμου.

Πολυουρεθάνης

Οι κόλλες Πολυουρεθάνης είναι χημικά ενεργοποιούμενα συγκολλητικά μέσα ταχείας πήξεως αποτελούμενα από ένα ή δυο στοιχεία. Παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε κρουστικές φορτίσεις και σε ψυχρό περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες κόλλες. Χρησιμοποιούνται πολύ για τις συνδέσεις μεταξύ γυαλιών και GFRP

Σιλικόνης

Τέτοιου τύπου κόλλες προσφέρουν μεγάλη ευκαμψία και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ δεν παρέχουν υψηλή μηχανική αντοχή και πρόσφυση. Χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για την στεγανοποίηση καθώς είναι ανθεκτικές κατά την έκθεση τους σε μη φιλικά περιβάλλοντα.

Φαινόλης

Είναι ισχυρές κόλλες που χρησιμοποιούνται για την συγκόλληση μετάλλων και ξύλου. Απαιτούν τη χρήση θερμότητας και πίεσης για τη διαδικασία της πήξης.

Πολυαμιδίου

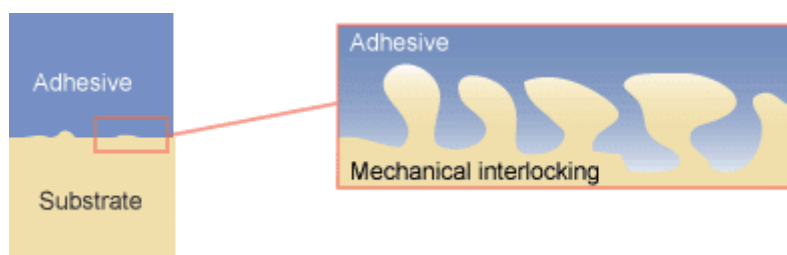
Χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία σε εφαρμογές όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες (350 °C). Διατίθενται είτε σε υγρή μορφή είτε ως λεπτή μεμβράνη και χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος.

Οι συνδέσεις με χρήση κόλλας απαιτούν σωστή και προσεχτική προετοιμασία και κατεργασία των επιφανειών συγκόλλησης καθώς από αυτό θα κριθεί η απόδοση και η αντοχή

της συγκόλλησης [4]. Δεδομένου ότι η περιοχή όπου εφαρμόζεται η κόλλα είναι σχετικά μεγάλη, η κατανομή των τάσεων από τα εφαρμοζόμενα φορτία είναι ομοιόμορφη με αποτέλεσμα να αυξάνει η διάρκεια ζωής της σύνδεσης και να επιτυγχάνεται η σύνδεση λεπτών και ευθραύστων δομών [1]. Η διαδικασία για την επίτευξη μιας καλής σύνδεσης συνίσταται στον καθαρισμό των επιφανειών, την εξασφάλιση καλής διάβροχης της κόλλας και την επιλογή του κατάλληλου τύπου αυτής αναλόγως των συνθηκών και των υλικών, σωστή μελέτη των παραμέτρων της συγκόλλησης όπως είναι το πάχος του στρώματος του συγκολλητικού μέσου, ή της επιφάνειας συγκόλλησης και της επεξεργασίας που θα υποστεί η επιφάνεια.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές θεωρίες πρόσφυσης με βάση την αναφορά [5].

Σύμφωνα με τη μηχανική θεωρία, πρόσφυση υπάρχει λόγω της διείσδυσης του συγκολλητικού μέσου στους πόρους, τις κοιλότητες καθώς και σε άλλες τοπικές ανομοιομορφίες της επιφάνειας συγκόλλησης. Η κόλλα εκτοπίζει τον εγκλωβισμένο αέρα στη διεπιφάνεια και διεισδύει στην τραχεία επιφάνεια, δημιουργώντας μηχανική πρόσφυση (interlocking).



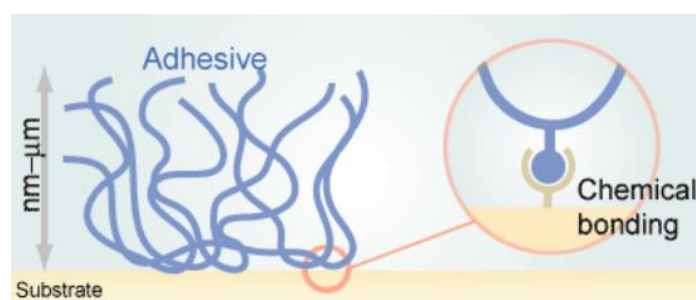
Εικόνα 10 Μηχανισμός της μηχανικής πρόσφυσης [5]

Η θεωρία της διάχυσης (diffusion theory) υποδεικνύει πως η πρόσφυση αναπτύσσεται μέσω της αλληλοδιάχυσης των μορίων του μέσου συγκόλλησης και των συγκολλούμενων τμημάτων. Η θεωρία αυτή ισχύει όταν όλα τα μέρη του συνδέσμου είναι πολυμερικά υλικά με σχετικά μακρές μοριακές αλυσίδες. Η συγκόλληση θερμοπλαστικών με θερμότητα θεωρείται αποτέλεσμα διάχυσης των μορίων. Το πάχος του στρώματος διάχυσης στη διεπιφάνεια κυμαίνεται σε ένα εύρος 10 nm – 100 nm .



Εικόνα 11 Διάχυση των μορίων [5]

Ένας άλλος μηχανισμός συγκόλλησης βασίζεται στην ανάπτυξη χημικών δεσμών μεταξύ της κόλλας και των επιφανειών προς συγκόλληση. Οι δεσμοί υδρογόνου, οι ομοιοπολικοί καθώς και οι ιοντικοί δεσμοί είναι πιο ισχυροί από τις δυνάμεις διασποράς London. Η ακριβής φύση των ελκτικών αλληλεπιδράσεων εξαρτάται από τη φύση των υλικών που έρχονται σε επαφή.



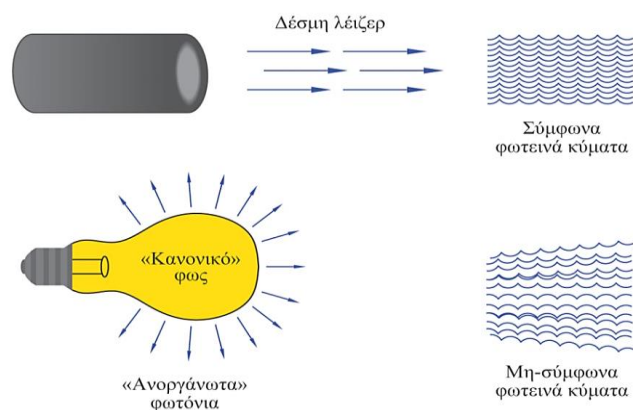
Εικόνα 12 Χημικοί δεσμοί κόλλας και συγκολλούμενου υλικού [5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ : ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LASER

3.1 Τύποι Συστημάτων Laser

Οι συγκολλήσεις με τεχνολογία Laser (Laser Beam Welding) τα τελευταία χρόνια έχουν εγείρει έντονο ενδιαφέρον χάρη στην υψηλή ποιότητα και υψηλή ακρίβεια που παρουσιάζουν ενώ επίσης έχουν αντικαταστήσει ή και βελτιώσει τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης. Πρόκειται για μια τεχνική συγκόλλησης κατά την οποία μια πηγή θερμότητας σε μορφή δέσμης παρέχει αρκετή ενέργεια για την τήξη και συγκόλληση των συνδεόμενων υλικών. Το ακρωνύμιο LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) αποδίδεται στα Ελληνικά ως ‘ένισχυση του φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας’.

Σε αντίθεση με τις συνήθεις πηγές φωτός, όπως για παράδειγμα ο ήλιος ή πυρακτωμένα σώματα, το Laser παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μήκη κύματος πολύ περιορισμένου φάσματος, με συμφασικό τρόπο και προς μια κατεύθυνση. Ο συνδυασμός αυτών των ιδιοτήτων καθιστά τη δέσμη Laser, ακτινοβολία με ιδιαίτερα μεγάλη πυκνότητα ισχύος [6].



Εικόνα 13 Κατευθυντικότητα και γωνιακή απόκλιση δέσμης λέιζερ [9]

Μεταξύ όλων των διαδικασιών συγκόλλησης, η συγκόλληση με λέιζερ μπορεί να παράξει μια ποικιλία συνδέσμων μεταξύ μετάλλων, πλαστικών και γυαλιών που κυμαίνονται από πολύ λεπτά φύλλα πάχους 0,01 mm, έως μίας πλάκας πάχους περίπου 50 mm με χρήση αδρανούς αερίου, όπως το Ήλιο (He), το Αργό (Ar) ή μερικές φορές το Άζωτο (N₂), και για αυτό έχει αποκτήσει μεγάλη δημοτικότητα ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία [7].

Η ποσότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας, E , που μεταφέρεται από μια δέσμη μετράται σε Joule (J), ενώ η αντίστοιχη ακτινοβολούμενη ισχύς P , η οποία εκφράζει την ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρει η δέσμη ανά μονάδα χρόνου, μετράται σε Watt (J/s). Η ισχύς της ακτινοβολίας λέιζερ που φωτίζει μια επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας, μετράται σε μονάδες W/cm^2 και ονομάζεται πυκνότητα ισχύος I (power density ή irradiance). Για τα laser που εκπέμπουν ακτινοβολία κατά συνεχή τρόπο (CW laser), το χρήσιμο μέγεθος για το ενεργειακό περιεχόμενο τέτοιων δεσμών είναι συνήθως η ακτινοβολούμενη ισχύς σε μονάδες Watts (W). Αντίστοιχα, για τα παλμικά lasers, χρησιμοποιούνται η ενέργεια σε Joule (J) και η χρονική διάρκεια του παλμού καθώς και το πλήθος των παλμών ανά δευτερόλεπτο ή ρυθμός επαναληψιμότητας σε Hz (repetition rate) [9].

Η πυκνότητα της ισχύος που παρέχεται σε μια μικρή περιοχή του υλικού είναι υψηλή με αποτέλεσμα οι παραμορφώσεις λόγω θερμικών τάσεων και η αλλοίωση του υλικού να είναι σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από τις συμβατικές μεθόδους. Σε συνδυασμό με το αυτοματοποιημένο σύστημα μιας γραμμής παραγωγής η διεργασία αυτή παρέχει υψηλή ευελιξία και ταχύτητα, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας το κόστος. Η χρήση της τεχνολογίας αυτής επιτρέπει τη κατεργασία ενός πλήθους υλικών.

Οι βασικές κατηγορίες συστημάτων Laser που χρησιμοποιούνται για την συγκόλληση είναι τρεις :

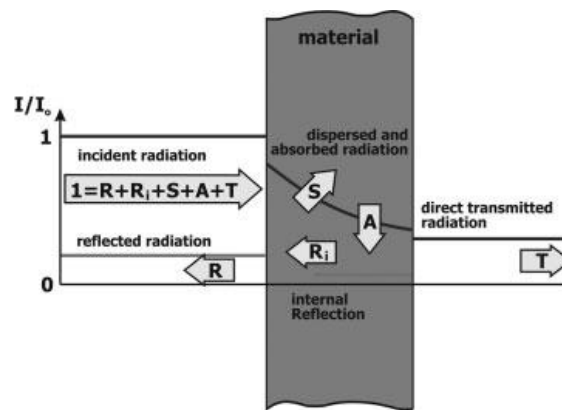
Αέριας Κατάστασης: Το αέριο μείγμα διεγείρεται με ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται από την εφαρμογή υψηλού δυναμικού στα ηλεκτρόδια του σωλήνα όπου περιέχεται το αέριο (όπως και στις λάμπες φθορισμού). Τα lasers CO_2 (μείγμα αέριων CO_2 He , N_2) παρέχουν ισχύ από 1-15 kW με μέγιστη τα 50 kW και εκπέμπουν σε μήκος κύματος 10.6 μm με την απόδοση να κυμαίνεται στο 10%.

Laser Στερεής Κατάστασης: Το ενεργό υλικό βρίσκεται σε στερεά κατάσταση στο οποίο έχει γίνει έγχυση άλλου υλικού με τη μορφή ιόντων. Είναι κατασκευασμένο από κρύσταλλο ή γυαλί συνήθως σε σχήμα κυλίνδρου ή παραλληλεπιπέδου ενώ το υλικό διάχυσης μπορεί να είναι Νεοδύμιο (Nd) ,Χρώμιο (Cr), ή Υττέρβιο (Yb). Ο πιο διαδεδομένος τύπος που χρησιμοποιείται είναι το Laser Nd:YAG (Neodymium- Yttrium Aluminum Garnet) με μήκος κύματος 1.06 μm και ισχύ 7 W -7 kW ενώ η απόδοση του είναι 1% - 4 %. Η δέσμη μπορεί να μεταφερθεί μέσω οπτικής ίνας (fiber laser) ενώ η λειτουργία του μπορεί να είναι συνεχής (Continuous Wave, CW) ή παλμική (Pulsed Wave, PW).

Laser Ημιαγωγών (Diode Laser): Πρόκειται όπως και πριν για συστήματα στερεάς κατάστασης. Παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση της τάξης 30-60% και εκπέμπουν σε μήκη κύματος 800 με 2000 nm

3.2 Αλληλεπίδραση της ύλης με την ακτινοβολίας Laser

Καθώς η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού κάποιο μέρος της ενέργειας θα ανακλαστεί, κάποιο θα διαδοθεί και κάποιο θα απορροφηθεί από το υλικό. Κάθε μέσο απορροφά ορισμένα μήκη κύματος, ενώ είναι διαφανές σε άλλα. Όταν στο σώμα προσπίπτει φως που χαρακτηρίζεται από συνεχές φάσμα το διερχόμενο φως έχει διαφορετικό φάσμα από το προσπίπτον. Στην περίπτωση που όλα τα μήκη κύματος απορροφώνται το ίδιο θεωρείται ότι εμφανίζεται γενική απορρόφηση ενώ εάν απορροφώνται κατά προτίμηση και επιλεκτικά ορισμένες στενές περιοχές γύρω από κάποια μήκη κύματος εμφανίζεται εκλεκτική απορρόφηση. Στην εκλεκτική απορρόφηση απορροφώνται κυρίως εκείνα τα μήκη κύματος $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ που αντιστοιχούν σε συχνότητες κοντά στις ιδιοσυχνότητες ταλαντώσεις $\omega_1, \omega_2, \dots$ των μορίων του υλικού. Κατά την κατεργασία υλικών με laser, η ενέργεια θα πρέπει να απορροφάται αποδοτικά από την κατεργαζόμενη επιφάνεια.



Εικόνα 14 Εξασθένιση της έντασης της ακτινοβολίας λόγω ανάκλασης καθώς και εσωτερικής σκέδασης και απορρόφησης του φωτός [11]

Υπό την υπόθεση της γραμμικής οπτικής απόκρισης του υλικού, δηλαδή της γραμμικής απορρόφησης της ακτινοβολίας, η εξασθένιση της έντασης της ακτινοβολίας μπορεί να περιγραφεί από νομό απορρόφησης του Lambert [9],[11]:

$$I_T(z) = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi\kappa}{\lambda} * z\right) = I_0 \exp(-a * z) \quad (1)$$

Με I_0 : η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

I_T : η ένταση της διερχομένης ακτινοβολίας

z : το πάχος του υλικού

$\alpha = 4\pi\kappa/\lambda$: η σταθερά απορρόφησης (mm^{-1})

Έτσι, κατά τη διάδοση μιας ακτινοβολίας σε ένα υλικό, η μείωση της έντασής της γίνεται εκθετικά με το πάχος του υλικού z . Επίσης, η σταθερά απορρόφησης α σχετίζεται όπως φαίνεται με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας και τις ιδιότητες του υλικού οι οποίες περιγράφονται από τον συντελεστή απορρόφησης κ (κυματάνυσμα). Το πηλίκο της διερχόμενης έντασης (I_T) προς την προσπίπτουσα ένταση (I_0) ονομάζεται διαφάνεια.

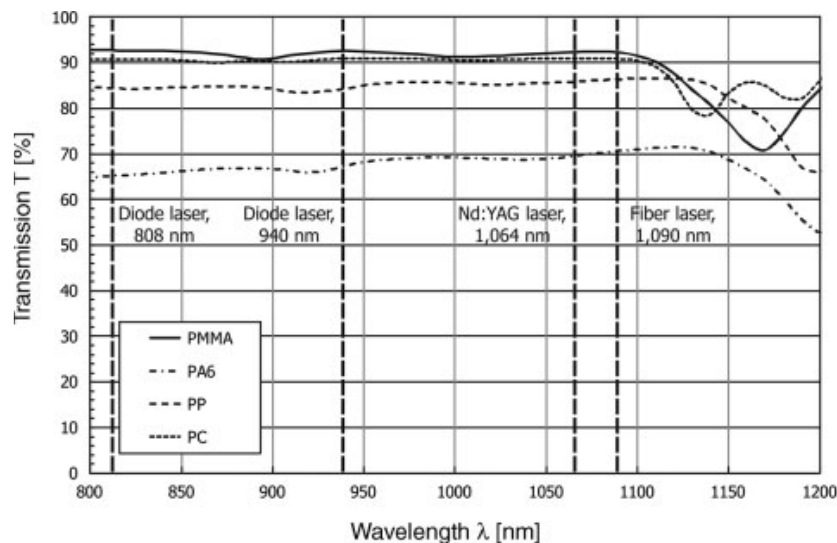
Χρησιμοποιώντας το μέγεθος $\alpha = \frac{1}{\alpha}$ (optical penetration depth, mm) συγκριτικά με το πάχος του υλικού z ισχύει [11]:

$\alpha \ll z$: η ακτινοβολία θα απορροφηθεί από την επιφάνεια

$\alpha \gg z$: το υλικό είναι διαφανές στην ακτινοβολία

$\alpha \cong z$: η ακτινοβολία θα απορροφηθεί μέσα στον όγκο του υλικού

Στο παρακάτω διάγραμμα της πηγής [11] παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες μετάδοσης συναρτήσει του μήκους κύματος για κάποια πλαστικά.



Διάγραμμα 1 Χαρακτηριστικές καμπύλες μετάδοσης ακτινοβολίας σε πλαστικό

Η αλληλεπίδραση της δέσμης laser με την επιφάνεια του υλικού εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες [10] :

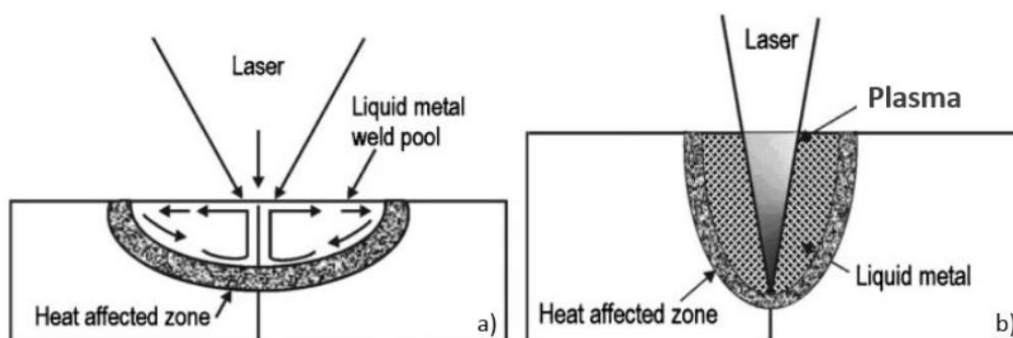
- Τον τύπο του υλικού και τα διάφορα πρόσθετα που μπορεί να περιέχει, καθώς και την όποια επικάλυψη.

- Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.
- Την ένταση της δέσμης Laser (ισχύς, ή διάμετρος της εστιασμένης δέσμης, διάρκεια παλμών, ποιότητά της δέσμης).
- Την ταχύτητα που σαρώνει η δέσμη την επιφάνεια.

Υπάρχουν δυο καταστάσεις που χαρακτηρίζουν την συγκόλληση με Laser. Η πρώτη, αναλόγως του μεγέθους της έντασης της δέσμης laser που ακτινοβολείται και η δεύτερη, αναλόγως του σημείου εστίασης αυτής σε σχέση με το κατεργαζόμενο υλικό.

Η πρώτη κατάσταση αναφέρεται στη βιβλιογραφία [7], ως *συγκόλληση μέσω αγωγής* (Conduction welding) και συμβαίνει όταν η ένταση της δέσμης δεν προκαλεί βρασμό και εξατμισμό του υλικού, οπότε το υλικό ρευστοποιείται τοπικά και το βάθος της συγκόλλησης είναι μικρό.

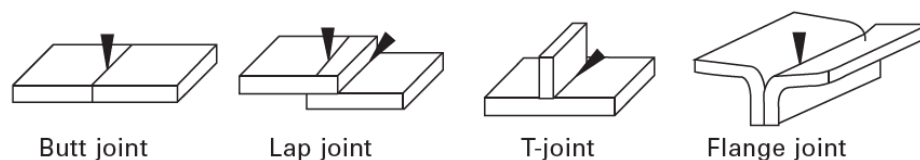
Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου η ενέργεια της δέσμης είναι ικανή να φέρει το υλικό σε βρασμό, τότε στο εσωτερικό της περιοχής τήξης δημιουργείται μια κοιλότητα με ατμούς (keyhole) του εξατμισμένου υλικού. Σε αυτή τη κατάσταση η οπή συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα και η απορρόφηση της δέσμης laser ανέρχεται στο 65 % (15% για συγκόλληση μέσω αγωγής) [8]. Η δέσμη εισχωρεί στο υλικό μέσω της οπής και αποδίδει την ενέργεια της σε μεγαλύτερο μέρος του υλικού με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκόλληση τμημάτων μεγαλύτερου πάχους. Σαφή όρια της μετάβασης από τη μια κατάσταση στην άλλη δεν υπάρχουν καθώς εξαρτάται από το υλικό, ωστόσο για ένταση ενέργειας χαμηλότερη των 10^6 W/cm² θεωρείται πως συμβαίνει συγκόλληση μέσω αγωγής. Η τιμή αυτή είναι ανεξάρτητη από τη ταχύτητα συγκόλλησης και τη διάμετρο της δέσμης [7].



Εικόνα 15 Conduction vs Keyhole mode [8]

3.3 Γεωμετρία Συγκολλητών Συνδέσμων με χρήση Laser :

Επιπλέον της εφαρμογής βασικών κανόνων σχεδιασμού και μελέτης συγκολλητών συνδέσμων, οι σύνδεσμοι με χρήση Laser απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στην γεωμετρία τους. Κατά τις συγκολλήσεις τέτοιου τύπου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η σωστή τοποθέτηση και διάταξη των τμημάτων προς συγκόλληση [11]. Οι επιφάνειες των τμημάτων πρέπει να έχουν καλή επαφή μεταξύ τους (χαμηλή τραχύτητα, επίπεδες επιφάνειες) ενώ η διεπιφάνεια σύνδεσης επιβάλλεται να είναι προσβάσιμη από τη δέσμη Laser. Οι πιο κοινές διάταξης συνδέσμων απεικονίζονται παρακάτω :



Εικόνα 16 Τυπικά παραδείγματα συνδέσμων με χρήση Laser [7]

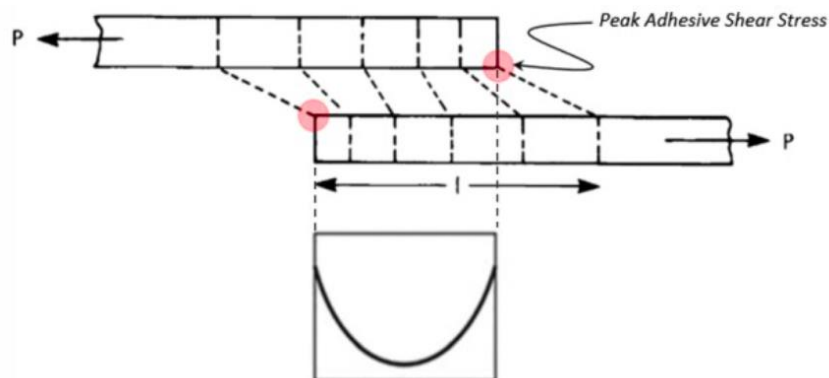
- Σύνδεσμοι Αλληλοεπικάλυψης (Lap Joints)

Η γεωμετρία τους συνίσταται από δυο συνδεόμενες πλάκες οι οποίες συγκρατούνται σε επαφή μεταξύ τους. Κατά τη συγκόλληση με Laser, η δέσμη σαρώνει την αλληλεπικαλυπτομένη επιφάνεια. Οι σύνδεσμοι γεωμετρίας τύπου Lap Joint χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για τον μηχανικό χαρακτηρισμό της αντοχής της συγκόλλησής και του συνδέσμου έναντι των άλλων που παρουσιάστηκαν. Αυτό οφείλεται στην ευκολία κατασκευής τους αλλά και πειραματικής δοκιμής τους. Ωστόσο, στην περίπτωση των συνδέσμων Υάλου - Συνθέτου υλικού, η ψαθυρή συμπεριφορά του γυαλιού δεν επιτρέπει τη δοκιμή εφελκυσμού του συνδέσμου.

- Σύνδεσμοι τύπου “Butt” & “T”

Χωρίς αλληλοεπικάλυψη οι έδρες των τμημάτων έρχονται σε επαφή μεταξύ τους διαμορφώνοντας έτσι την διεπιφάνεια συγκόλλησης. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες γιατί η επιφάνεια συγκόλλησης είναι μικρή και η εφαρμογή πίεσης πρέπει να γίνει με κατάλληλο τρόπο ώστε να αποφευχθεί η παραμόρφωση των μελών.

Οι παραπάνω γεωμετρίες σύνδεσης χρησιμοποιούνται επίσης για τους συνδέσμους με χρήση κόλλας ως συγκολλητικού μέσου των δύο τμημάτων. Σε αυτή τη περίπτωση απαραίτητη είναι η επιφανειακή κατεργασία και η επιλογή της σωστής κόλλας. Για την θεωρητική μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς των *συνδέσμων μονού επιθέματος* (lap joints) έχουν αναπτυχθεί διάφορα προσεγγιστικά ή αναλυτικά μοντέλα τα οποία είτε μελετούν την κατανομή των τάσεων κατά το μήκος της κόλλας για μικρές παραμορφώσεις, είτε το φορτίο στο οποίο αστοχεί ο σύνδεσμος. Θεωρούν ότι οι τάσεις κατά τη διεύθυνση της φόρτισης είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές κατά το πάχος. Η πιο απλή και ευρέως διαδομένη θεωρία είναι η μέθοδος του Volkersen (*shear lag model*) η ανάπτυξη της οποίας ξεκίνησε το 1983. Σύμφωνα με το μονοδιάστατο μοντέλο *διεπιφανειακής διάτμησης*, στην επιφάνεια της κόλλησης αναπτύσσεται μόνο διατμητική τάση ενώ οι συνδεόμενες πλάκες καταπονούνται σε εφελκυσμό χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η καμπτική ροπή που ενεργεί στα άκρα της κόλλησης και προσθέτει τάσεις αποκόλλησης της κόλλας από τις επιφάνειες. Και οι δυο φορτίσεις θεωρούνται σταθερές κατά μήκος της επιφάνειας φόρτισης.



Εικόνα 17 *Shear lag model*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΑΝΟΜΟΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER

Πολλά εμπόδια και περιορισμοί στο σχεδιασμό και την παραγωγή συνθέτων κατασκευών έχουν αρθεί με επιτυχία χάρη στο συνδυασμό ανόμοιων τύπων υλικών, όπως για παράδειγμα, γυαλί με πολυμερές, γυαλί με μέταλλο, μέταλλο με πολυμερές, μέταλλο με κεραμικό υλικό [12]. Η δυσκολία κατανόησης των φαινομένων που συμβαίνουν κατά την διαδικασία σύνδεσης δυο διαφορετικών υλικών έγκειται στις διαφορετικές ιδιότητες τους. Παρά το πλήθος των διαδικασιών σύνδεσης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο II, καμία δεν είναι επαρκής για την σύνδεση γυαλιού με κάποιο ανόμοιο υλικό. Εξαίρεση αποτελεί η συγκόλληση με κόλλα (adhesive bonding) που ωστόσο θέλουμε να αποφύγουμε για τους λόγους που παρατέθηκαν. Σε αυτό το Κεφάλαιο θα εξεταστούν οι σύνδεσμοι πολυμερούς και πολυμερικού συνθέτου υλικού και γυαλιού – μετάλλου.

4.1 Πλαστικά

Πλαστικά ονομάζονται τα πολυμερή τα οποία περιέχουν διάφορα πρόσθετα (additives) και παύουν να είναι τα καθαρά υλικά που απλά προκύπτουν από την διαδικασία του πολυμερισμού.

ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ [7][10][13]

Στα **θερμοπλαστικά πολυμερή** τα μακρομόρια συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Όταν το υλικό θερμανθεί, τότε η ένταση των διαμοριακών δυνάμεων μειώνεται πάρα πολύ έτσι ώστε το υλικό να γίνεται μαλακό και εύκαμπτο ενώ στη συνέχεια, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μετατρέπεται σε ιξώδες ρευστό. Όταν το αφήσουμε να ψυχθεί τότε μετατρέπεται και πάλι σε στερεό. Αυτός ο κύκλος της ρευστοποίησης με θέρμανση και της στερεοποίησης με ψύξη μπορεί να επαναληφθεί θεωρητικά άπειρες φορές και αποτελεί ένα πλεονέκτημα της διαδικασίας μορφοποίησης των υλικών αυτών.

Μια υποδιαίρεση των υλικών αυτών τα διακρίνει σε **άμορφα, ημικρυσταλλικά και κρυσταλλικά**.

Τα *άμορφα* θερμοπλαστικά χαρακτηρίζονται από την τυχαία διάταξη των μακρομορίων τους σε αντίθεση με τα κρυσταλλικά των οποίων η δομή χαρακτηρίζεται από την τάξη στη διεύθυνση των μακρομορίων τους. Τα απολύτως κρυσταλλικά υλικά είναι αδύνατον να

υπάρξουν στην πράξη λόγω της πολυπλοκότητας της δομής τους. Για τον λόγο αυτό πλαστικά με άμορφες περιοχές και περιοχές μεγάλου βαθμού κρυστάλλωσης χαρακτηρίζονται ως *ημικρυσταλλικά*.

Για κάθε άμορφο πλαστικό υπάρχει μια περιοχή θερμοκρασιών κατά την οποία γίνεται σταδιακή μετάβαση από τη στερεά στην κομμωδή φάση. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή της υαλώδους μετάβασης T_g [14]. Για τη συγκόλληση των άμορφων πλαστικών η θερμοκρασία πρέπει να είναι πάνω από την T_g ώστε να υπάρχει κίνηση των πολυμερικών αλυσίδων.

Τα ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά έχουν περιοχές άμορφης και κρυσταλλικής δομής, η θερμοκρασία T_g εδώ σχετίζεται μόνο με τις άμορφες περιοχές και πάνω από αυτή τη θερμοκρασία δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στη φάση του υλικού. Θα πρέπει το υλικό να είναι πάνω από τη θερμοκρασία τήξης T_m των κρυστάλλων προκειμένου να παρουσιάσει μεταβολή στη φάση του και ιξώδη ροή. Τα υλικά αυτά συγκολλούνται σε θερμοκρασίες πάνω από την T_m .

Ο μηχανισμός θερμικής συγκόλλησης των θερμοπλαστικών βασίζεται στην διάχυση και περιέλιξη (entanglement) των πολυμερικών αλυσίδων των πολυμερών στην διεπιφάνεια σύνδεσης. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_g ή της T_m για τα άμορφα και ημικρυσταλλικά υλικά αναλόγως λόγω της μεγάλης κινητικότητας των πολυμερικών αλυσίδων.

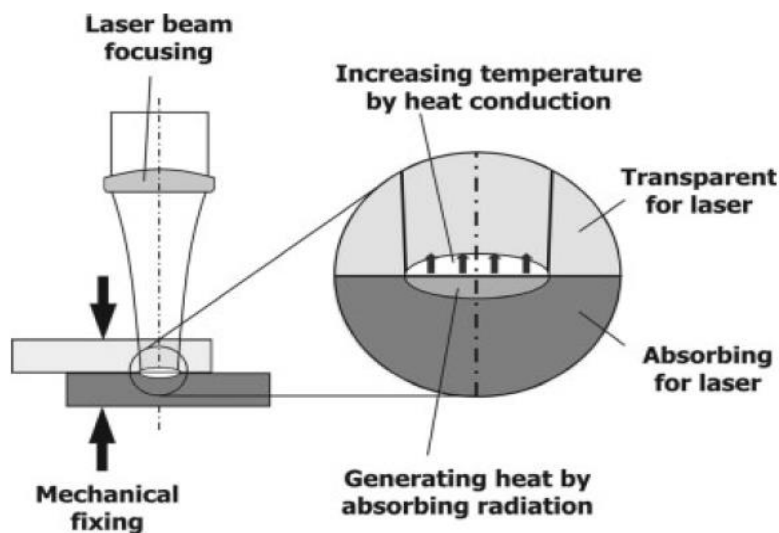
ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ

Τα **θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά** παράγονται σε δυο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο παράγονται μαρκομοριακές αλυσίδες οι οποίες στο δεύτερο στάδιο της μορφοποίησης αντιδρούν περαιτέρω με την επίδραση της θερμότητας και δημιουργούνται *σταυροειδείς δεσμοί* (Crosslinks) [13]. Παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών είναι η εποξειδική ρητίνη (Epoxy Resin), η φαινολική ρητίνη (Phenolic Resin) αλλά και η πολυεστερική ρητίνη (Polyester Resin) [11]. Μετά την ψύξη, τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι δύσκαμπτα και ψαθυρά λόγω της περιορισμένης κίνησης που επιτρέπουν οι σταυροδεσμοί, ενώ επίσης με την παροχή θερμότητας δεν τήκονται και δεν μαλακώνουν, για το λόγο αυτό δεν μπορούν να συγκολληθούν απευθείας με θερμικές κατεργασίες όπως η συγκόλληση με υπέρηχους ή με laser. Ξεπερνώντας την θερμοκρασία θερμικής αποσύνθεσης T_d το υλικό καίγεται και διασπάται μοριακά.

4.1.1 Συγκόλληση θερμοπλαστικών και συνθέτων υλικών με θερμοπλαστική μήτρα

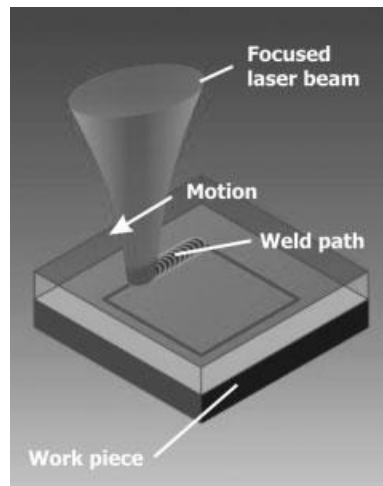
Η σύνδεση με συγκόλληση θερμοπλαστικών ενισχυμένων με ίνες, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση Laser. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται μπορούν να διαχωριστούν στην *απευθείας συγκόλληση Laser* και την *συγκόλληση Laser με μετάδοση*.

Η συγκόλληση Laser με μετάδοση η οποία αναφέρεται συχνά στην βιβλιογραφία ως '**Laser Transmission Welding (LTW)**' βασίζεται στη συγκόλληση μέσω αγωγής (Conduction Welding). Σε αυτή τη μέθοδο υπάρχει το πάνω υλικό που δεν αλληλοεπιδρά με τη δέσμη Laser που μεταδίδεται μέσω αυτού στο κάτω υλικό το οποίο απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται στην διεπιφάνεια της σύνδεσης [15]. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω αγωγής στο διαφανές υλικό με αποτέλεσμα αυτό να τήκεται. Τα δυο τμήματα της σύνδεσης έχουν από πριν έρθει σε επαφή μεταξύ τους με την επιβολή πίεσης.



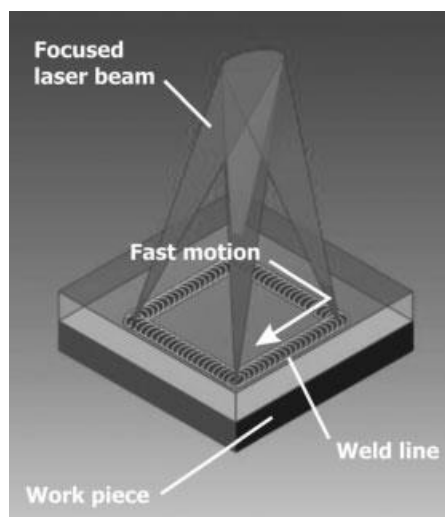
Εικόνα 18 Συγκόλληση laser μέσω μετάδοσης [11].

Η μέθοδος LTW πραγματοποιείται με τρεις τεχνικές, την *συγκόλληση περιγράμματος* (*contour welding*), την *ψευδοταυτόχρονη* (*quasi-simultaneous*) και την *ταυτόχρονη συγκόλληση* (*simultaneous*), [11][15]. Κατά την συγκόλληση περιγράμματος, η δέσμη είναι εστιασμένη στη διεπιφάνεια και κινείται μια φορά μόνο κατά μήκος του περιγράμματος στο οποίο θα γίνει η συγκόλληση των υλικών.



Εικόνα 19 Συγκόλληση περιγράμματος [11].

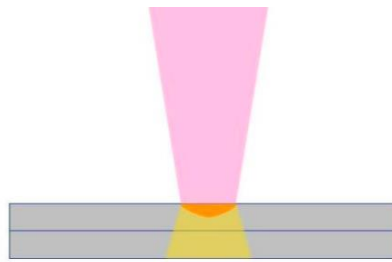
Στην *ψευδοταυτόχρονη συγκόλληση* η δέσμη laser καθοδηγείται με μεγάλη ταχύτητα σάρωσης κατά μήκος του περιγράμματος συγκόλλησης επαναληπτικά μεταφέροντας έτσι την θερμική ενέργεια στο υλικό με χαμηλότερο ρυθμό. Με αυτή τη μέθοδο η επιφάνεια συγκόλλησης τήκεται ταυτόχρονα και υπό την επίδραση της εξωτερικής πίεσης το τήγμα ρέει καλύπτοντας τα κενά μεταξύ των δυο υλικών στην διεπιφάνεια σύνδεσης. Η ταχύτητα που σαρώνει η δέσμη καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων είναι σημαντικό να καθοριστούν σύμφωνα με τις θερμικές ιδιότητες του πλαστικού [11].



Εικόνα 20 Ψευδοταυτόχρονη συγκόλληση [11].

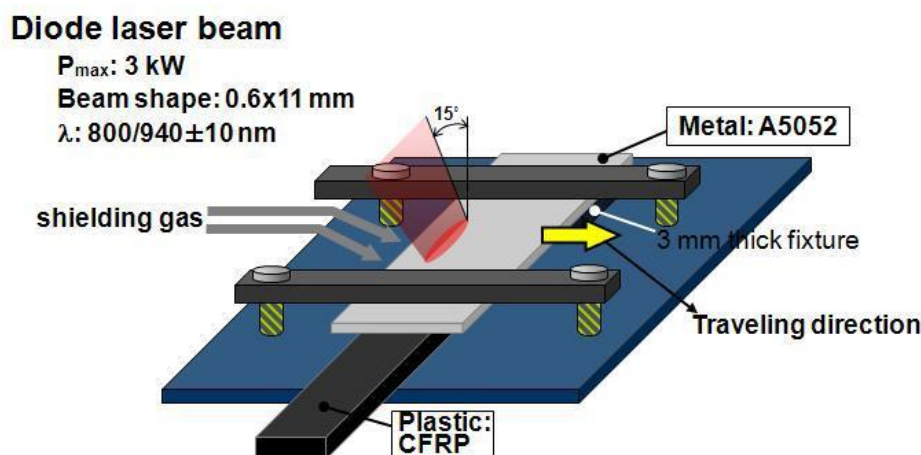
Κατά την απευθείας συγκόλληση με laser, γνωστή στη βιβλιογραφία ως **'Direct Laser Welding'**, τα υλικά θερμαίνονται από την εξωτερική επιφάνεια της σύνδεσης. Η δέσμη

απορροφάται από το επάνω υλικό σε συνδέσμους επικάλυψης και μέσω αγωγής μεταφέρεται στην διεπιφάνεια σύνδεσης. Αυτού του είδους η τεχνική χρησιμοποιείται για την συγκόλληση ανόμοιων υλικών με το ένα εξ αυτών να είναι θερμοπλαστικό [16], ενώ για συγκολλήσεις μεταξύ πλαστικών γίνεται χρήση πηγών laser που εκπέμπουν σε μήκη κύματος 2.0 – 10.6 μm αφού τότε η ακτινοβολία απορροφάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα πλαστικά [14].



Εικόνα 21 Direct Laser Welding.

Στην εργασία ‘*Laser direct joining of CFRP and Aluminum*’ [16], σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP) συγκολλάται με τη χρήση της μεθόδου Direct Laser Welding σε τρία διαφορετικά κράματα αλουμίνιου. Το laser που χρησιμοποιήθηκε ήταν Laser Ημιαγωγών (Diode Laser) συνεχούς εκπομπής στα 800/940 nm. Η ενέργεια της δέσμης προσφέρεται στην επιφάνεια του αλουμίνιου και μέσω αγωγής, στο σύνθετο υλικό. Η θερμοπλαστική μήτρα του συνθέτου τήκεται στην διεπιφάνεια και διαβρέχει το μέταλλο. Στις πειραματικές συγκολλήσεις που διεξήχθησαν φαίνεται πως η επιλογή της ταχύτητας σάρωσης της δέσμης laser καθώς και η ισχύς του συστήματος θα πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με τις θερμικές ιδιότητες των κραμάτων.

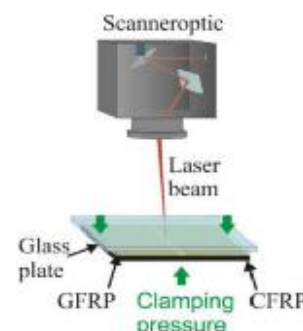


Εικόνα 22 Σχεδιάγραμμα της διάταξης συγκόλλησης και του της γεωμετρίας της δέσμης [16].

Παρατηρήθηκε επίσης η δημιουργία φυσαλίδων αέρα σε απόσταση 200-300 μm από την διεπιφάνεια σύνδεσης των τμημάτων για το κράμα A5182 το οποίο και χρειάστηκε την μικρότερη ταχύτητα σάρωσης ενώ για το κράμα AF200 οι φυσαλίδες ήταν σε απόσταση 600 μm και χρειάστηκε μεγάλη ταχύτητα σάρωσης ώστε να μην λιώσει το αλουμίνιο. Οι συνδέσεις του σύνθετου υλικού με το A5182 έφτασαν τα 9 MPa σε αντοχή κατά τη δοκιμή εφελκυσμού.

Σε άλλη δημοσίευση με τίτλο ‘*Advanced laser welding of high-performance thermoplastic composites*’ [15] εξετάζεται η συγκόλληση μεταξύ πολυμερικών συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GFRP) και άνθρακα (CFRP). Όπως αναφέρεται, με τη χρήση της μεθόδου *συγκόλλησης με μετάδοση* (Transmission Laser Welding) για συνδέσμους τύπου επικάλυψης (overlap joint) σημαντικό παράγοντα αποτελεί το υλικό της μήτρας των συνθέτων και η ύπαρξη των ινών ενίσχυσης. Οι ίνες γυαλιού διασκορπίζουν (scattering) την δέσμη laser εντός του όγκου του υλικού σε αντίθεση με τις ίνες άνθρακα οι οποίες απορροφούν την ακτινοβολία. Κατ’ ακολουθίαν το GFRP τοποθετήθηκε ως άνω τμήμα του συνδέσμου επικάλυψης ενώ το CFRP στο κάτω προκειμένου να απορροφήσει την ακτινοβολία και να θερμανθεί η διεπιφάνεια σύνδεσης. Η διάταξη των συνδέσμων που αναπτυχθήκαν φαίνεται στην επόμενη εικόνα και στον πίνακα οι προδιαγραφές των συστημάτων laser του πειράματος.

Specification	Blind welding	LTW
Laser source	Nd:YAG laser	Diode laser
Model	RSM 100 D	LDF 600-200
Manufacturer	Rofin Sinar	Laserline
λ (nm)	1064	940
$P_{L,max}$ (W)	100	210
Operation mode	cw	cw
f_{fok} (mm)	160	163

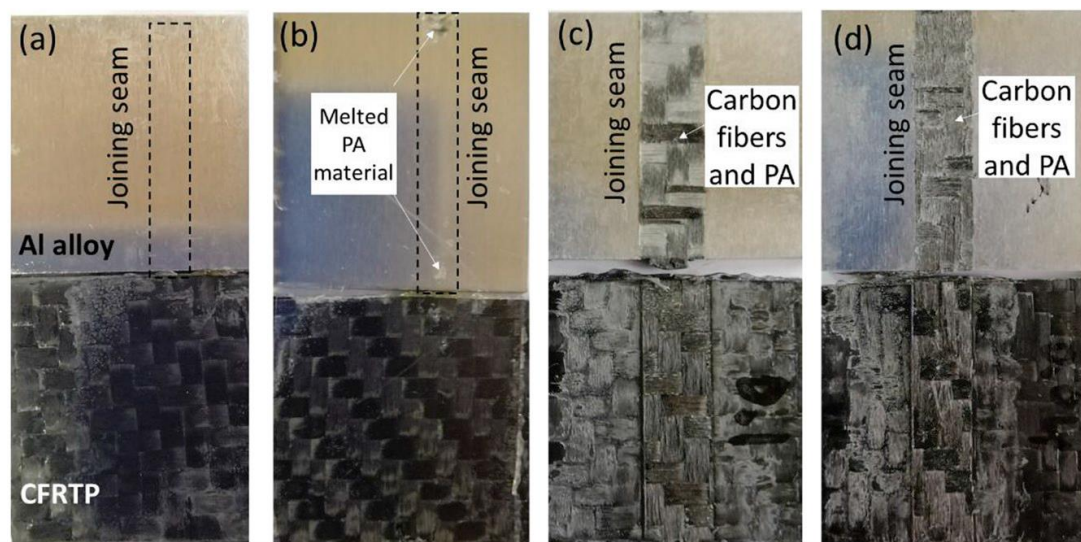


Εικόνα 23 Οι προδιαγραφές των συστημάτων laser και η πειραματική διάταξη [15].

Ειδικότερα μελετάται η επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης, της ενέργειας που απορροφάται από το υλικό και της τεχνικής *ημι-σύγχρονης συγκόλλησης* (contour - quasi-simultaneous) συναρτήσει της αντοχής σε διάτμηση και του πλάτους της συγκόλλησης. Με βάση τα αποτελέσματα, για την ψευδοταυτόχρονη συγκόλληση απαιτείται πέντε φορές μεγαλύτερη ενέργεια ώστε να δημιουργηθεί συγκόλληση ιδίου πλάτους με αυτή που δίνει η συγκόλληση περιγράμματος. Επιπροσθέτως με τη ψευδοταυτόχρονη μέθοδο είναι εφικτό σύνθετα υλικά με χαμηλό βαθμό μετάδοσης της ακτινοβολίας Laser να συγκολληθούν σε GFRP χωρίς να υπάρξει βλάβη στην επιφάνεια του υλικού.

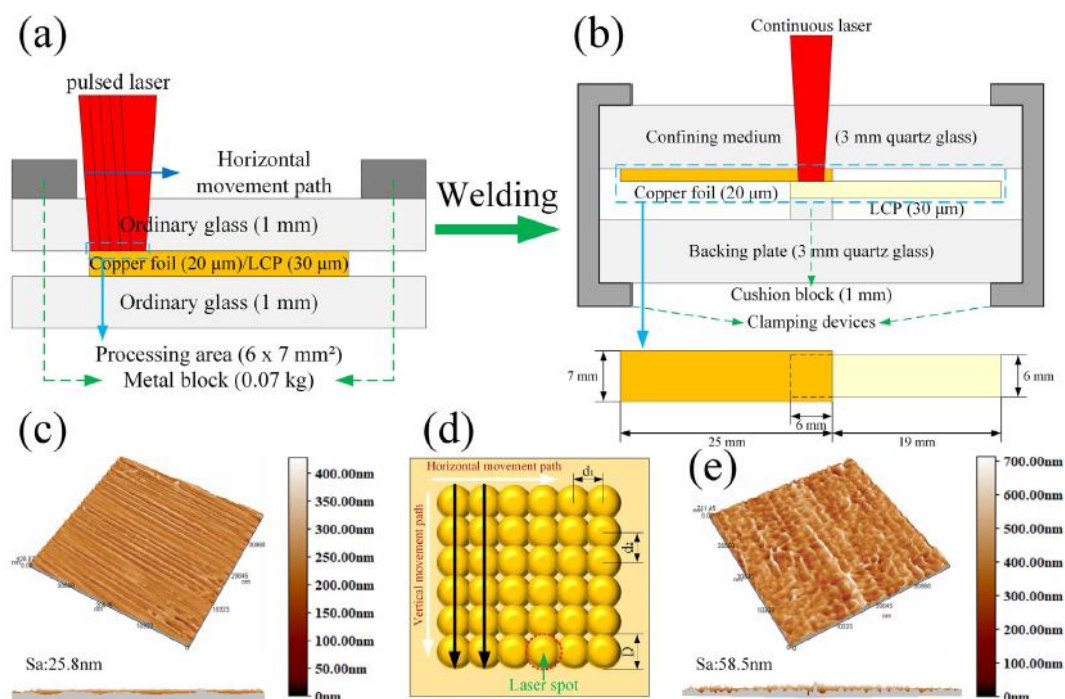
Οι Junke Jiao et al. στο άρθρο 'Laser direct joining of CFRTF and aluminium alloy with a hybrid surface pre-treating method' [27] πραγματεύονται τη συγκόλληση πολυμερικού συνθέτου υλικό και κράματος αλουμινίου 7075. Το σύνθετο υλικό είναι κατασκευασμένο με τη μέθοδο της εξώθησης (extrusion) συνδυάζοντας μήτρα από πολυαμιδίο (PA) και ίνες άνθρακα. Τμήμα της μελέτης επικεντρώνεται στην επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας του αλουμινίου στην αντοχή του συνδέσμου. Η επιφάνεια του μετάλλου κατεργάζεται με τη χρήση παλμικού συστήματος Laser προκειμένου να δημιουργηθεί το δισδιάστατο 'πλέγμα' και να αυξηθεί η τραχύτητα της. Οι αυλακώσεις λόγω της χάραξης με τη δέσμη laser αυξάνουν τη διαθέσιμη επιφάνεια διάβροχης και δημιουργούν τις απαραίτητες συνθήκες για καλή μηχανική πρόσφυση, το ύψος της αυλάκωσης είναι επίσης σημαντικό. Η συγκόλληση είναι τύπου 'Direct Laser Welding', η δέσμη αλληλεπιδρά με το μέταλλο προσφέροντας ενέργεια και αυξάνοντας τοπικά τη θερμοκρασία, ενώ η θερμότητα άγεται προς τη διεπιφάνεια των υλικών όπου και τήκεται το πολυμερές. Προκειμένου να επαρκέσει η ποσότητα του τηγμένου πολυμερούς ώστε να εισχωρήσει στην τραχύτητα και να διαβραχεί όλη η μεταλλική επιφάνεια παρεμβάλλεται φύλλο (40μm) ιδίου πολυμερούς με τη μήτρα (PA) και μελετάται η επίδραση

του πάχους του, στην αντοχή του συνδέσμου. Τα αποτελέσματα φανερώνουν αύξηση 260% της αντοχής του υβριδικού συνδέσμου σε σύγκριση με συνδέσμους που δεν έχουν υποστεί κατεργασία τράχυνσης στη μεταλλική επιφάνεια και παρεμβολή ενδιάμεσης στρώσης πολυμερούς. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό του συνδέσμου αναφέρεται να είναι 37.5 MPa.



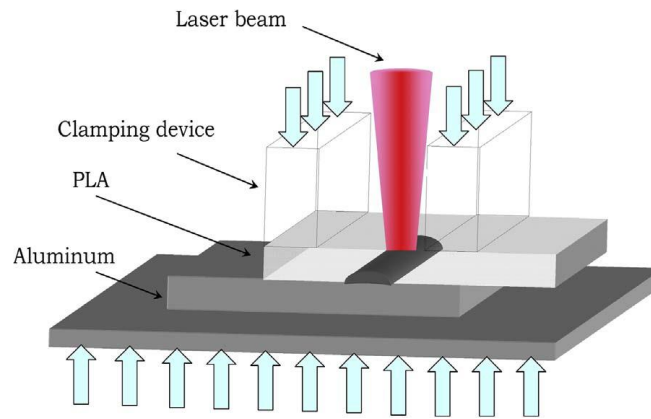
Εικόνα 24 Η επιφάνεια θραύσης του συνδέσμου έπειτα από δοκιμή εφελκυσμού α) χωρίς επιφανειακή κατεργασία και φύλλο PA β) με φύλλο PA γ) με επιφανειακή κατεργασία δ) με επιφανειακή κατεργασία και φύλλο PA [27].

Παρόμοια μελέτη αναπτύχθηκε από τους *Le Jia et al.* στο άρθρο 'Direct bonding of copper foil and liquid crystal polymer by laser etching and welding' [28] όπου επιχειρούν τη συγκόλληση πολυμερούς LCP (Liquid Crystal Polymer) και λεπτού μεταλλικού φύλλου χαλκού (20 μm) το οποίο έχει υποστεί τράχυνση στην επιφάνεια συγκόλλησης. Η τράχυνση πραγματοποιείται όπως και πριν με τη μέθοδο της χάραξης (etching) χρησιμοποιώντας παλμικό σύστημα laser ενώ γίνεται στη μια κατεύθυνση, η τραχύτητα είναι της τάξης των 58.5 nm. Τα δυο φύλλα ορθογωνικής διαμόρφωσης τοποθετούνται σε διάταξη επικάλυψης (overlap joint) και τους ασκείται πίεση 3.8 MPa. Η συγκόλληση γίνεται με τη μέθοδο 'Direct Laser Welding', προσβάλλοντας η δέσμη laser τη μεταλλική επιφάνεια. Η πηγή laser είναι συνεχούς εκπομπής με την ισχύ να κυμαίνεται από 180 έως 300 watt και τη δέσμη να έχει διάμετρο 10 mm (defocused) και ταχύτητα σάρωσης 300 mm/min. Σύμφωνα με τους συγγραφείς η πειραματική διερεύνηση των παραμέτρων συγκόλλησης και της τραχύτητας της επιφάνειας οδήγησε στην επιτυχή συγκόλληση και υψηλή αντοχή του συνδέσμου, 682.72 N/m peel strength και 0.61 MPa μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό του συνδέσμου.



Εικόνα 25 Laser etching and welding process: (a) schematic diagram of laser etching, (b) schematic diagram of laser welding, (c) surface morphology of copper foil before laser etching, (d) laser spot moving path in laser etching process, (e) surface morphology of copper foil after laser etching. [35]

Τέλος, σε έρευνα των Nunziante Pagano et al. με τίτλο 'Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films for applications in the food-packaging industry' [35] λεπτά φύλλα αλουμινίου και PLA που βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανία συσκευασίας τροφίμων συγκολλούνται με τη χρήση της μεθόδου LTW. Η πηγή Laser (Fiber Laser) είναι παλμικής εκπομπής με μέγιστη μέση ισχύ τα 20W, σύμφωνα με τους συγγραφείς η θέρμανση στην περιοχή σύνδεσης πρέπει να είναι ελεγχόμενη ώστε η θερμοκρασία να παραμένει στη ζώνη μεταξύ της θερμοκρασίας τήξης και θερμικής αποσύνθεσης του πολυμερούς. Η σύνδεση που αναπτύσσεται επηρεάζεται από πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η σύνδεση είναι αποτέλεσμα της μηχανικής πρόσφυσης και των χημικών δεσμών που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια των υλικών, ενώ εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών παραμέτρων όπως είναι η ισχύς του laser, η ταχύτητα σάρωσης, η συχνότητα και η διάρκεια των παλμών, η γεωμετρία της δέσμης καθώς και οι θερμικές ιδιότητες των υλικών.



Εικόνα 26 Σχηματική αναπαράσταση του laser transmission welding [35]

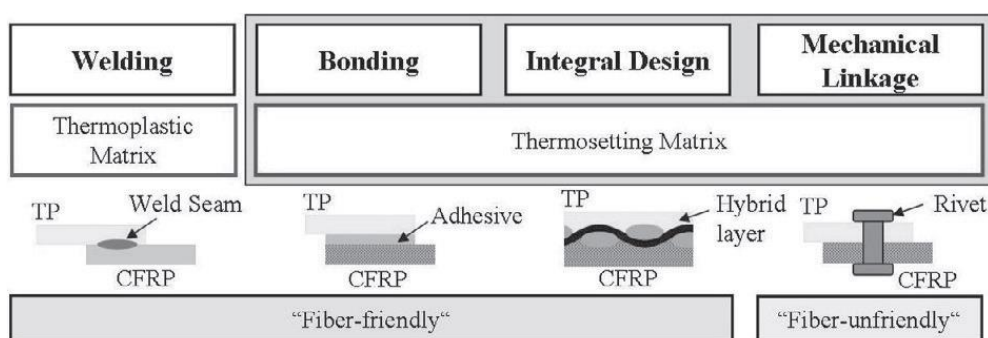
Pulse Duration τ [ns]	Pulse repetition frequency f [kHz]	Average Power P [W]	Welding Speed v [mm/s]
200	20	5	0.25
		10	0.25; 0.75; 1.33
		15	0.25; 0.75; 1.33; 2.00; 2.50; 3.00; 3.50
	20	20	0.25; 0.75; 1.33; 2.00; 2.50; 3.00; 3.50

Πίνακας 1 Τιμές των παραμέτρων της πειραματικής διαδικασίας. [35]

Κατά τη πειραματική διεύρυνση των παραμέτρων συγκόλλησης οι ερευνητές διατήρησαν σταθερές την συχνότητα και τη διάρκεια των παλμών καθώς και την διάμετρο του σημείου εστίασης της δέσμης (800 μm) πάνω στο αλουμίνιο, ενώ μετέβαλαν τη μέση ισχύ και την ταχύτητα σάρωσης της δέσμης. Οι σύνδεσμοι που αναπτυχθήκαν για κάθε συνδυασμό παραμέτρων χαρακτηρίστηκαν μηχανικά ως προς την αντοχή τους μέσω δοκιμής εφελκυσμού.

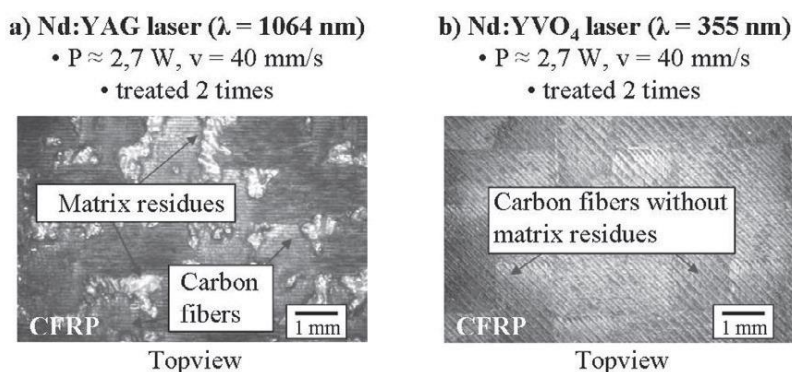
4.1.2 Συγκόλληση Συνθέτων Με Θερμοσκληρυνόμενη Μήτρα

Όπως προαναφέρθηκε, τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά με την παροχή θερμότητας δεν τήκονται, γεγονός που δεν επιτρέπει την συγκόλληση αυτών με θερμικές κατεργασίες. Ανόμοια πλαστικά όπως για παράδειγμα θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα μπορούν να συγκολληθούν μεταξύ τους με κόλλα ωστόσο τα μείζονα μειονεκτήματα της μεθόδου όπως είναι η περίπλοκη κατεργασία/ προετοιμασία των επιφανειών, ο χρόνος σκλήρυνσης της κόλλας κτλ. συμβάλλουν στην ανάπτυξη άλλων μεθόδων σύνδεσης τέτοιων υλικών.



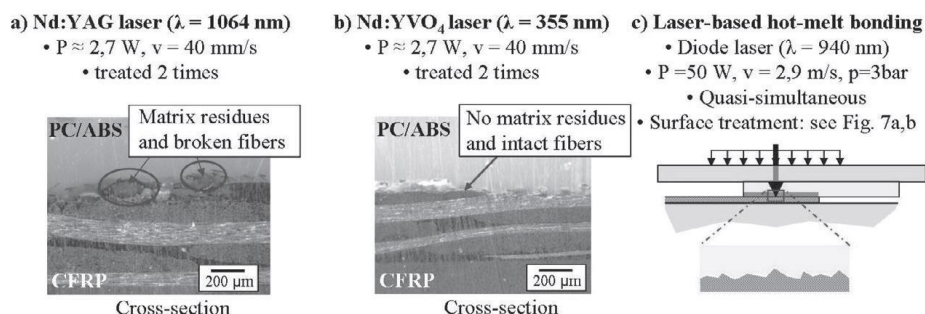
Εικόνα 27 Διαθέσιμες μέθοδοι σύνδεσης CFRP και θερμοπλαστικού [17].

Στη δημοσίευση *‘Experimental Studies on Laser-based Hot-melt Bonding of thermosetting Composites and Thermoplastics’* [17] σύνθετο υλικό CFRP θερμοσκληρυνόμενης μήτρας συγκολλάται με θερμοπλαστικό. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθείται στις συγκολλήσεις με μετάδοση (Transmission Laser Welding) και απαιτεί ένα θερμοπλαστικό υλικό το οποίο επιτρέπει την μετάδοση της ακτινοβολίας. Η δέσμη laser προσπίπτει στο κατώτερο τμήμα του συνδέσμου, δηλαδή το CFRP, και απορροφάται από τις ίνες του με συνέπεια την θέρμανση του. Μέρος της θερμικής ενέργειας έπειτα μεταφέρεται μέσω αγωγής στο πάνω τμήμα, το θερμοπλαστικό, και το τήκει (η θερμοσκληρυνόμενη μήτρα του CFRP δεν λιώνει). Αναγκαίο θεωρείται, όπως λέγεται στο άρθρο, να έχει προηγηθεί επιφανειακή κατεργασία (treatment) του CFRP ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια διαβροχής και να εκτεθούν οι ίνες του. Η κατεργασία αυτή (ablation) πραγματοποιείται συγκριτικά με Laser εκπομπής 1064 nm (Nd:YAG) και 355 nm (Nd:YVO₄). Η σταθερά απορρόφησης της ρητίνης στα 355 nm είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν στα 1064 nm αυξάνοντας έτσι την απορροφούμενη ενέργεια από την δέσμη. Η κατεργασία της επιφάνειας σε αυτή τη περίπτωση οφείλεται στη διάρρηξη των χημικών δεσμών της ρητίνης δίνοντας πολύ καλύτερα αποτέλεσμα χωρίς να καταστρέφονται οι ίνες.

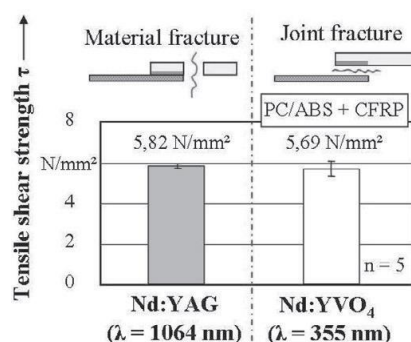


Εικόνα 28 α) Top view of IR laser-treated ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) CFRP, (b) Top view of UV laser-treated ($\lambda = 355 \text{ nm}$) CFRP [17].

Το ρευστό θερμοπλαστικό λειτουργεί ως συγκολλητική ουσία, διαβρέχει τις ίνες και εξασφαλίζεται έτσι η μηχανική πρόσφυση των δυο τμημάτων μόλις στερεοποιηθεί ξανά. Τα αποτελέσματα της ερευνάς δείχνουν πως η αντοχή σε εφελκυσμό του συνδέσμου (lap joint) και κατ' επέκταση της διάτμησης στη συγκόλληση (PC/ABS – *Thermoset Composite*) είναι σχεδόν ίδια για τις δυο περιπτώσεις επιφανειακής κατεργασίας, ωστόσο αλλάζει η μορφή αστοχίας του συνδέσμου. Στην επιφανειακή κατεργασία με UV(355 nm) ο σύνδεσμος αστοχεί στη συγκόλληση ενώ στην IR (1064 nm) δεν αστοχεί η συγκόλληση αλλά το υλικό (PC/ABS).



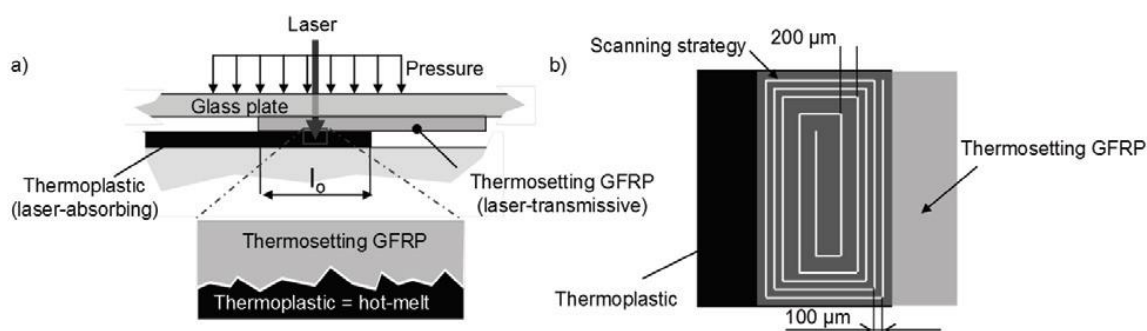
Εικόνα 29 (α) Μικρογραφία της τομής του συνδέσμου (PC/ABS - CFRP, IR laser-treated), (b) Μικρογραφία της τομής του συνδέσμου (PC/ABS + CFRP, UV laser-treated); (c) Παράμετροι της θερμικής μεθόδου συγκόλλησης βασισμένη σε laser [17].



Εικόνα 30 Διαμήκη αντοχή σε εφελκυσμό των συνδέσμων που προετοιμάστηκαν με χρήση laser IR και UV (PC/ABS + CFRP) [17].

Στην εικόνα 30 φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού των συνδέσμων, όπου η μέγιστη μέση αντοχή είναι 5,82 MPa για επιφανειακή κατεργασία στα 1064 nm. Οι συγκολλήσεις όλες έγιναν με laser τύπου Diode μήκους κύματος 940 nm και ισχύς 50 Watt (συνεχής λειτουργία), οι επιπλέον παράμετροι του laser φαίνονται στο σχήμα c της εικόνας 29.

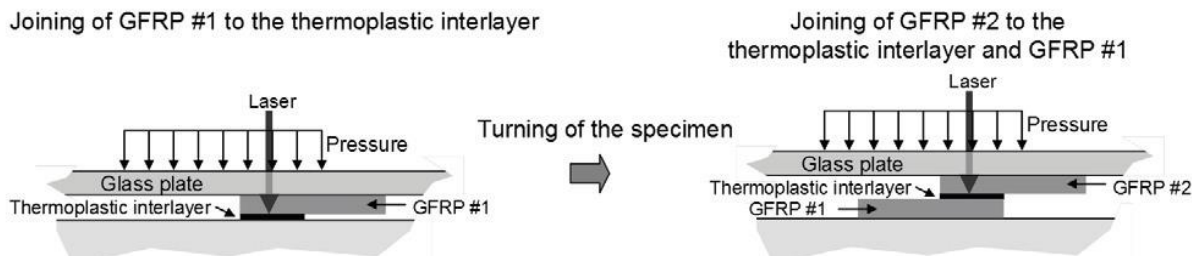
Σε συνέχεια της προηγούμενης δημοσίευσης, στο άρθρο του ίδιου συγγραφέα με τίτλο *'Laser-Based Hot-Melt Bonding of Thermosetting GFRP'* [18] μελετάται μια παραλλαγή συγκόλλησης παρομοίου τύπου συνδέσμου με προηγούμενως. Η συγκόλληση αφορά σε σύνθετο υλικό θερμοσκληρυνόμενης μήτρας ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFRP), με τη χρήση ενδιάμεσου φύλλου θερμοπλαστικού που δρα ως συγκολλητική ουσία (hot-melt adhesive). Στο θερμοπλαστικό (πολυκαρβονικό (PC) και πολυαμίδιο (PA) περιέχεται ποσότητα σωματιδίων άνθρακα ώστε να αυξηθεί ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας. Η διάταξη του συνδέσμου είναι τύπου επικάλυψης και αποτελείται από το GFRP στο επάνω μέρος και το θερμοπλαστικό στο κάτω. Η τεχνική συγκόλλησης είναι όμοια με πριν (ψευδοταυτόχρονη συγκόλληση), δέσμη laser διαδίδεται μέσω του GFRP και απορροφάται από το θερμοπλαστικό, ακολουθεί η τήξη του τελευταίου και η διαβροχή της επιφάνειας του συνθέτου υλικού. Το laser που χρησιμοποιείται είναι τύπου ημιαγωγών (Diode) συνεχούς εκπομπής σε μήκος κύματος $\lambda = 940$ nm και μέγιστης ισχύος 50 Watt, η επιφάνεια επικάλυψης σαρώνεται 10 με 20 φορές με ταχύτητες από 650 mm/s έως 1500 mm/s.



Εικόνα 31 Σύνδεση GFRP Θερμοσκληρυνόμενης μήτρας σε θερμοπλαστικά υλικά με χρήση θερμικής μεθόδου τήξης βασισμένη σε laser: (a) Τομή, (b) Κάτοψη [18].

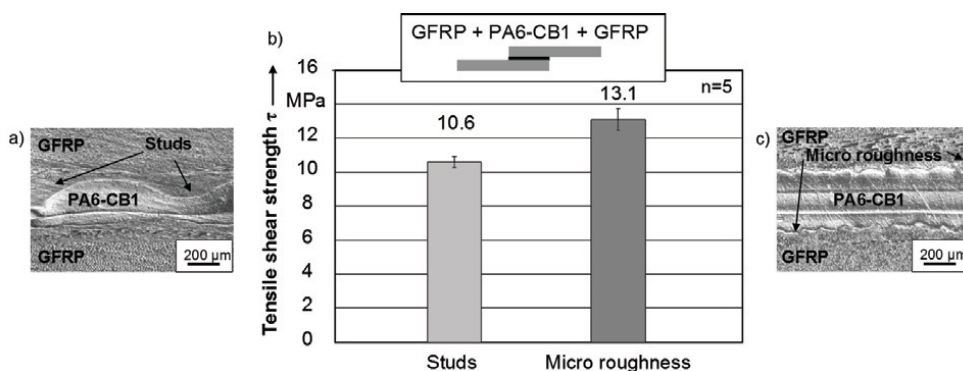
Η επιφανειακή κατεργασία του συνθέτου εδώ παραλείπεται καθώς έχει ήδη προηγηθεί κατά την κατασκευή του. Τα δοκίμια από GFRP κατασκευάστηκαν με συγκεκριμένη επιφανειακή μικρο-τραχύτητα.

Τέλος, το θερμοπλαστικό χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσο συγκολλητικό στρώμα (interlayer) για την σύνδεση δυο τμημάτων συνθέτου GFRP, η ροή των διαδικασιών φαίνεται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 32 Θερμική μέθοδος τήξης και σύνδεσης δυο GFRP θερμοσκληρυνόμενης μήτρας παρεμβάλλοντας ενδιάμεση στρώση θερμοπλαστικού [18].

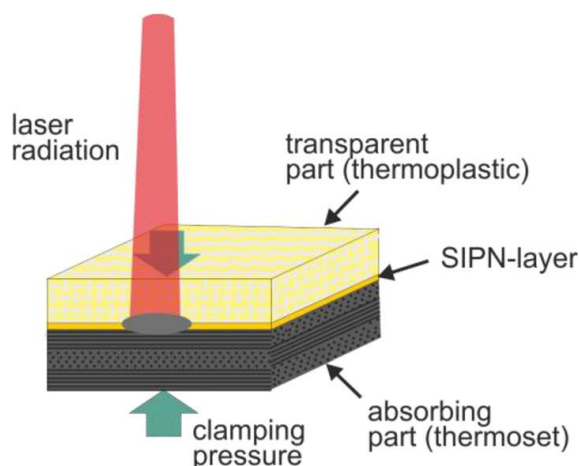
Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό του συνδέσμου βρέθηκε 13.1 MPa μέσω πειραματικής διαδικασίας. Το θερμοπλαστικό που χρησιμοποιήθηκε ως 'κόλλα' ήταν το PA6 με περιεκτικότητα 2% κατά βάρος σε σωματίδια άνθρακα. Στην εικόνα 29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος εφελκυσμού (διάτμηση στην συγκόλληση), η αντοχή για την ειδικά διαμορφωμένη τραχεία επιφάνεια (micro-roughness) του GFRP είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την 'κυματιστή' επιφάνεια. Αυτό ίσως οφείλεται στην μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια διάβροχης που παρέχει η τραχεία επιφάνεια.



Εικόνα 33 (a) Μικρογραφία της τομής ενός συνδέσμου GFRP GFRP με κυματώσεις στην επιφάνεια; (b) Διαμήκη αντοχή σε εφελκυσμό των συνδέσμων με τραχεία επιφάνεια [18].

Οι Verena Wippo et al. στο άρθρο 'Laser transmission welding of semi-interpenetrating polymer networks-composites' [19] προτείνουν τη χρήση στρώσης ημιδιαπλεκόμενου πολυμερικού δικτύου (semi-interpenetrating polymer network, **SIPN**) στην επιφάνεια του θερμοσκληρυνόμενου υλικού προκειμένου να μπορεί να συγκολληθεί με θερμοπλαστικό υλικό. Το SIPN αποτελείται από καθαρό πολυαιθεριμίδιο (PEI) και πολυαιθεριμίδιο με

προσθήκη άνθρακα (carbon black). Οι στρώσεις SIPN δημιουργήθηκαν σε θερμοσκληρυνόμενη μήτρα ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Το δεύτερο υλικό που θα συγκολληθεί είναι σύνθετο θερμοπλαστικής μήτρας ενισχυμένης με ίνες γυαλιού και μήτρας PEI προκειμένου να είναι συμβατή με τη στρώση SIPN του θερμοσκληρυνόμενου. Η συγκόλληση μετάδοσης (LTW) πραγματοποιήθηκε με laser ημιαγωγών, μήκους κύματος $\lambda=940\text{ nm}$ και μέγιστης ισχύος $P=300\text{ W}$ (συνεχής εκπομπή).



Εικόνα 34 Συγκόλληση μετάδοσης με χρήση SIPN [19].

Για την πειραματική διερεύνηση της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά SIPN-σύνθετα ώστε να μελετηθεί η επίδραση της κάθε διαφορετικής στρώσης SIPN στη διαδικασία. Οι στρώσεις και τα πάχη της κάθε μιας δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

LTW type	Short name	Reinforcement/additive	SIPN-layer thickness
LT	GF-PEI	Glass fabric	
LA	SIPN-A	Carbon noncrimp fabric	200 μm
LA	SIPN-B	Carbon noncrimp fabric	125 μm
LA	SIPN c.b.	Carbon noncrimp fabric carbon black	80 μm

Πίνακας 2 Κατηγορίες και ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για SIPN [19].

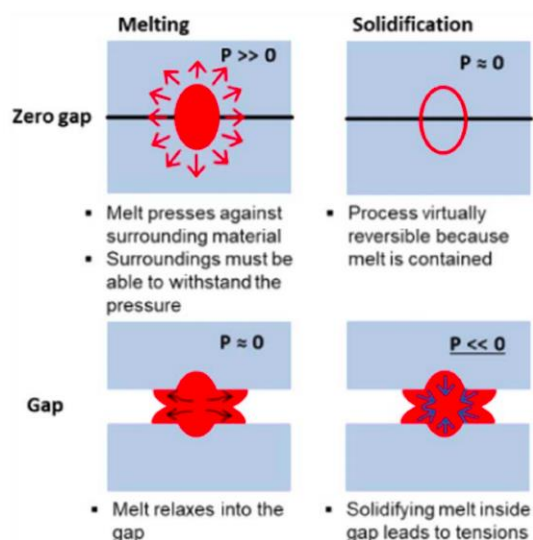
Καταλήγοντας στα αποτελέσματα αυτού του άρθρου φαίνεται πως ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζει ο προσανατολισμός των ινών στη διεπιφάνεια όπου ακτινοβολείται από τη δέσμη καθώς και το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης, στη θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Προκειμένου η συγκόλληση να είναι εφικτή με τη μέθοδο LTW και να έχει υψηλή αντοχή, απορροφητικά πρόσθετα (άνθρακας) θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στη σύσταση της ενδιάμεσης στρώσης.

4.2 Γυαλιά

Η συγκόλληση Laser διαφανών υλικών, όπως το γυαλί, έχει μελετηθεί τα τελευταία χρόνια με τη χρήση συνεχών και παλμικών συστημάτων υπερβραχέως παλμού (UltraShort Pulse). Κατά τη μελέτη των διαφόρων οπτικών φαινομένων, όταν η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μικρή, η απόκριση και γενικά οι επιμέρους οπτικές ιδιότητες/παράμετροι των υλικών (π.χ. ο δείκτης διάθλασης, ο συντελεστής απορρόφησης) παραμένουν σταθερές και ανεξάρτητες από την ένταση. Όταν όμως η ένταση της ακτινοβολίας είναι μεγάλη, όπως λ.χ. συμβαίνει στην περίπτωση των lasers, και ειδικότερα των εστιασμένων δεσμών laser μεγάλης ισχύος, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η οπτική απόκριση της ύλης και οι οπτικές παράμετροι τροποποιούνται, συχνά σημαντικά, και γίνονται εξαρτώμενες από την ένταση της ακτινοβολίας [9]. Η μη-γραμμική οπτική συμπεριφορά γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ενέργεια και η συχνότητα επανάληψης των παλμών (repetition rate) laser. Έτσι, συστήματα υπερβραχέων παλμών χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τη τοπική τήξη της διεπιφάνειας συγκόλλησης δυο διαφανών υλικών [20].

Προκειμένου η απόκριση του υλικού να περάσει στη μη γραμμική περιοχή η δέσμη θα πρέπει να είναι εστιασμένη με ακρίβεια σε ένα μικρό όγκο του υλικού και η ένταση της ακτινοβολίας να ξεπεράσει το κατώφλι της οπτικής διηλεκτρικής κατάρρευσης ($10^{12} \text{ W/cm}^2 \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$) [21]. Τα δυο συνδεόμενα υλικά θα πρέπει να έρθουν σε πολύ καλή επαφή μεταξύ τους ώστε να βρίσκονται εντός του ενεργού βάθους πεδίου (effective focal depth) της δέσμης και να μπορούν να συγκρατήσουν το πλάσμα εντός της κοιλότητας που θα δημιουργηθεί στην περιοχή της διεπιφάνειας. Χαλαρή επαφή μεταξύ των δυο υλικών αφήνει χώρο για τη διαρροή του πλάσματος και συνεπώς της αφαίρεσης υλικού (ablation) χωρίς να επιτυγχάνεται εναπόθεση σωματιδίων του ενός υλικού στο άλλο [22].

Στη περίπτωση όπου ένα από τα δυο υλικά δεν είναι διαφανές, όπως συμβαίνει δηλαδή για στους συνδέσμους γυαλιού – μετάλλου, η χρήση υπερβραχέων παλμών μπορεί να μην είναι απαραίτητη. Αιτία αυτού είναι η γραμμική απορρόφηση της δέσμης που συμβαίνει στην επιφάνεια του μετάλλου και η κατά συνέπεια μεταφορά της θερμότητας μέσω αγωγής στο γυαλί και τοπική τήξη των υλικών. Παρόλα αυτά οι υπερβραχείς παλμοί δύνανται να οδηγήσουν το γυαλί, ταυτόχρονα με το μέταλλο, σε τήξη εξαιτίας της μη-γραμμικής απορρόφησης, αποτρέποντας ανεπιθύμητα θερμικά φαινόμενα [23].

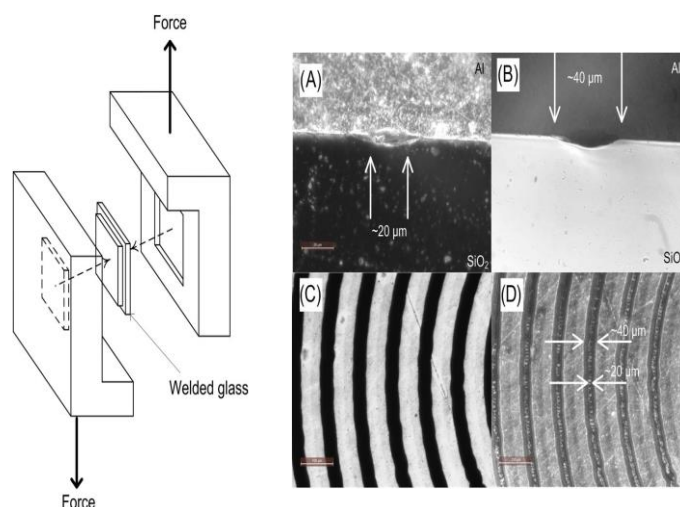


Εικόνα 35 Σύγκριση μεταξύ συγκόλλησης χωρίς κενό στη διεπιφάνεια και με κενό [23].

Συγκόλληση γυαλιού -μετάλλου/πλαστικού

Στο άρθρο ‘Picosecond laser welding of similar and dissimilar materials’ [22] μελετάται η συγκόλληση διαφορετικών τύπων γυαλιών με ανόμοιας φύσης υλικών όπως μέταλλα. Το σύστημα Laser που χρησιμοποιούν εκπέμπει στα 1030 nm με διάρκεια παλμών 7.12 picosecond και συχνότητα 400 kHz. Η μόνη μεταβλητή μεταξύ διαφορετικών υλικών είναι η μέση ισχύς (κατανομή Gauss). Τα μέταλλα έχουν υποστεί στίλβωση ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή επαφή με το γυαλί, τα δυο υλικά επιπροσθέτως διατηρούνται, με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης, ακίνητα και υπό πίεση.

Για τη δομική αντοχής των δειγμάτων γυαλί - γυαλί χρησιμοποιήθηκε μια απλή διάταξη διάτμησης των συγκολλημένων δοκιμίων.



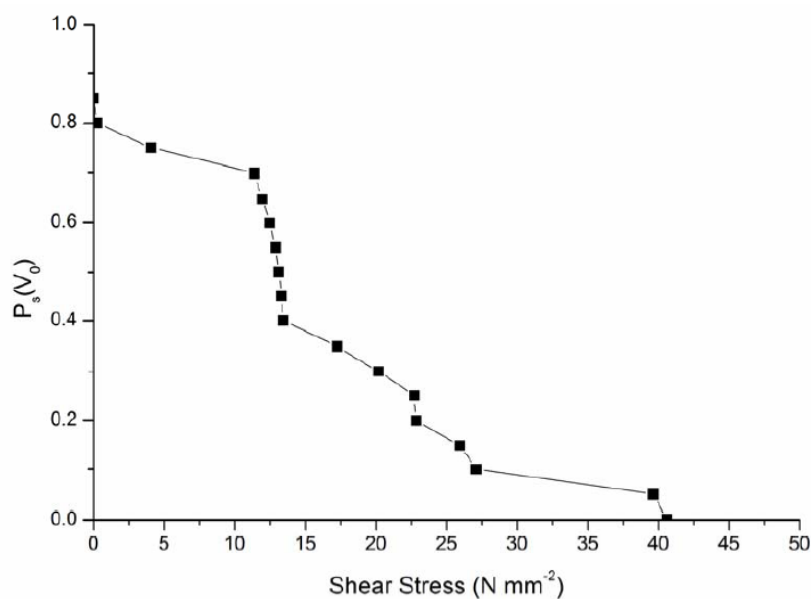
Εικόνα 36 Η διάταξη διάτμησης των δοκιμίων και φωτογραφίες στην περιοχή συγκόλληση Al-SiO₂ από μικροσκόπιο [22].

Όπως αναφέρεται, η αστοχία του γυαλιού είναι ψαθυρή και εξαρτάται από την κατανομή των ατελειών εντός του όγκου του. Η περίπλοκη ανάλυση αστοχίας του γυαλιού εξετάζεται στατιστικά με τη χρήση της κατανομής Weibull για είκοσι δείγματα δοκιμίων που έχουν προκύψει από τις ακριβώς ίδιες συνθήκες κατεργασίας. Οι μετρήσεις των πειραμάτων διάτμησης της συγκόλλησης αναμένεται να είναι ίδιες, σύμφωνα με τους συγγραφείς Carter *et al.*, και για τους συνδέσμους ανόμοιων υλικών καθώς η αστοχία εμφανίζεται στον όγκο του γυαλιού. Η συνάρτηση πιθανότητας επιβίωσης (να μην αστοχήσει) είναι η ακόλουθη :

$$P_s(V_0) = \text{Exp}\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (2)$$

Με P_s την πιθανότητα επιβίωσης για μια δοθείσα παράμετρο σ , σ_0 η παραμόρφωση για $1/e$ επιβιωσιμότητα, και m το μέτρο Weibull.

Σε συνέχεια του προηγούμενου άρθρου των Carter *et al.* στη δημοσίευση ‘*Picosecond laser welding of optical to metal components*’ [24] διατυπώνεται πως η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται με ένα συνδυασμό γραμμικών και μη γραμμικών διαδικασιών αναλόγως του υλικού δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ‘τοποθέτησης’ του επιπέδου απορρόφησης για διαφανή υλικά όπως το γυαλί εντός του όγκου ή πολύ κοντά στη διεπιφάνεια συγκόλλησης. Το πλάσμα μέσω αγωγής της θερμότητας και σε συνδυασμό με την μεγάλη συχνότητα των παλμών δημιουργεί μια κοιλότητα τήγματος στην οποία το πλάσμα από κάθε υλικό αναμειγνύεται και αφού ψυχθεί και στερεοποιηθεί δημιουργεί την συγκόλληση. Επίσης παρατηρείται η σημαντικότητα της σωστής τοποθέτησης του επιπέδου εστίασης της δέσμης στη διεπιφάνεια συγκόλλησης, ειδικά για τα διαφανή υλικά. Στους συνδέσμους γυαλιού – μετάλλου για παλμούς 5,9 picosecond στα 1030 nm, και συχνότητα 400kHz η διαδικασία απορρόφησης στην επιφάνεια του μετάλλου είναι γραμμική ενώ στον όγκο του γυαλιού (κοντά στη διεπιφάνεια) μη-γραμμική. Στην αναφορά [24] προβάλλεται ένα πλήθος συνδυασμών γυαλιού - μετάλλου ικανών να συγκολληθούν με αυτή τη μέθοδο (αλουμίνιο/χαλκός/χάλυβας/οξείδιο του πυριτίου – SiO₂/Βοριοπυριτικό γυαλί /Sapphire) με ενέργεια παλμών από 2.5 έως 25 μJ. Παρατίθενται τα δημοσιευμένα αποτελέσματα της αναφοράς [24].

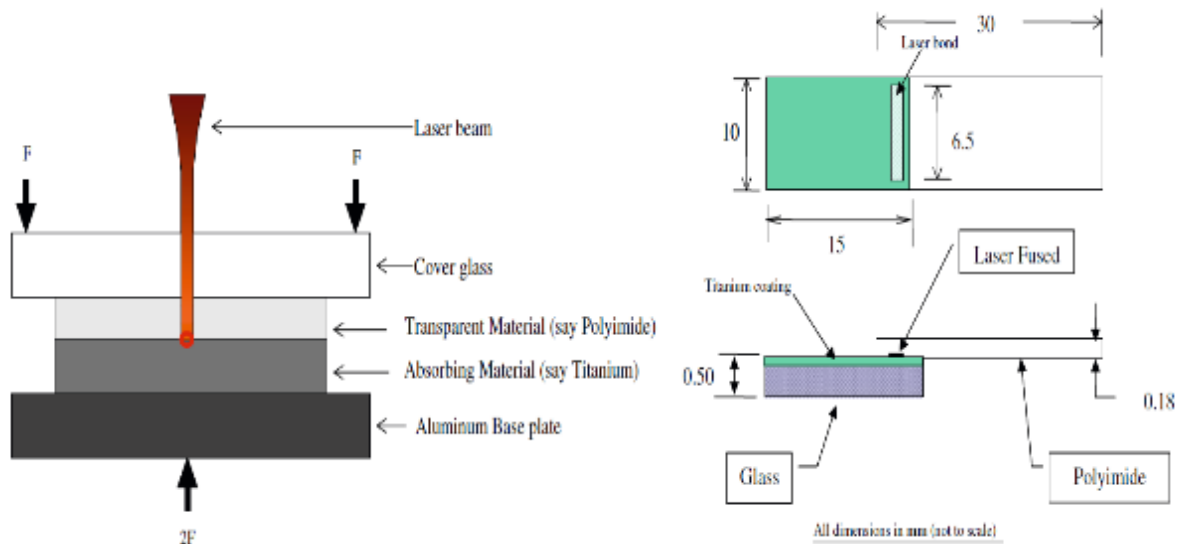


Διάγραμμα 2 Διάγραμμα Weibull της πιθανότητας επιβίωσης ενός BK7-Al:6082 με διάμετρο συγκόλλησης 2.5 mm και μη βελτιστοποιημένη συγκόλληση[24].

Όπως περιγράφεται στο άρθρο ‘Laser welding of glasses using a nanosecond pulsed Nd:YAG laser’ [20] η συγκόλληση μεταξύ γυαλιών βορίου-πυριτίου με παλμούς nanosecond είναι εφικτή. Οι παλμοί nanosecond θεωρούνται βραχείς και όχι υπερβραχείς. Η αγωγή της θερμότητας εντός του στερεού για παλμούς nanosecond είναι σημαντική σε σχέση με τους υπερβραχείς παλμούς όπου η ενέργεια μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια στο πλέγμα πολύ πιο γρήγορα σε σύγκριση με το ρυθμό διάχυσης της θερμότητας στο πλέγμα. Οι παλμοί διάρκειας nanosecond αλληλοεπιδρούν με το πλάσμα που δημιουργείται προκαλώντας αφαίρεση υλικού με απόβλητα σε υγρή κατάσταση. Οι συγγραφείς Pablos-Martín και Th. Höche παραθέτουν τις παραμέτρους συγκόλλησης καθώς και το σύστημα laser που χρησιμοποιήθηκε για τους συνδέσμους γυαλί - γυαλί και γυαλί - γυαλί με ενδιάμεσο στρώμα τιτανίου. Το τιτάνιο δρα ως απορροφητική επιφάνεια της ακτινοβολίας στην διεπιφάνεια σύνδεσης καθώς επίσης βελτιώνει την ποιότητα της διεπιφάνειας συγκόλλησης.

Σε μελέτη που παρουσιάζεται στο άρθρο με τίτλο ‘Mechanical characterization of glass/polyimide microjoints fabricated using cw fiber and diode lasers’ [25] διερευνάται η μηχανική αντοχή συνδέσμων επικάλυψης (lap joints) μεταξύ γυαλιού επικαλυμμένου με τιτάνιο και πολυαμίδιου κατασκευασμένους με δυο διαφορετικά συνεχή σύστημα laser. Η εναπόθεση της μεμβράνης τιτανίου πάχους 0.2 μm έγινε με τη μέθοδο της φυσικής επικάλυψης ατμών (PVD), η επιφάνεια του τιτανίου όπως λέγεται επιλέχθηκε λόγω της προ-υπάρχουσας

γνώσης σχετικά με τους χημικούς δεσμούς που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια κατά τη συγκόλληση laser τιτανίου – πολυαμιδίου. Επιπροσθέτως, η επιφάνεια τιτανίου δρα ως απορροφητικό μέσο για την ακτινοβολία laser.



Εικόνα 37 Η πειραματική διάταξη συγκόλλησης και η γεωμετρία του συνδέσμου [25].

Τα πειράματα εφελκυσμού του συνδέσμου στην αναφορά απέδωσαν αντοχή 7.34 N/mm^2 για το fiber laser και 6.19 N/mm^2 για το diode laser. Η ισχύς ήταν 3.0 Watt και 1.0 Watt για κάθε laser αντίστοιχα, ενώ κατ' ακολουθία η εκπομπή ήταν συνεχής στα $0.8 \mu\text{m}$ και $1.1 \mu\text{m}$ με ταχύτητα σάρωσης 100 mm/min .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V: ΥΛΙΚΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας της εν λόγω Διπλωματικής Εργασίας μελετήθηκε η ανάπτυξη συνδέσμων επικάλυψης (Overlap Joints) μεταξύ υλικών διαφορετικής φύσης, όπως είναι τα γυαλιά, τα μέταλλα και τα πολυμερή, με τη χρήση εξ ολοκλήρου της τεχνολογίας Laser. Επίσης πραγματοποιήθηκε μηχανικός χαρακτηρισμός των συνδέσμων μέσω δοκιμής διάτμησης, η παρατήρηση τους μέσω οπτικού μικροσκοπίου, και η σύγκριση τους με αντίστοιχους συνδέσμους κόλλας δυο συστατικών. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες του πειράματος ήταν γυαλί τύπου Extra Clear Glass, δυο διαφορετικά κράματα αλουμινίου και θερμοπλαστικό (PLA) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μήτρα συνθέτου υλικού.

5.1 Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο (Αργίλιο) είναι ένα από τα σημαντικότερα μέταλλα στη σύγχρονη εποχή με τη χρήση του στη βιομηχανία να είναι εκτεταμένη. Πρόκειται για ένα πλήρως ανακυκλώσιμο υλικό συμβάλλοντας έτσι θετικά στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η βασική πηγή για τη βιομηχανική χρήση του αλουμινίου είναι ο βοξίτης, ένα ιζηματογενές πέτρωμα, μίγμα μεταλλικών οξειδίων. Μέσω της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης παράγεται το πρωτόχυτο αλουμίνιο ενώ με επανάτξη του scrap αλουμινίου παράγεται το δευτερόχυτο όπως ονομάζεται αλουμίνιο. Οι ανάγκες για αλουμίνιο ετησίως είναι περίπου 29 εκατομμύρια τόνοι όπου οι 22 από αυτούς είναι πρωτόχυτο και οι 7 ανακυκλωμένο δευτερόχυτο αλουμίνιο. Οι ιδιότητες που κάνουν το αλουμίνιο ιδιαίτερο για την βιομηχανία είναι η εξαιρετική αντοχή του στη διάβρωση, η πολύ καλή αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις και το χαμηλό ειδικό βάρος, επίσης παρουσιάζει πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά όλκιμο και μαλακό. Με την προσθήκη κραμάτων βελτιώνονται σημαντικά οι μηχανικές του ιδιότητες.

ΚΡΑΜΑ 6063

Τα κράματα της σειράς 6000 έχουν ως βασικά στοιχεία το πυρίτιο και το μαγνήσιο. Χρησιμοποιούνται κατά κόρων στη παραγωγή προφίλ μέσω της διέλασης γεγονός που τα καθιστά την πρώτη επιλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου απαιτείται μεγάλη αντοχή. Το κράμα 6063 είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή της

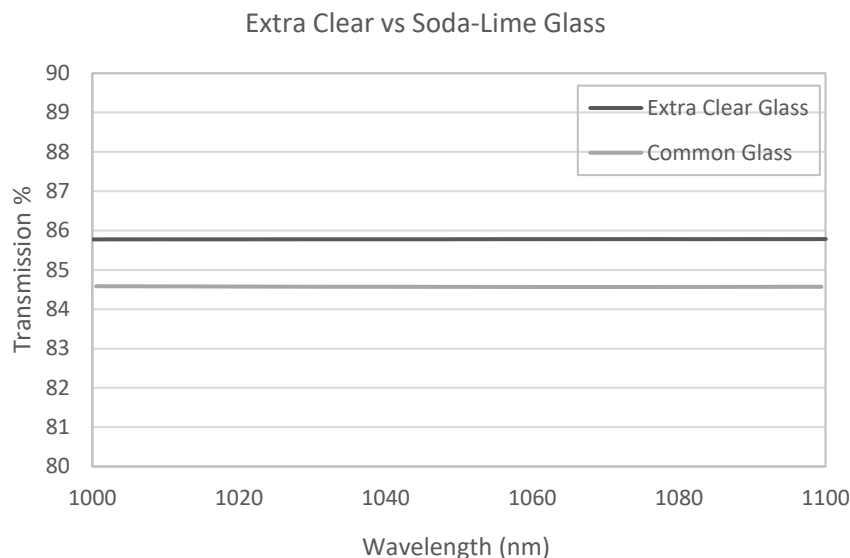
γέφυρας Foresmo στη Νορβηγία ενώ επίσης έχει επιλεγεί από την αυτοκινητοβιομηχανία της Audi ως κράμα για τα πλαίσια των αυτοκινήτων της. Παρουσιάζει πολύ καλή συγκολλησιμότητα και κατεργασιμότητα.

ΑΛΟΥΜΙΝΟΧΑΡΤΟ

Το αλουμινόχαρτο παράγεται με την μέθοδο της έλασης (rolling) πλακών αλουμινίου οι οποίες έχουν χυτευθεί από λιωμένο αλουμίνιο. Στη συνέχεια τυλίγεται σε ρολό και πραγματοποιείται ψυχρή έλαση μέχρι το επιθυμητό πάχος και τέλος ανόπτηση. Για πάχη μικρότερα από 0.025 mm, δυο στρώματα τοποθετούνται μαζί κατά το τελικό στάδιο της έλασης με αποτέλεσμα όταν διαχωριστούν οι επιφάνειες που ήταν σε επαφή μεταξύ τους να παράγονται φύλλα με 'ματ' όψη ενώ οι εξωτερικές επιφάνειες που ήρθαν σε επαφή με τους κυλίνδρους να είναι γυαλιστερές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες είναι η αντοχή σε εφελκυσμό, το όριο διαρροής και η παραμόρφωση θραύσης οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από το κράμα που χρησιμοποιείται. Τα συνηθέστερα εξ αυτών που βρίσκουν εφαρμογές ως μεμβράνες συσκευασίας τροφίμων είναι τα 1235, 1145, 8011.

5.2 Γυαλί

Το γυαλί σαν υλικό είναι άμορφο υλικό χωρίς κρυσταλλική δομή, και παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά. Το κοινό γυαλί (soda-lime-glass) αποτελεί το 90% του ποσοστού των γυαλιών που παράγονται. Τα βασικά συστατικά του γυαλιού προέρχονται από την εξόρυξη φυσικών πόρων. Οι πλειοψηφία αυτών, ειδικά η χαλαζιακή άμμος (SiO_2) η οποία είναι και το βασικό συστατικό, περιέχει ένα σημαντικό ποσοστό σιδηρού. Η ύπαρξη του σιδήρου στη σύσταση του κοινού γυαλιού οδηγεί σε απορρόφηση στο φάσμα της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας ενώ για μήκη κύματος κοντά στα 1100nm η απορρόφηση γίνεται πολύ έντονη μειώνοντας την διάδοση του φωτός πάνω από 12%. Η απορρόφηση της δέσμης Laser στον όγκο του υλικού λόγω της ύπαρξης σιδήρου στη σύσταση του είναι ανεπιθύμητη και για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο με την εμπορική ονομασία 'Extra Clear Glass'.



Διάγραμμα 3 Το ποσοστό διάδοσης του φωτός συναρτήσει του μήκους κύματος για Extra Clear και Soda Lime Glass.

Η περιεκτικότητα σε σίδηρο στο κοινό γυαλί (Soda Lime Glass) είναι κατά μέσο όρο για την Ευρώπη 800 ppm με διαφάνεια κοντά στο 84% ενώ για το Extra Clear Glass 100 ppm με την διαφάνεια να ανέρχεται στα 91% με δοκίμιο αναφοράς πάχους 4mm [29]. Στο διάγραμμα 3 απεικονίζεται η ποσοστιαία διάδοση του φωτός συναρτήσει του μήκους κύματος στην περιοχή ενδιαφέροντος (1000 – 1100 nm) για τους δυο τύπους γυαλιού, σε δείγματα πάχους 3 mm. Η αυξημένη διαφάνεια του γυαλιού με μικρότερη περιεκτικότητα σε σίδηρο επιβεβαιώνεται και πειραματικά με τη χρήση του φασματοφωτόμετρου ωστόσο η διαφορά δεν είναι τόσο μεγάλη όσο αναφέρεται στη βιβλιογραφία. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται σε τυχόν απομένουσες ακαθαρσίες στο δοκίμιο του Extra Clear.



Εικόνα 38 Soda Lime vs Extra Clear Glass.

5.3 Θερμοπλαστικό Πολυμερές (Πολυγαλακτικό Οξύ)

Η επιλογή του θερμοπλαστικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των συνδέσμων έγινε με βάση την δυνατότητα κατεργασίας του θερμοπλαστικού υλικού για την διαμόρφωση των προς συγκόλληση τμημάτων, την ικανότητα του να αποτελέσει υλικό μήτρας σε σύνθετα υλικά, τις θερμικές του ιδιότητες και τη συμπεριφορά του κατά την ακτινοβολήση στο μήκος κύματος της δέσμης Laser. Το υλικό που επελέγη είναι το **Πολυγαλακτικό Οξύ (PLA)**.

Το PLA ή πολυγαλακτικό οξύ (θερμοπλαστικός πολυεστέρας) είναι το πιο δημοφιλές βιοπλαστικό ή βιοπολυμερές και το μόνο που παράγεται αυτή τη στιγμή σε παγκόσμιας κλίμακας εργοστάσιο. Το 2010, το PLA είχε το δεύτερο υψηλότερο όγκο κατανάλωσης όλων των βιοπλαστικών στον κόσμο. Παρασκευάζεται από φυτικής προέλευσης υλικά όπως το άμυλο καλαμποκιού (στις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά), ρίζες ταπιόκα σε φλούδες (στην Ασία), ή το ζαχαροκάλαμο (στον υπόλοιπο κόσμο) [30]. Το PLA είναι κατάλληλο για χρήση ως νήμα (filament) τρισδιάστατης εκτύπωσης (3d printing) καθώς παρουσιάζει σχετικά χαμηλό σημείο τήξης και υαλώδους μετάβασης, είναι οικονομικό, δεν είναι τοξικό και οι ατμοί που εκλύονται κατά την τήξη είναι άοσμοι και μη επιβλαβείς. Ωστόσο εμφανίζει έντονο ψαθυρό χαρακτήρα και σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με αλλά θερμοπλαστικά με βάση το πετρέλαιο. Στο υλικό του νήματος εκτός του κυρίαρχου συστατικού που είναι το PLA εισάγονται και αλλά πρόσθετα μεταβάλλοντας της ιδιότητες του υλικού όπως για παράδειγμα το χρώμα ή και ενισχύοντας τις μηχανικές του ιδιότητες με την προσθήκη εγκλεισμάτων (Carbon Fiber Filaments) [36]. Τα πλακίδια από υλικό PLA καθώς και οποιαδήποτε άλλη πλαστική κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος εκτυπώθηκαν με τη χρήση του τρισδιάστατου εκτυπωτή *Ender 3 Pro (Creality 3D Technology Co.)* τεχνολογίας FDM. Το νήμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν της σειράς *PrimaValue (PrimaCreator, Kantyxeatan 25 F, 213 76 Malmö, SWEDEN)* με διάμετρο 1,75 mm.

Material	Density (g/cm ³)	Coefficient of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /K)	Melting Point (C°)	Thermal conductivity (W/ (m K)	Young's modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
Aluminum	2,70	23.5	600	201	69,5	130
Extra Clear Glass	2,51	8,9	721	1,0	73,1	41,4
PLA	1,03	70	245	0,13	2	44

Πίνακας 3 Θερμικές και Μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VI: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ/PLA – ΓΥΑΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΟΞΙΚΗΣ ΚΟΛΛΑΣ

Οι κόλλες δυο συστατικών είναι κατάλληλες για κολλήσεις μεταξύ πολλών υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, ξύλο, ελαστικό εκτός από ορισμένα πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) ωστόσο είναι συμβατή με πολυεστερικά πλαστικά όπως είναι και το PLA. Επιπλέον κολλούν μη πορώδη υλικά επειδή στερεοποιούνται χωρίς συρρίκνωση και χωρίς να παράγουν αέρια ή υγρά παραπροϊόντα.

Εποξειδική ρητίνη είναι κάθε ένωση χαμηλού μοριακού βάρους η οποία μπορεί να μετατραπεί με περαιτέρω αντίδραση χωρίς ή με την παρουσία άλλης ένωσης σε δικτυωμένο πολυμερές. Ο όρος εποξειδική ρητίνη χρησιμοποιείται και για το αντίστοιχο δικτυωμένο πολυμερές.



Εικόνα 39 Bison Epoxy 5 Minutes.

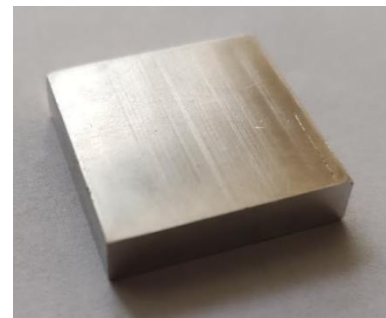
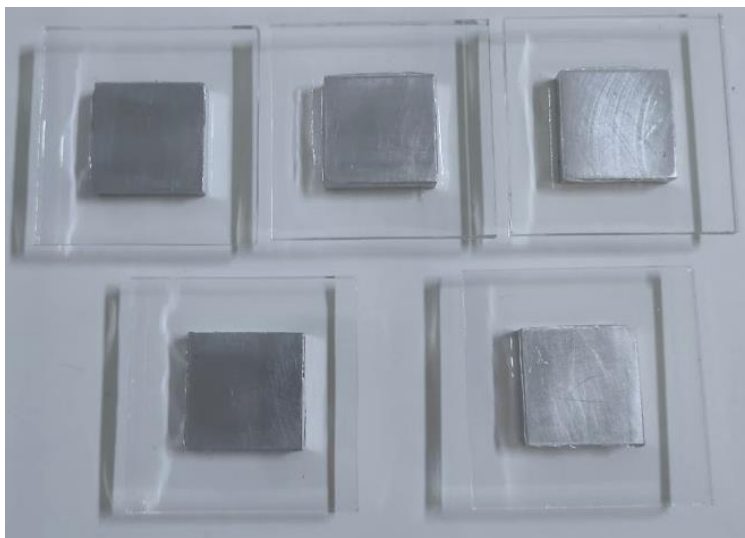
Η διεργασία μετατροπής του χαμηλού μοριακού βάρους εποξειδίου σε ένα υψηλά δικτυωμένο πολυμερές καλείται σκλήρυνση (curing). Η σκλήρυνση γίνεται συνήθως με τη χρήση και μίας χαρακτηριστικής ένωσης που καλείται σκληρυντής (hardener ή curing agent). [31]. Τα δυο συστατικά, το εποξείδιο και ο σκληρυντής περιέχονται σε δυο διαφορετικά δοχεία και αναμειγνύονται, για την περίπτωση της κόλλας EPOXY 5 MINUTES της εταιρίας *Bison International B.V.* κατά αναλογία 1:1. Η σχολαστική ανάμειξη των συστατικών είναι απολύτως απαραίτητη. Επίσης η μεταβολή στο πάχος της κόλλας στη περιοχή της συγκόλλησης μπορεί να επιφέρει σημαντικά μεγάλη διακύμανση στα αποτελέσματα αντοχής που θα εξετάσουμε παρακάτω για τους συνδέσμους επικάλυψης. Πρέπει λοιπόν να γίνει προσεκτική τοποθέτηση ίδιας ποσότητας μείγματος σε κάθε δείγμα.

6.1 Προετοιμασία και συγκόλληση των δοκιμίων

6.1.1 Αλουμίνιο- Γυαλί

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν πλακίδια γυαλιού τύπου *Extra Clear*, διαστάσεων $50 \times 50 \times 3 \text{ mm}^3$, τα οποία προμηθευτήκαμε από το κατάστημα SKONDRAS (Αγίου Ανδρέου 58, 26221, Πάτρα) και πλακίδια αλουμινίου κράματος 6063 διαμορφωμένα με μηχανήμα CNC, στις διαστάσεις $25 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$, στο μηχανουργείο του Πανεπιστημίου Πατρών. Για την προετοιμασία των πλακιδίων προς κόλληση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- 1) τράχυνση της επιφάνειας του αλουμινίου με χρήση γυαλόχαρτου (λειαντικοί κόκκοι από καρβίδιο του πυριτίου (Silicon Carbide) νούμερο P800)
- 2) καθαρισμός των επιφανειών προς επαφή με μεθανόλη (αλουμινίου και γυαλιού)
- 3) ανάμειξη των δυο συστατικών της κόλλας και εφαρμογή στην επιφάνεια του αλουμινίου λεπτό στρώμα μείγματος.
- 4) συναρμολόγηση των δυο τμημάτων και άσκηση πίεσης 0,15 MPa για 40 λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου. Η πλήρης σκλήρυνση της ρητίνης επέρχεται μετά από 12 ώρες.



Εικόνα 40 α) Σύνδεσμοι επικάλυψης Αλουμινίου – Γυαλιού με κόλλα β) Δείγμα πλακιδίου από Αλουμίνιο.

6.1.2 PLA - Γυαλί

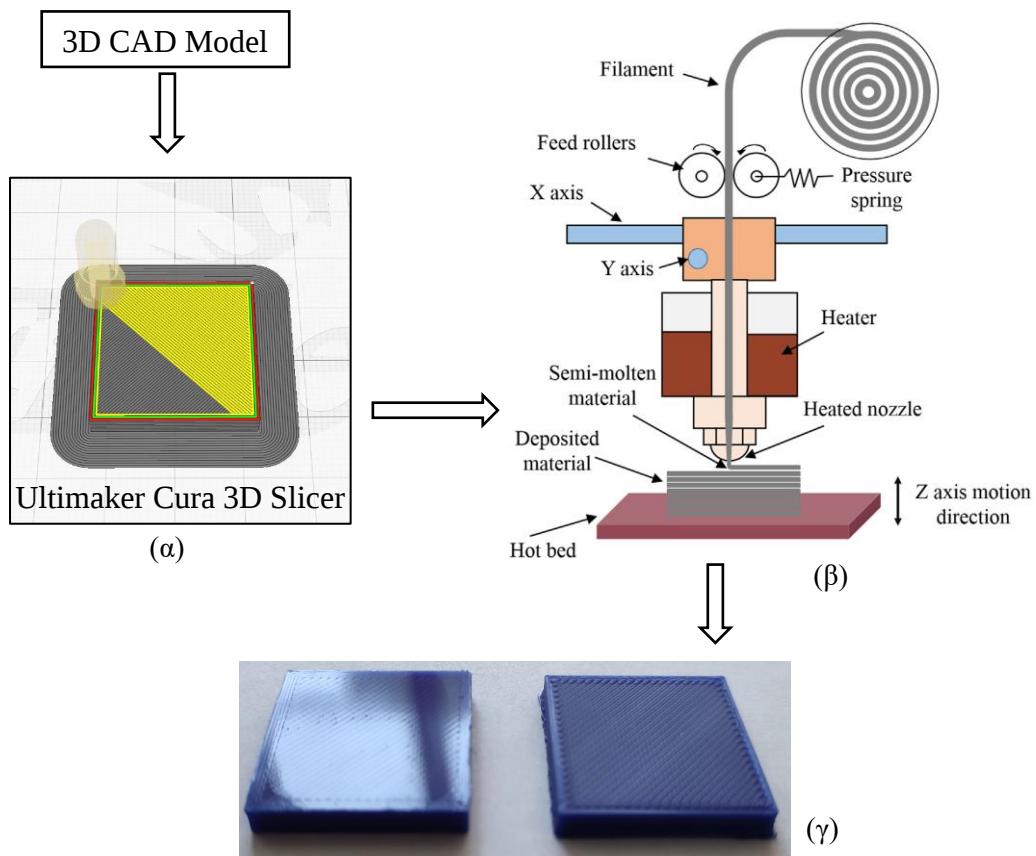
Παρόμοια διαδικασία κόλλησης ακολουθήθηκε και για την κατασκευή των δοκιμίων PLA-Glass. Τα πλακίδια PLA εκτυπώθηκαν στις διαστάσεις $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ επάνω σε γυάλινη επιφάνεια ώστε να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη επιφάνεια με όσο το δυνατόν λιγότερες ανωμαλίες (αυλακώσεις, κυματισμοί), χαμηλή τραχύτητα και αυξημένη επιτεδότητα. Έπειτα από δοκιμές διαφορετικών παραμέτρων εκτύπωσης χρησιμοποιήθηκαν αυτές που απέδωσαν την καλύτερη δυνατή επιφάνεια σε εύλογο χρόνο εκτύπωσης. Παρά ταύτα, η μείωση των επιφανειακών ατελειών δεν είναι τόσο κρίσιμη σε αυτό το σκέλος των πειραμάτων που αφορά στην κόλληση των πλακιδίων με κολλά, καθώς το ιξώδες της συγκολλητικής ουσίας επιτρέπει την εισχώρηση της στην τραχύτητα της επιφάνειας αξιοποιώντας έτσι όλη τη διαθέσιμη περιοχή κόλλησης και βελτιώνοντας τη μηχανική πρόσφυση κόλλας – πλαστικού. Τα πλακίδια γυαλιού ήταν όπως και πριν τύπου *Extra Clear* και διαστάσεων $50 \times 50 \times 3 \text{ mm}^3$.

Υλικό	Θερμοκρασία Εκτύπωσης (°C)	Θερμοκρασία Επιφάνειας Εκτύπωσης (°C)	Πάχος Στρώσης (mm)	Διεύθυνση Στρώσεων (°)	Infill (%)	Ταχύτητα Εκτύπωσης
PLA	202	65	0.12(Αρχική) 0.2	[45,0,90,-45]	25	30 mm/sec

Πίνακας 4 Παράμετροι 3D εκτύπωσης.

Για την προετοιμασία των πλακιδίων προς κόλληση ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- 1) τράχυνση της επιφάνειας του πλαστικού με χρήση γυαλόχαρτου (λειαντικοί κόκκοι από καρβίδιο του πυριτίου (Silicon Carbide) νούμερο P800)
- 2) καθαρισμός των επιφανειών προς επαφή με μεθανόλη (αλουμίνιου και γυαλιού)
- 3) ανάμειξη των δυο συστατικών της κόλλας και εφαρμογή στην επιφάνεια του πλαστικού λεπτού στρώματος μείγματος.
- 4) συναρμολόγηση των δυο τμημάτων και άσκηση πίεσης 0,15 MPa για 40 λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου. Η πλήρης σκλήρυνση της ρητίνης επέρχεται μετά από 12 ώρες.



Εικόνα 41 Διάγραμμα ροής της εκτύπωσης α) Cura Slicer β) Fused Deposition Model [36] γ) Δείγμα πλακιδίου από PLA.



Εικόνα 42 Σύνδεσμοι επικάλυψης PLA – Γυαλιού με κόλλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VII: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ/PLA – ΓΥΑΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ LASER

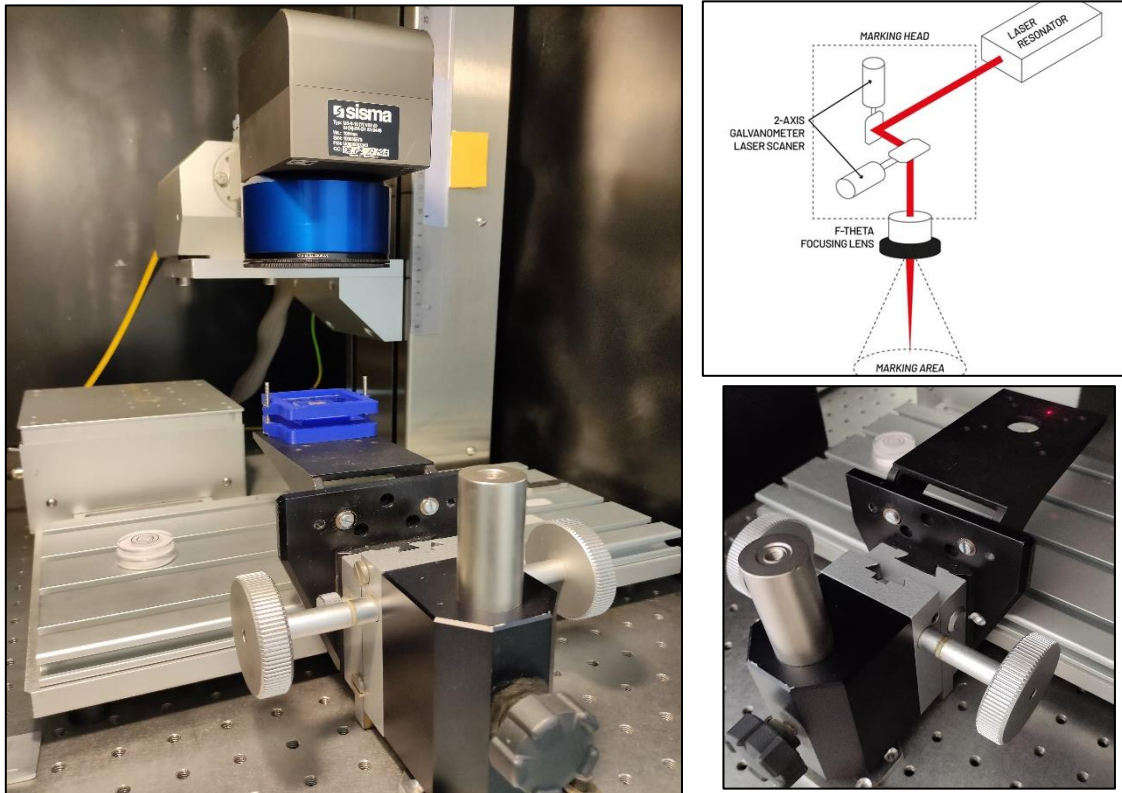
Για την επίτευξη των συγκολλήσεων και την κατασκευή συνδέσμων ισχυρής μηχανικής αντοχής είναι αναγκαία η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη πειραματική διαδικασία. Οι παράμετροι εκτός των άλλων μεταβάλλονται με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιούμε αλλά και με το είδος των υλικών που κατεργαζόμαστε κάθε φορά. Η πειραματική διερεύνηση των συγκολλήσεων βασίστηκε σε ένα Fiber Pulsed Laser παλμών διάρκειας nanosecond με αποτέλεσμα η απορρόφηση της ακτινοβολίας να γίνεται γραμμικά στην επιφάνεια του μη διαφανούς υλικού. Η γραμμική απορρόφηση της δέσμης οδηγεί σε τοπική θέρμανση της επιφάνειας του μετάλλου, δημιουργία πλάσματος και μεταφορά, μέσω θερμικής αγωγής, ενέργειας στην επιφάνεια του γυαλιού και κατά συνέπεια τοπική τήξη των υλικών. Στην περίπτωση που είχαμε υπερβραχείς παλμούς, η απορρόφηση της δέσμης θα γινόταν και στον όγκο του γυαλιού μέσω μη γραμμικών οπτικών φαινομένων, τότε η δέσμη θα έπρεπε να είναι εστιασμένη με μεγάλη ακρίβεια και απαραίτητη θα ήταν η χρήση μετρητικών διατάξεων του σημείου εστίασης. Η διάταξη αποτελείτο από το σύστημα Laser, την κατασκευή συγκράτησης των δοκιμίων και την πλατφόρμα ρύθμισης του ύψους. Οι παράμετροι που θα μας απασχολήσουν και έχουν αναφερθεί και από άλλους ερευνητές [8] διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες :

- α) παράμετροι που αφορούν τους παλμούς laser (ισχύς, διάρκεια, συχνότητα)
- β) παράμετροι που αφορούν τη δέσμη (εστίαση, μέγεθος του σημείου εστίασης, ενεργό βάθος πεδίου)
- γ) παράμετροι που αφορούν τη σάρωση (ταχύτητα, μοτίβο, επαναλήψεις)
- δ) παράμετροι που αφορούν τα υλικά (ποιότητα επιφάνειας, επαφή στη διεπιφάνεια)

7.1 Το Σύστημα Laser

Η πηγή ακτινοβολίας του συστήματος είναι η YLPM-1-4x200-20-20 της εταιρίας IPG Photonics με ενεργό υλικό στέρεας μορφής και υλικό διάχυσης Υτέρβιο (Yb). Η δέσμη οδηγείται μέσω οπτικής ίνας στην κεφαλή τύπου *galvo* η οποία παρέχει τη δυνατότητα κατεργασίας της επιφάνειας κομματιών μέσω δισδιάστατης σάρωσης της δέσμης laser, χωρίς να είναι απαραίτητη η μετακίνηση του κατεργαζόμενου κομματιού. Η συγκράτηση των προς συγκόλληση τμημάτων γίνεται με ειδικά διαμορφωμένο σφικτήρα. Ο σφικτήρας στερεώνεται επάνω σε γραμμικά μετακινούμενη στη διεύθυνση του ύψους πλατφόρμα προκειμένου να είναι

εφικτή η τοποθέτηση του σημείου εστίασης της δέσμης laser στο επιθυμητό επίπεδο. Η μέση ονομαστική ισχύς (Nominal Power) του laser είναι 20W και η μέγιστη (Peak Power) 15kW, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι 1064 nm ενώ η διάρκεια των παλμών (Pulse Duration) ρυθμίζεται στο εύρος 4 - 200 nanoseconds. Επίσης η συχνότητα των παλμών (Repetition Rate) μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα μεταξύ 1,6 με 200 kHz.



Εικόνα 43 Η ολοκληρωμένη διάταξη Laser, επεξηγηματικό μοντέλο λειτουργίας της κεφαλής galvo, πλατφόρμα συγκράτησης.

Η διάμετρος της δέσμης στο σημείο εστίασης για μια Γκαουσιανή δέσμη με μήκος κύματος λ , διάμετρο δέσμης πριν το φακό εστίασης D και εστιακή απόσταση f μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά από τη σχέση

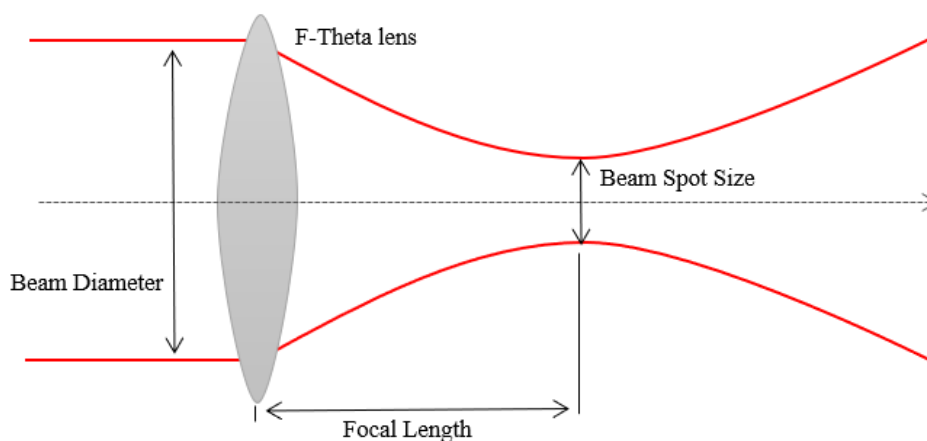
$$2w_0 = \frac{4 M^2 \lambda f}{\pi D} \quad (3)$$

Οπού $2w_0$ η διάμετρος του σημείου εστίασης και M η παράμετρος που εκφράζει την απόκλιση της δέσμης από την ιδανική Γκαουσιανή δέσμη. Ο φακός είναι τυπου F-Theta lens και έχει εστιακή απόσταση $f = 100 \text{ mm}$. Επίσης από τον κατασκευαστή δίνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

YTTERBIUM PULSED FIBER LASER		
Characteristic	Typical Value	Unit
Selectable pulse durations	4, 8, 14, 20,30, 50, 100, 200	ns
Central emission wavelength	1064	nm
Nominal average output power	20	Watt
Extended pulse repetition rate	20 – 200	kHz
Maximum pulse energy	1	mJ
Maximum peak power	15	kW
Output beam diameter ($1/e^2$)	6-9	mm
Beam quality M^2	1.5	

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος Laser

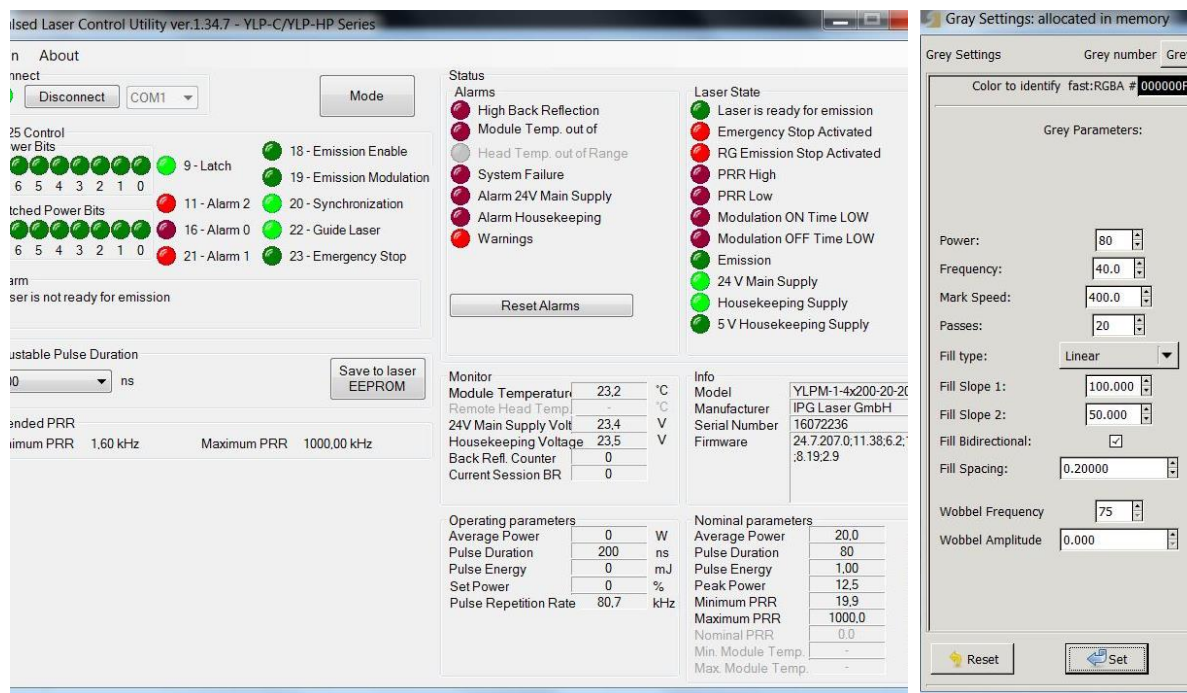
Εισάγοντας τα δεδομένα στη σχέση (3) βρίσκουμε $2w_0 = 33,9 \mu m$ η διάμετρος του σημείου εστίασης για αρχική διάμετρο δέσμης 6 mm και $2w_0 = 22,6 \mu m$ για αρχική διάμετρο δέσμης 9 mm. Παίρνοντας τελικά μια μέση τιμή, καθώς δεν γνωρίζουμε ακριβώς τη διάμετρο της αρχικής δέσμης, έχουμε ότι $d = 2w_0 = 28,5 \mu m$ το σημείο εστίασης (Beam Spot Size).



Εικόνα 44 Γκαουσιανή Δέσμη.

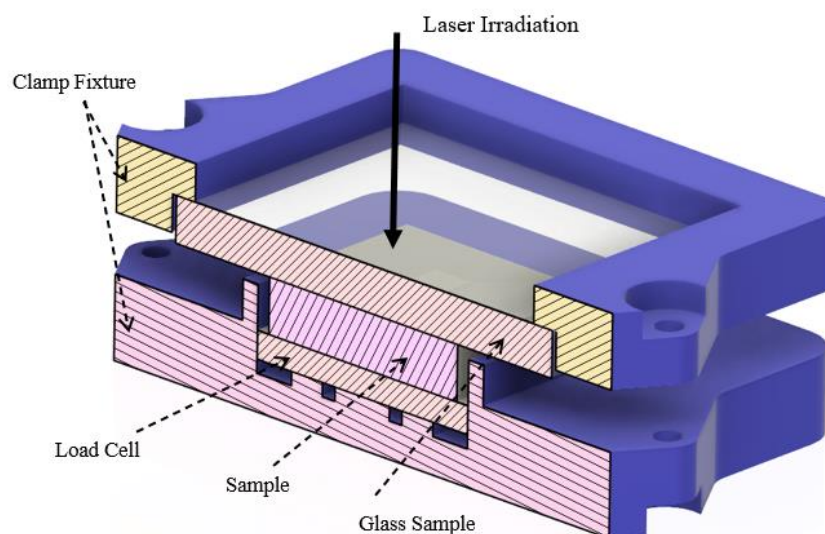
Για την καθοδήγηση του hardware του συστήματος Laser χρησιμοποιείται το λογισμικό οδήγησης. Μέσω του λογισμικού μας παρέχεται η δυνατότητα μεταβολής των

παραμέτρων που αφορούν στους παλμούς και τη σάρωση. Οι ρυθμίσεις Fill Type, Fill Slope 1, Fill Slope 2 και Fill Spacing σχετίζονται με το γεωμετρικό μοτίβο σάρωσης. Η σάρωση γίνεται εντός ενός προκαθορισμένου περιγράμματος το οποίο σχεδιάζουμε στο πρόγραμμα Inkscape. Στις επιλογές Fill Slope αλλάζουμε την κλίση (σε μοίρες) των γραμμών σάρωσης και στο Fill Spacing την πυκνότητα του μοτίβου. Για Fill Spacing 0.2 mm κάθε παράλληλη γραμμή απέχει από την επόμενη 0.2 mm.



Εικόνα 45 Γραφικό περιβάλλον χρήστη Laser.

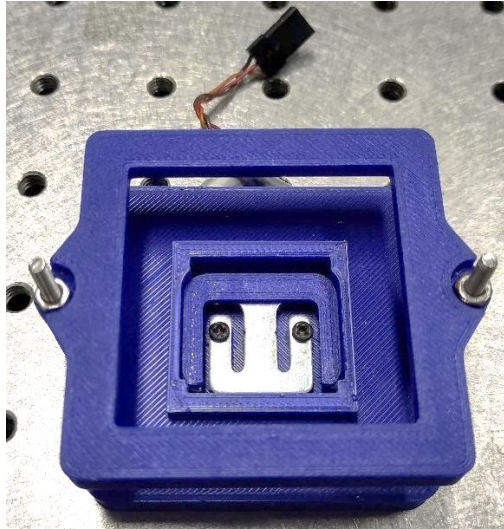
7.2 Η Ιδιοσυσκευή Σύσφιξης



Εικόνα 46 Ιδιοσυσκευή Σύσφιξης (3d CAD).

Για τη συγκράτηση των τμημάτων προς συγκόλληση σχεδιάστηκε και εκτυπώθηκε ιδιοσυσκευή η οποία φέρει και αισθητήρα δύναμης για τον έλεγχο της αναπτυσσόμενης πίεσης κατά τη σύσφιξη. Η εξασφάλιση καλής επαφής στη περιοχή της σύνδεσης των δυο υλικών είναι σημαντική για τη δημιουργία της συγκόλλησης και την αποφυγή αφαίρεσης υλικού λόγω εξάχνωσης. Για επιφάνειες με μεγάλη επιπεδότητα και πολύ καλή ποιότητα, επαφή μπορεί να αναπτυχθεί πιέζοντας τις δυο επιφάνειες μεταξύ τους, οπότε ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις Van der Waals στην διεπιφάνεια συγκρατούν τα δυο υλικά μεταξύ τους. Ωστόσο αυτή η διαδικασία εισάγει αβεβαιότητα ως προς την επαφή των δυο υλικών καθώς οι επιφανειακές ατέλειες αυξάνονται με το εμβαδόν των επιφανειών, συνεπώς η χρήση σφικτήρα είναι αναγκαία για τη διατήρηση του μικρότερου δυνατού κενού μεταξύ των δυο υλικών. Η αρχική μελέτη του σφικτήρα εμπεριείχε τέσσερα σημεία φόρτισης με χρήση κοχλίων περιμετρικά ενός επιπροσθέτου γυαλιού πάνω από το γυάλινο δείγμα ώστε η πίεση να εφαρμόζεται ομοιόμορφα στο δείγμα. Ο σχεδιασμός αυτός δυσκολεύει τον έλεγχο της δύναμης και το προσθετό γυαλί μπορεί να αλληλεπιδρά με τη δέσμη. Στο τελικό σχέδιο υπάρχουν δύο σημεία φόρτισης και η δύναμη μεταφέρεται στο γυάλινο δείγμα (50 x 50 mm²) συμμετρικά μέσω της πλαστικής κατασκευής. Επίσης μια απλή ζυγαριά του εμπορίου τροποποιήθηκε ώστε να λειτουργήσει ως

αισθητήρας φορτίου της ιδιοσυσκευής. Η συνδεσμολογία του επιμηκυνσιόμετρου βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της γέφυρας Wheatstone (quarter bridge strain gauge).



Εικόνα 47 Ιδιοσυσκευή Σύσφιξης.

Ο σφικτήρας έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε ο σύνδεσμος που προκύπτει μετά τη συγκόλληση να έχει την κατάλληλη γεωμετρία για την δοκιμή αντοχής την οποία θα αναφέρουμε παρακάτω. Κατά τη συναρμολόγηση της διάταξης οι δυο κοχλίες συσφίγγονται συγχρόνως μέχρι την επιθυμητή πίεση στην περιοχή επαφής των δυο πλακιδίων. Για την ακρίβεια των μετρήσεων, κανείς θα πρέπει να λάβει υπόψιν και τη βισκοελαστική συμπεριφορά του πλαστικού υλικού της κατασκευής η οποία με το χρόνο προκαλεί χαλάρωση τάσεων και πτώση τελικά της εφαρμοζόμενης πίεσης επαφής.

7.3 Πειραματική Διαδικασία Συγκόλλησης των Συνδέσμων με Laser

7.3.1 Αλουμίνιο – Γυαλί

Προετοιμασία των υλικών :

Τα πλακίδια αλουμίνιου διαστάσεων $25 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$ κράματος 6063 που χρησιμοποιήθηκαν έχουν υποστεί επιφανειακή μηχανουργική κατεργασία σε φρέζα ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας και να αυξηθεί η επιπεδότητα. Η επιφάνεια στη συνέχεια δεν υπέστη περαιτέρω λείανση και στίλβωση καθώς ήταν σκόπιμο η τραχύτητα να παραμείνει σε βαθμό που προκύπτει από τις κοινές μηχανουργικές κατεργασίες. Επίσης, όσον αφορά τα πλακίδια γυαλιού είναι τύπου Extra Clear με διαστάσεις $50 \times 50 \times 4 \text{ mm}^3$.

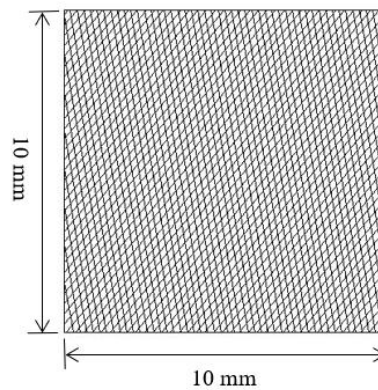
Αρχικά οι επιφάνειες των υλικών καθαρίζονται με μεθανόλη και ελέγχεται η επαφή του μετάλλου με τη γυαλί, για τον έλεγχο αυτό οι δυο καθαρές επιφάνειες έρχονται σε επαφή μεταξύ τους ασκώντας μικρή πίεση με το χέρι. Πιάνοντας στη συνέχεια και ανασηκώνοντας το γυάλινο πλακίδιο, το αλουμίνιο δεν αποκολλάται αμέσως πάρα μόνο έπειτα από ένα χρονικό διάστημα δευτερολέπτων. Αυτό οφείλεται όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως στις ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις Van der Waals και αποτελεί ένδειξη καλής επαφής μεταξύ των επιφανειών. Κατόπιν τα δείγματα τοποθετούνται στον σφικτήρα. Οι θήκες που έχουν δημιουργηθεί στον σφικτήρα ευθυγραμμίζουν τα δυο πλακίδια και αποτρέπουν την κίνηση τους. Τέλος, οι κοχλίες συσφίγγονται έως ότου η πίεση ανέλθει στα $0,23 \text{ MPa}$ (15 kg). Παρατηρήθηκε έπειτα από δοκιμή δυο διαφορετικών τιμών πίεσης $0,23 \text{ MPa}$ (15 kg) και $0,15 \text{ MPa}$ (10 Kg) σε δύο ομάδες δειγμάτων πως η αύξηση της πίεσης βελτιώνει την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων και το μέγιστο όριο αντοχής.

Διαδικασία Συγκόλλησης

Η δέσμη laser εστιάζεται στην επιφάνεια του αλουμίνιου. Η εστίαση δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα με ακρίβεια λόγω έλλειψης του απαραίτητου εξοπλισμού, ωστόσο ρυθμίζοντας βηματικά το ύψος της κινουμένης πλατφόρμας και εκτελώντας ‘χτυπήματα’ με το laser διαδοχικά σε κάθε ύψος σημαδεύουμε την επιφάνεια. Αφού έχει αντιστοιχηθεί κάθε στίγμα με το ύψος της πλατφόρμας, βρίσκουμε το στίγμα με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου που έχει τη μικρότερη διάμετρο. Σε αυτό το ύψος η δέσμη είναι μόλις εστιασμένη στην επιφάνεια.

Έχοντας πλέον ρυθμίσει την εστίαση πρέπει να τοποθετήσουμε στο κέντρο του πεδίου σάρωσης της δέσμης το δείγμα μας προς συγκόλληση. Η ευθυγράμμιση γίνεται χειροκίνητα και με τη χρήση του laser. Προβάλλουμε με τον pointer του laser ένα τετράγωνο περίγραμμα διαστάσεων $25 \times 25 \text{ mm}^2$ με το οποίο κεντράρουμε το μεταλλικό πλακίδιο. Το επόμενο βήμα αφορά στην επιλογή του μοτίβου συγκόλλησης.

Το περίγραμμα του σχήματος που επιλέχθηκε είναι τετράγωνο διαστάσεων $10 \times 10 \text{ mm}^2$ με μοτίβο γέμισης τύπου μπακλαβά, οι γωνίες του hatch είναι 100° και 50° με Fill Spacing 0.2 mm



Εικόνα 48 Μοτίβο συγκόλλησης.

Η λειτουργία του λέιζερ είναι παλμική. Κάθε παλμός έχει συγκεκριμένη χρονική διάρκεια και ενέργεια. Η ενέργεια του παλμού είναι η μέση οπτική ισχύς του συστήματος διαιρεμένη με τη συχνότητα επανάληψης.

$$E_{pulse} = \frac{P_{avg}}{f} \text{ [Joule]} \quad (4)$$

Η μέγιστη ισχύς τότε ανά παλμό είναι η ενέργεια διαιρεμένη με τη χρονική διάρκεια του παλμού. Για Γκαουσιανούς παλμούς η ενεργεία αυτή είναι περίπου το 94% της ακόλουθης ποσότητας

$$P_{peak} = \frac{E_{pulse}}{T} \text{ [Watt]} \quad (5)$$

Ακόμη ένα σημαντικό μέγεθος που πρέπει να οριστεί είναι η ένταση της ακτινοβολίας. Πρόκειται για την οπτική ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας. Στην περίπτωση του παλμικού laser έχουμε την μέση ένταση και τη μεγίστη ένταση.

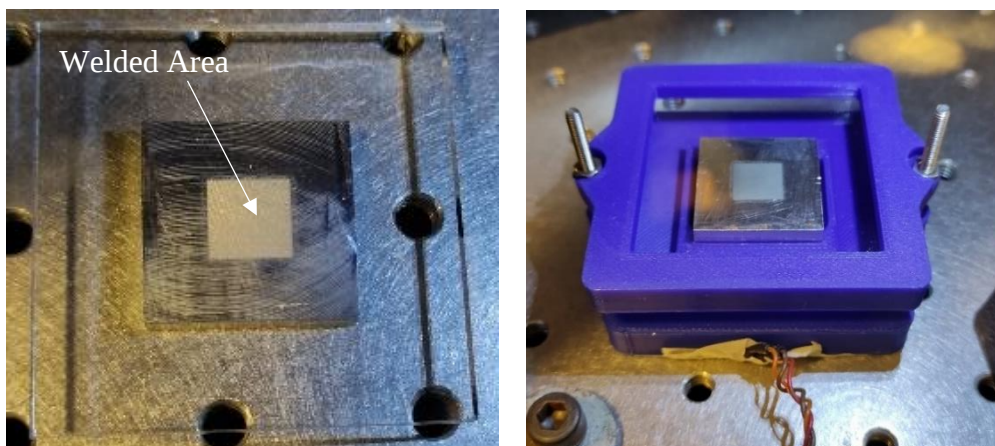
$$I = \frac{P}{\pi d^2/4} \quad [Watt/cm^2] \quad (6)$$

Με

P: είναι η μέση ή η μέγιστης ισχύς

d: η ακτίνα της δέσμης

Θεωρητικά θα επιλέγαμε τη μικρότερη χρονική διάρκεια παλμών (4 ns) ώστε να μειωθεί ο χρόνος αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη ανά παλμό, κατ' ακολουθίαν το υλικό θα έχει όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο να αντιδράσει θερμικά, (δηλαδή τοπική διάχυση της θερμότητας στον όγκο του). Η σκέψη αυτή περιορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του laser, η μέγιστη ισχύς του οποίου είναι 15 kW, έτσι στα T = 4 ns για να έχουμε μέγιστη ισχύ $P_{peak} = 15 \text{ kW}$ θα πρέπει η μέση ισχύς να είναι $P_{avg} = 1,2 \text{ W}$ και η συχνότητα $f = 20 \text{ kHz}$ (minimum repetition rate) αποδίδοντας ενέργεια παλμού $E_{pulse} = 0,06 \text{ mJ}$ η οποία δεν επαρκεί, βάσει δοκιμών που έγιναν, για την ανάπτυξη ισχυρών συνδέσμων με δεδομένη συχνότητα. Η διάρκεια των παλμών που επιλέχθηκε για τις συγκολλήσεις είναι T = 200 ns. Στη συνέχεια έγινε διερεύνηση και των άλλων μεταβλητών μέσω δοκιμαστικών συγκολλήσεων, αυξάνοντας τη συχνότητα μειώνεται η ενέργεια ανά παλμό και η ένταση της ακτινοβολίας. Για το συγκεκριμένο συνδυασμό υλικών (Al 6063 – Extra Clear Glass) χρησιμοποιήθηκε τελικά συχνότητα $f = 40 \text{ kHz}$, η μέσης ισχύς διατηρήθηκε στο 80% δηλαδή $P_{avg} = 16 \text{ W}$ και η ταχύτητα σάρωσης της επιφάνειας από τη δέσμη στα 400 mm/s. Τέλος βρέθηκε πως 2 επαναλήψεις (passes) δίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Αξιοποιώντας τις σχέσεις που παρατέθηκαν προηγούμενους βρίσκουμε για τις δεδομένες συνθήκες (T = 200 ns, $P_{avg} = 16 \text{ W}$, $f = 40 \text{ kHz}$) $E_{pulse} = 0,4 \text{ mJ}$, $P_{peak} = 2 \text{ kW}$ και $I_{peak} = 314 \text{ MW/cm}^2$ για διάμετρο στο σημείο εστίασης $d = 28,5 \text{ }\mu\text{m}$.



Εικόνα 49 Συγκολλημένο δείγμα Αλουμινίου - Γυαλιού, το δείγμα εντός της ιδιοσυσκευής σύσφιξης

Welding Parameters (Al - Glass)	
Parameter	Value
Materials	Aluminum - Glass
Pulse Duration (ns)	200
Average Power (%)	80 (16 Watt)
Pulse Frequency (kHz)	40
Scan Speed (mm/s)	400
Passes	2
Fill Spacing (mm)	0.2
Pattern	Baklava Shape (10x10 mm ²)

Πίνακας 6 Παράμετροι Συγκόλλησης Αλουμινίου – Γυαλιού.

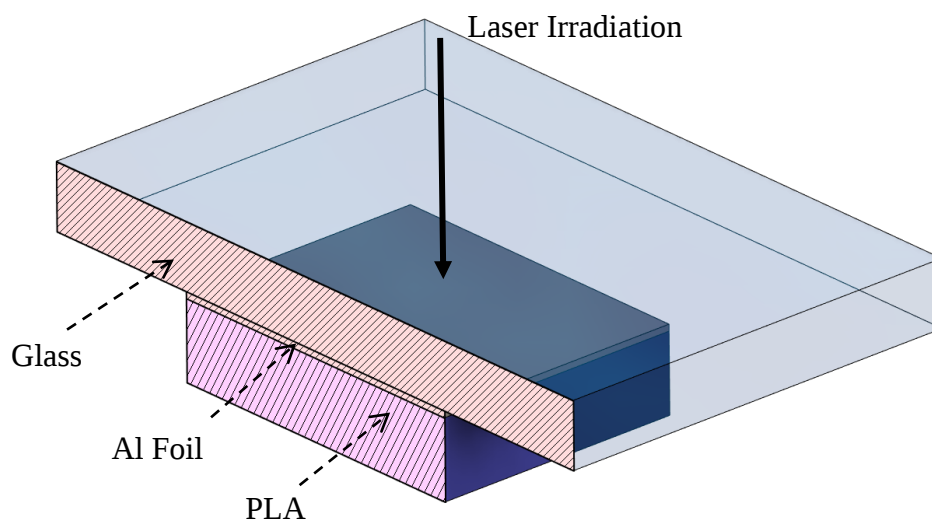
7.3.2 PLA – Φύλλο Αλουμινίου - Γυαλί

Ο επόμενος συνδυασμός υλικών για τον οποίο διευρύνθηκε η συγκολλησιμότητα με τη χρήση laser είναι πιο σύνθετος καθώς εμπλέκει τρία πλήρως ανόμοια υλικά: γυαλί, μέταλλο και πλαστικό. Βασικός στόχος είναι η σύνδεση του πλαστικού με το γυαλί ενώ το μέταλλο χρησιμοποιείται ως ενδιάμεση στρώση.

Ως γνωστόν η θέρμανση των ημικρυσταλλικών θερμοπλαστικών πάνω από τη θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης T_g οδηγεί σε χαλάρωση του υλικού ενώ για θέρμανση πάνω από τη θερμοκρασία τήξης των κρυστάλλων T_m το υλικό ρευστοποιείται. Για την επίτευξη της απευθείας σύνδεσης του PLA με το γυαλί θα έπρεπε η γυάλινη επιφάνεια να

υποστεί κατεργασία τράχυνσης ώστε το τηγμένο θερμοπλαστικό να εισχωρεί στις ανωμαλίες (μικρογεωμετρικής μορφής) της επιφάνειας και να αναπτυχθεί μηχανική πρόσφυση. Ωστόσο η μεγάλη διαφορά στους συντελεστές θερμικής διαστολής του PLA ($70 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [32]) και γυαλιού ($8.9 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [33]) δημιουργεί θερμικές τάσεις κατά την ψύξη οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν την αντοχή της μηχανικής πρόσφυσης και αστοχία του συνδέσμου. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και κατά τη διαδικασία εκτύπωσης όπου συμβαίνει αποκόλληση των τρισδιάστατα εκτυπωμένων πλακιδίων PLA από τη γυάλινη επιφάνεια εκτύπωσης (ίδιος τύπου γυαλιού Extra Clear χωρίς release agents) όταν η θερμοκρασία κατέλθει στη θερμοκρασία δωματίου. Η απευθείας σύνδεση συνεπώς των δυο αυτών υλικών απαιτεί καλύτερη μελέτη της μεθόδου και του τύπου επιφανειακής κατεργασίας που πρέπει να υποστεί το γυαλί ώστε η μηχανική πρόσφυση που θα αναπτυχθεί να αντέχει τη φόρτιση των θερμικών τάσεων.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ενδιάμεση στρώση αλουμινόχαρτου. Η αποφυγή επιβολής των επιφανειών σε κάποια ειδική κατεργασία απλουστεύει τη διαδικασία και μειώνει το χρόνο και το κόστος προετοιμασίας των δειγμάτων. Επίσης, στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές για τη συγκόλληση θερμοπλαστικού με αλουμίνιο και αλουμίνιο με γυαλί όχι όμως για τον συνδυασμό των τριών αυτών υλικών. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί μπορεί να διαχωριστεί σε δυο στάδια. Αρχικά τη συγκόλληση του αλουμινόχαρτου με το γυαλί και κατόπιν τη συγκόλληση του αλουμινόχαρτου με το PLA. Η επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης στο πρώτο στάδιο επηρεάζει και το δεύτερο αυξάνοντας τη πολυπλοκότητα του πειράματος. Η μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο γίνεται αυτόματα από το σύστημα χωρίς να υπάρξει κάποιος κενός χρόνος ενδιάμεσα.



Εικόνα 50 Τρισδιάστατη Απεικόνιση του συνδέσμου PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί .

Για κάθε στάδιο της διαδικασίας πρέπει να χρησιμοποιηθεί και διαφορετικό προφίλ παραμέτρων, το πρώτο προφίλ περιέχει τις ρυθμίσεις του συστήματος laser που είναι κατάλληλες για τη συγκόλληση του γυαλιού με το αλουμίνιο ενώ στο δεύτερο προφίλ οι ρυθμίσεις διαμορφώνονται έτσι ώστε η ενέργεια της δέσμης να μεταφερθεί μέσω αγωγής στο PLA και να προκαλέσει τοπική τήξη του πλαστικού στη διαδρομή σάρωσης και κατά συνέπεια διαβροχή της μεταλλικής επιφάνειας.

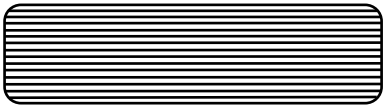
Από τα στοιχεία που παρέχει ο κατασκευαστής του πλαστικού νήματος η θερμοκρασία τήξης είναι $245\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ και η θερμοκρασία χαλάρωσης Vicat $103\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η θερμοκρασία Vicat είναι η θερμοκρασία στην οποία μια βελόνα με επίπεδη κεφαλή εισχωρεί σε βάθος 1 mm στο δείγμα υπό φορτίο 10 N ή 50 N. Η θερμοκρασία αυτή είναι πολύ κοντά στη T_g ενώ σχετίζονται μεταξύ τους. Για να έχουμε καλή διαβροχή της μεταλλικής επιφάνειας από το PLA θα πρέπει το υλικό να ρευστοποιηθεί τοπικά, συνεπώς η θερμοκρασία να είναι στο σημείο τήξεως.

Διαδικασία Συγκόλλησης

Η γεωμετρική διάταξη των υλικών απεικονίζεται στην εικόνα 48. Πρώτα καθαρίζουμε τα δείγματα με μεθανόλη και τα στεγνώνουμε, έπειτα τοποθετούμε το πλακίδιο από PLA στη θήκη του σφικτήρα στη συνέχεια μια στρώση από αλουμινόχαρτο και τέλος το γυάλινο πλακίδιο. Το αλουμινόχαρτο εισάγεται στο σφικτήρα με τη ματ επιφάνεια να είναι εκτεθειμένη στην ακτινοβολία και τη γυαλιστερή σε επαφή με το PLA, η ματ επιφάνεια έχει μεγαλύτερο

συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας ενώ η γυαλιστερή χαμηλότερη τραχύτητα βελτιώνοντας έτσι την θερμική επαφή με το PLA. Η επιφάνεια των πλακιδίων από PLA είναι επίπεδη και ανάλογης ποιότητας της γυάλινης επιφάνειας δεδομένου ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση τους έχει γίνει επάνω σε γυαλί. Στη συνέχεια οι ίδιες διαδικασίες εστίασης της δέσμης στην μεταλλική επιφάνεια του αλουμινόχαρτου και ευθυγράμμισης του δείγματος στο κέντρο του πεδίου σάρωσης ακολουθήθηκε και εδώ όπως στα δείγματα αλουμίνιου – γυαλιού.

Το περίγραμμα του σχήματος που επιλέχθηκε είναι ορθογώνιο με στρογγυλεμένες γωνίες διαστάσεων $12 \times 4 \text{ mm}^2$ και μοτίβο γέμισης παράλληλων γραμμών. Για το πρώτο στάδιο της συγκόλλησης επιλέχθηκε Fill Spacing 0.1 mm ενώ για το δεύτερο 0.2 mm. Στην επιλογή αυτή του Fill Spacing λαμβάνονται υπόψιν και οι υπόλοιπες παράμετροι όπως είναι η ταχύτητα σάρωσης και η ισχύς.

Welding Pattern 1 (Glass - Al Foil)	Welding Pattern 2 (Al Foil - PLA)
Dimensions: $12 \times 4 \text{ mm}^2$	Dimensions: $12 \times 4 \text{ mm}^2$
Fill Spacing: 0.1 mm	Fill Spacing: 0.2 mm
Passes: 2	Passes: 2
	

Πίνακας 7 Περίγραμμα και διαστάσεις του μοτίβου συγκόλλησης των συνδέσμων PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί.

Το προφίλ παραμέτρων για τη συγκόλληση αρχικά του αλουμινόχαρτου με το γυαλί διαμορφώθηκε με βάση τις συνθήκες συγκόλλησης των συνδέσμων γυαλιού – αλουμίνιου που πραγματοποιήθηκαν προηγουμένως. Το πάχος του αλουμινόχαρτου είναι μόλις 200 μm και η διείσδυση της δέσμης δεν θέλουμε να ξεπερνά αυτό το πάχος, για το λόγο αυτό η μέση ισχύς μειώθηκε στο 60 % (12 W). Επίσης, η ταχύτητα αυξήθηκε ενώ η συχνότητα παρέμεινε στα 40 kHz. Στη συνέχεια έγινε διερεύνηση και καθορισμός των παραμέτρων για τη συγκόλληση του PLA με το αλουμινόχαρτο. Στη βιβλιογραφία η πλειοψηφία των πειραματικών ερευνών με αντικείμενο τους συγκολλητούς συνδέσμους με τουλάχιστον ένα υλικό να είναι θερμοπλαστικό πραγματοποιήθηκαν με χρήση συστημάτων laser συνεχούς εκπομπής (CW) [15][16][17][18][19]. Η εκπομπή τέτοιου τύπου παρέχει μια παροχή ενέργειας συνεχούς ροής και χαμηλής έντασης στην ακτινοβολούμενη επιφάνεια δημιουργώντας ομοιόμορφη θέρμανση κατά μήκος της διαδρομής σάρωσης. Την επιθυμητή αυτή συμπεριφορά μπορούμε να τη προσεγγίσουμε μέσω της παλμικής λειτουργίας του laser αυξάνοντας τον κύκλο λειτουργίας

(Duty Cycle) και μειώνοντας την έντασή της ακτινοβολίας. Ως Duty Cycle ορίζεται το κλάσμα μιας περιόδου όπου το σύστημα είναι ενεργό και προκύπτει από το γινόμενο της διάρκειας του παλμού με τη συχνότητα επανάληψης. Σε ένα CW laser η ποσότητα αυτή ισούται με τη μονάδα.

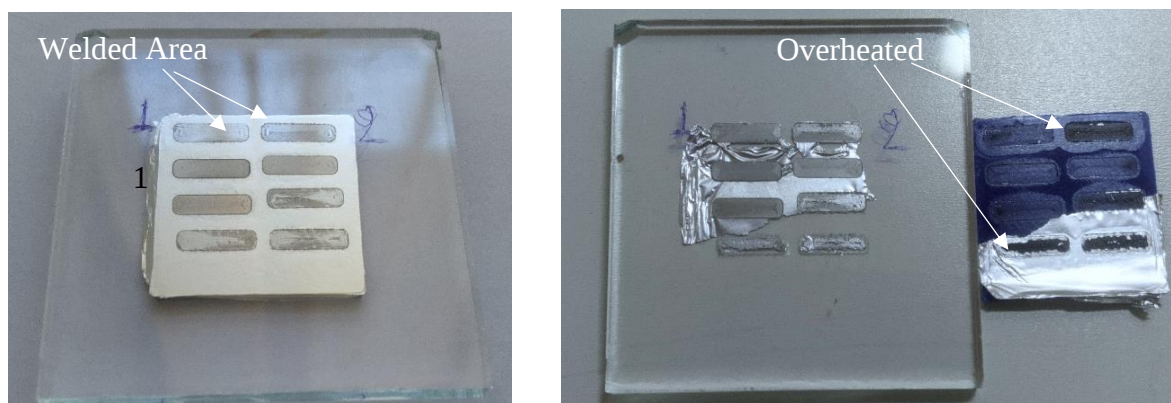
$$D = T * f \quad (7)$$

Ως αναφορά για την άντληση πληροφοριών σχετικά με την αρχική ρύθμιση των συνθηκών χρησιμοποιήθηκε η δημοσίευση των *Nunziante Pagano et al.* [35]. Η συγκόλληση λεπτού φύλλου από PLA και αλουμινόχαρτου ωστόσο σε αυτή τη μελέτη των *Nunziante Pagano et al.* [35] πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο LTW καθιστώντας ως επιφάνεια απορρόφησης αυτή του αλουμινόχαρτου ενώ η δέσμη μεταδίδεται στον όγκο του PLA. Η διαδικασία αυτή βασίστηκε σε ένα παλμικό laser με διάρκεια παλμών 200 ns και συχνότητα 20 kHz. Οι πειραματικές μετρήσεις συσχετίστηκαν μέσω του παράγοντα k που δίνεται από τη σχέση:

$$k = \left(\frac{P}{v}\right) * D \quad [\text{J/mm}] \quad (8)$$

Με $\left(\frac{P}{v}\right)$: ενέργεια ανά μονάδα μήκους
 D : κύκλος λειτουργίας

Για τη διερεύνηση των συνθηκών συγκόλλησης αρχικά έγινε δοκιμή 5 διαφορετικών προφίλ ρυθμίσεων στο ίδιο δείγμα με το ίδιο μοτίβο σάρωσης προκειμένου να εξεταστεί η θερμική κυρίως συμπεριφορά των υλικών. Εξετάζοντας στη συνέχεια αυτές τις περιοχές συγκόλλησης καταλήγουμε στις συνθήκες που απέδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα και πειραματιζόμαστε με βάση αυτές. Κριτήριο αξιολόγησης της συγκόλλησης σε αυτό το στάδιο δεν αποτελεί η αντοχή του συνδέσμου αλλά η μορφολογία της επιφάνειας. Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 51 εξαιτίας της ενέργειας ή και του χρόνου ακτινοβολίας που επιλέχθηκαν για κάποια από τα προφίλ εμφανίζεται υπερθέρμανση του πολυμερούς, σε αυτές τις περιοχές η επιφάνεια είναι έντονα σκουρόχρωμη και με μεγάλη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.



Εικόνα 51 Διερεύνηση παραμέτρων συγκόλλησης σε δείγματα PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί.

Οι συνδυασμοί των προφίλ που προκύπτουν μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων είναι πάρα πολλοί. Για ευκολία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι προτιμότερο να μεταβάλλεται μια παράμετρος κάθε φορά ώστε να γίνεται αντιληπτή η επίδραση της.

	Pulse Duration	Pulse Frequency	Average Power	Scan Speed
Al/Glass Profile	200	40	80, 65, 60	1000, 800, 500, 400
PLA/Al Profile		200, 150, 120, 100	80, 75, 60, 40, 35, 30	100, 10, 5, 4, 3, 2, 1,5

Πίνακας 8 Συνδυασμοί παραμέτρων που διερευνήθηκαν.

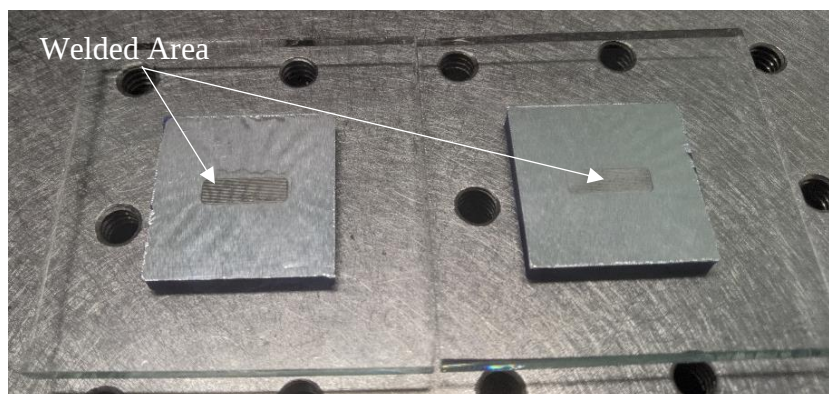
Στον πίνακα 9 αναγράφονται οι συνθήκες που φαίνεται να αποδίδουν τα καλύτερα θερμικά και μηχανικά αποτελέσματα. Ο παράγοντας k από τη σχέση 8 για το προφίλ συγκόλλησης του PLA με το αλουμινόχαρτο προκύπτει $k = 0,036 \text{ J/mm}$, για τιμές μεγαλύτερες από αυτή παρατηρείται υπερθέρμανση του PLA ενώ για μικρότερες δεν επαρκεί η ροή της ενέργειας ώστε να η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια του PLA με το αλουμίνιο να φτάσει στο σημείο τήξεως.

Welding Parameters		
Parameter	Value	
Materials	PLA- Aluminium Foil - Glass	
Pulse Duration (ns)	200	200
Average Power (Watt)	12 (60%)	6 (30 %)

<i>Pulse Frequency (kHz)</i>	<i>40</i>	<i>120</i>
<i>Pulse Energy (mJ)</i>	<i>0,3</i>	<i>0,05</i>
<i>Scan Speed (mm/s)</i>	<i>800</i>	<i>4</i>
<i>Passes</i>	<i>2</i>	<i>2</i>
<i>Fill Spacing (mm)</i>	<i>0.1</i>	<i>0.2</i>
<i>Pattern</i>	<i>Parallel Lines (4x12 mm²)</i>	

Πίνακας 9 Παράμετροι συγκόλλησης PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί.

Στην Εικόνα 52 διακρίνεται η περιοχή συγκόλλησης διαστάσεων $4 \times 12 \text{ mm}^2$. Παρατηρούμε ότι στο ένα δείγμα η περιοχή αυτή να είναι έντονα σκουρόχρωμη λόγω της υπερθέρμανσης του θερμοπλαστικού και της διαφυγής αέριων. Επίσης μπορούμε να διακρίνουμε την παραμόρφωση του φύλλου αλουμινόχαρτου γύρω από την περιοχή αυτή να είναι πιο έντονη στο δείγμα το οποίο υπερθερμάνθηκε. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε παραμένουσες θερμικές τάσεις είτε στην παραμόρφωση μεγάλης επιφάνειας του πλαστικού λόγω της τήξης της.



Εικόνα 52 Συγκολλημένα Δείγματα PLA - Αλουμινόχαρτο – Γυαλί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ VIII: ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

Οι σύνδεσμοι δυο υλικών πρέπει να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις εξωτερικές φορτίσεις και να μεταφέρουν τις δυνάμεις αποδοτικά. Μια από τις φορτίσεις που μπορεί να παραλάβουν συχνά οι σύνδεσμοι τύπου επικάλυψης είναι ο εφελκυσμός ή η θλίψη. Για μικρές παραμορφώσεις και ψαθυρά υλικά όπως το γυαλί μπορούμε να υποθέσουμε πως οι τάσεις κατά τη διεύθυνση φόρτισης του εφελκυσμού ή της θλίψης είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσονται κατά το πάχος. Επίσης η φόρτιση στη περιοχή της διεπιφάνειας είναι διατμητική, με τις συνδεόμενες πλάκες να καταπονούνται σε εφελκυσμό (ή θλίψη) χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η καμπτική ροπή που ενεργεί στα άκρα της κόλλησης και επηρεάζει το τασικό πεδίο. Λόγω της χαμηλής δυσθραυστότητας και της ψαθυρότητας του γυαλιού είναι δύσκολο να δοκιμαστεί η συμπεριφορά του συνδέσμου με τη διενέργεια της δοκιμής εφελκυσμού, καθώς η φύση του γυαλιού θέτει τεχνικά προβλήματα.



Εικόνα 53 Γεωμετρία Lap Joint

Τα βασικότερα από τα προβλήματα που χρειάστηκε να αντιμετωπιστούν κατά την αρχική προσέγγιση των πειραμάτων αντοχής με χρήση της γεωμετρική διάταξη που φαίνεται στην εικόνα 53 ήταν η θραύση του γυαλιού στην αρπάγη της μηχανής ακόμη και με τη χρήση μεταλλικών επιθεμάτων (tabs) καθώς επίσης και η θραύση του στο άκρο της συγκόλλησης λόγω της καμπτικής ροπής που αναπτύσσεται από την έκκεντρη φόρτιση. Προς επίλυση αυτών των προβλημάτων η γεωμετρία του συνδέσμου άλλαξε και η μέτρηση της διατμητικής αντοχής έγινε με βάση το πρότυπο ASTM D-4501. Η αντοχή υπολογίζεται από τη μέγιστη διατμητική δύναμη που μπορεί να φέρει ο σύνδεσμος επικάλυψης μονού επιθέματος μέχρι την αστοχία του, ανηγμένη στην επιφάνεια συγκόλλησης.

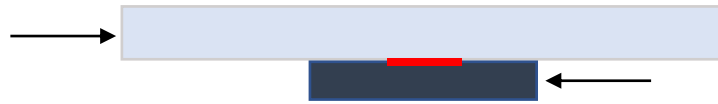
$$\tau = \frac{P}{A} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Με

P: διαμήκη δύναμη (N)

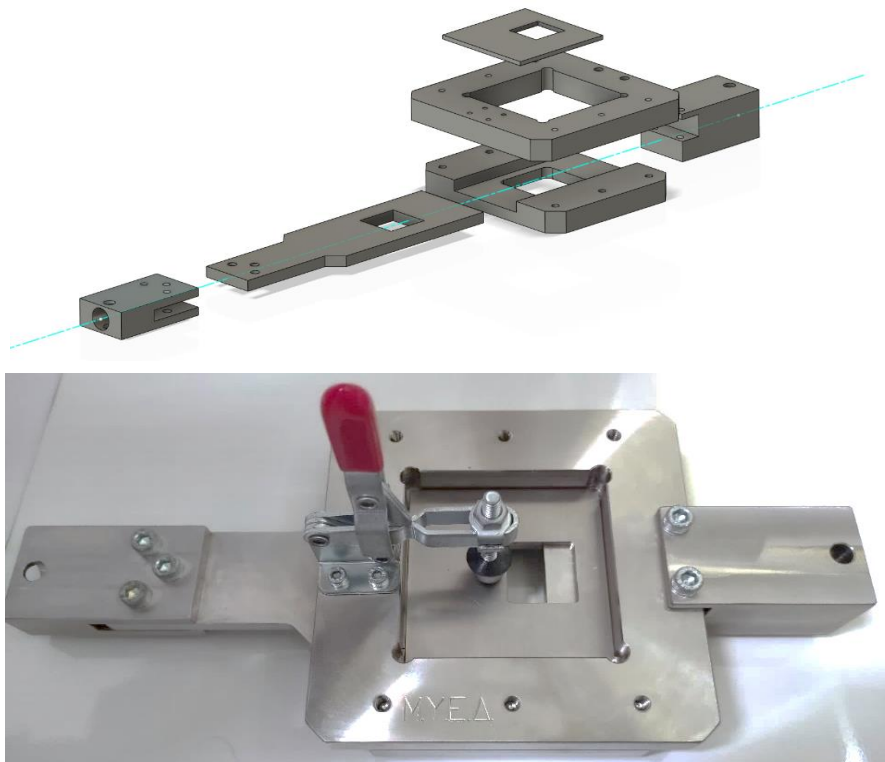
A: εμβαδό συγκόλλησης (mm²)

Η μεθοδολογία της εκτέλεσης του πειράματος διάτμησης περιγράφεται εντός του προτύπου, σύμφωνα με το οποίο τα δείγματα τοποθετούνται εντός ειδικής ιδιοσυσκευής. Θα πρέπει εδώ να διευκρινιστεί ότι σε αυτού του τύπου το πείραμα προσδιορίζεται η αντοχή της συγκόλλησης σε διάτμηση και όχι η αντοχή του ενιαίου συνδέσμου.



Εικόνα 54 Γεωμετρία συνδέσμου επικάλυψης κατά ASTM D-4501

Η ιδιοσυσκευή αποτελείται από το κύριο σώμα όπου τοποθετείται και συγκρατείται το δείγμα και από το σύστημα διάτμησης. Το σύστημα διάτμησης ολισθαίνει εντός του σώματος της ιδιοσυσκευής και παρασύρει το μικρότερο σε μέγεθος πλακίδιο. Η φόρτιση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση είναι διατμητική και εν αντιθέσει με τη προηγούμενη γεωμετρία του συνδέσμου δεν υπάρχει η επίδραση της καμπτικής ροπής. Τα μηχανολογικά σχέδια της ιδιοσυσκευής δεν υπήρχαν διαθέσιμα και για το λόγο αυτό έγινε διαστασιολόγηση, σχεδιασμός και κατασκευή της (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ).

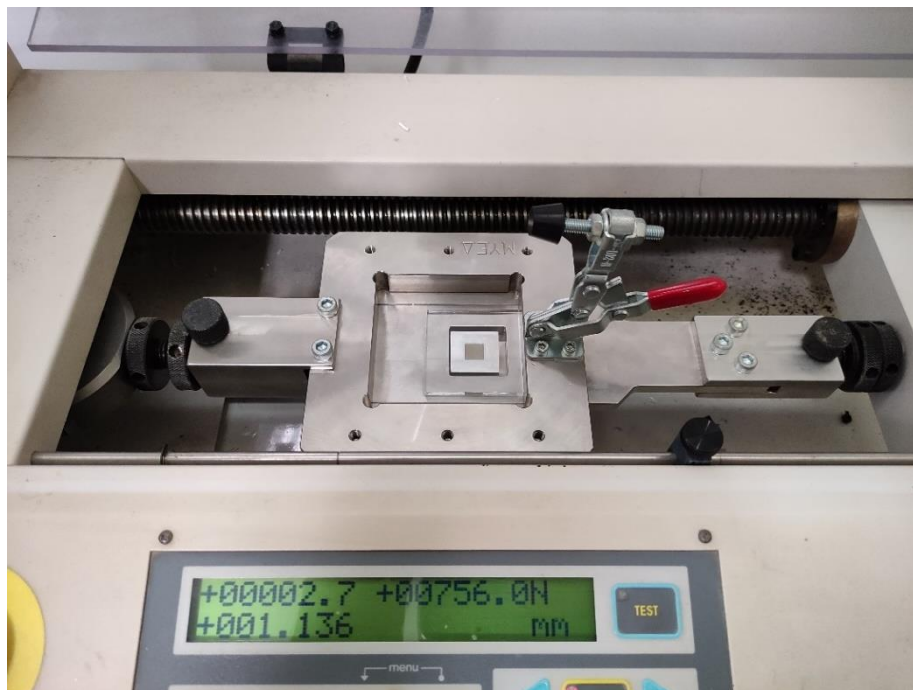


Εικόνα 55 Το μοντέλο CAD της ιδιοσυσκευής διάτμησης και η κατασκευή της από ανοξείδωτο χάλυβα

Τα κατασκευαστικά σχέδια των μελών της ιδιοσυσκευής έγιναν στο σχεδιαστικό πακέτο *Autodesk Fusion 360* και στη συνέχεια παραδοθήκαν στο μηχανουργείο του Πανεπιστημίου Πατρών όπου και υλοποιήθηκαν με υλικό κατασκευής ανοξείδωτο χάλυβα. Η θήκη στο σώμα της ιδιοσυσκευής μπορεί να δεχθεί δείγματα διαστάσεων έως $80 \times 80 \times 13 \text{ mm}^3$ ενώ η οπή στη λεπίδα διάτμησης είναι διαστάσεων $30 \times 30 \text{ mm}^2$.

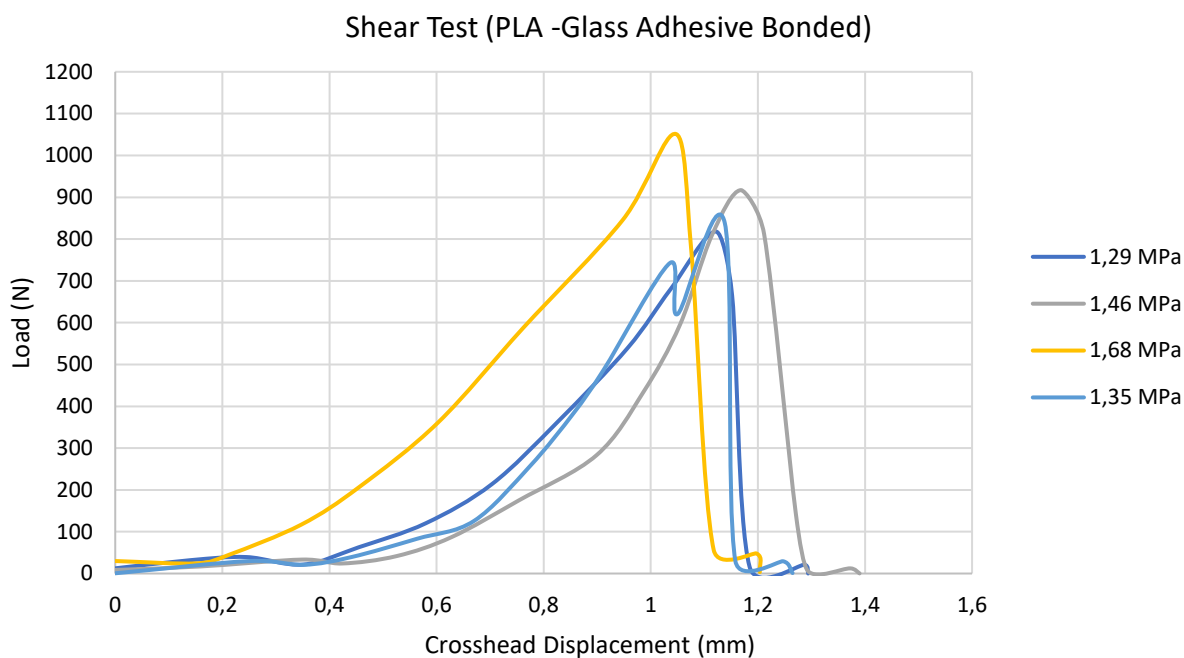
8.1 Αποτελέσματα Δοκιμής Διάτμησης

Για συγκριτικούς λόγους κατασκευάστηκαν δείγματα συνδέσμων Αλουμίνιου – Γυαλιού και PLA- Αλουμινόχαρτου - Γυαλιού συγκολλημένα με κολλά δυο συστατικών *Bison Epoxy*. Η σύνδεση των υλικών με χρήση συγκολλητικής ουσία αποτελεί μια συμβατική μέθοδο και είναι η βάση σύγκρισης για τη νέα τεχνική συγκόλλησης με laser. Η μηχανή εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας *HOUNSFIELD (H5K-W)* με τις δυο κεφαλές της μηχανής να είναι τοποθετημένες σε οριζόντια διάταξη χωρίς οπότε να επηρεάζει το βάρος της ιδιοσυσκευής την όλη πειραματική διαδικασία. Ο ρυθμός μετατόπισης της κεφαλής είναι ο ελάχιστος που μπορεί να παρέχει η μηχανή, 1.5 mm/min . Κατά την τοποθέτηση του δείγματος εντός της ιδιοσυσκευής είναι απαραίτητο να ελεγχθεί το δείγμα ως προς τη παραλληλία των πλευρών του με τις αντίστοιχες επιφάνειες που έρχεται σε επαφή.

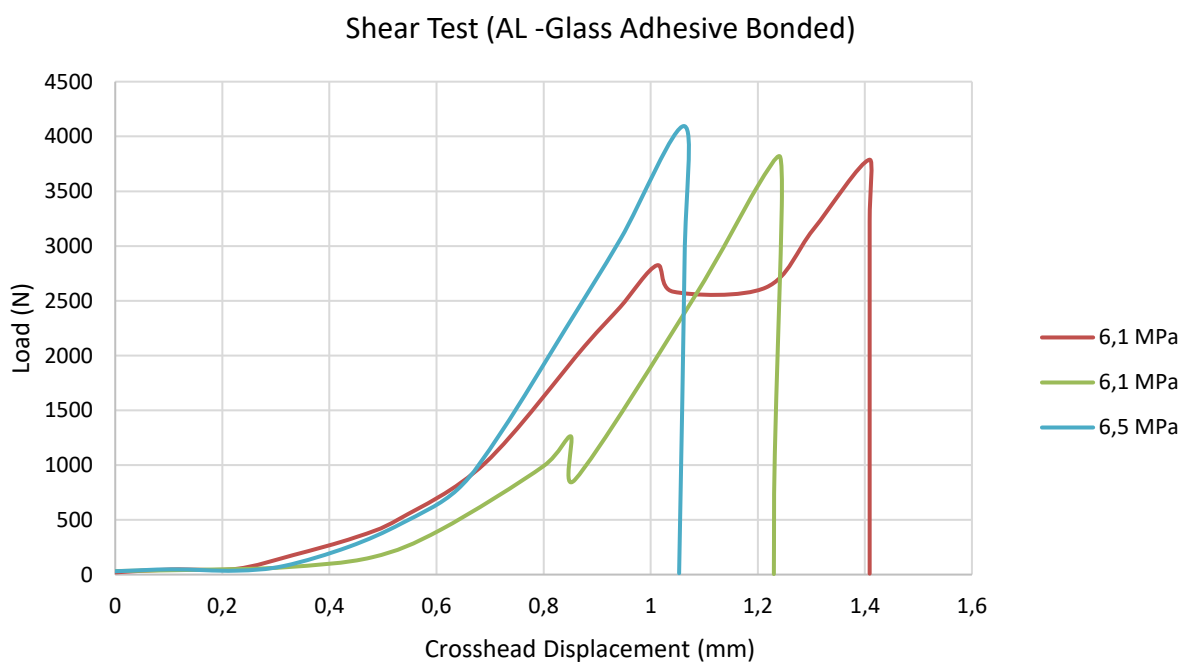


Εικόνα 56 Η μηχανή εφελκυσμού με αναρτημένη την ιδιοσυσκευή διάτμησης και το δοκίμιο τοποθετημένο.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες διατμητικής δύναμης και μετατόπισης της κινούμενης κεφαλής. Ο υπολογισμός της μέγιστης διατμητικής τάσης έγινε με βάση την εξίσωση 9 για επιφάνεια συγκόλλησης ίση με $A = 25 \times 25 \text{ mm}^2$.



Διάγραμμα 4 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων PLA-Glass με κόλλα



Διάγραμμα 5 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων Al - Glass με κόλλα.

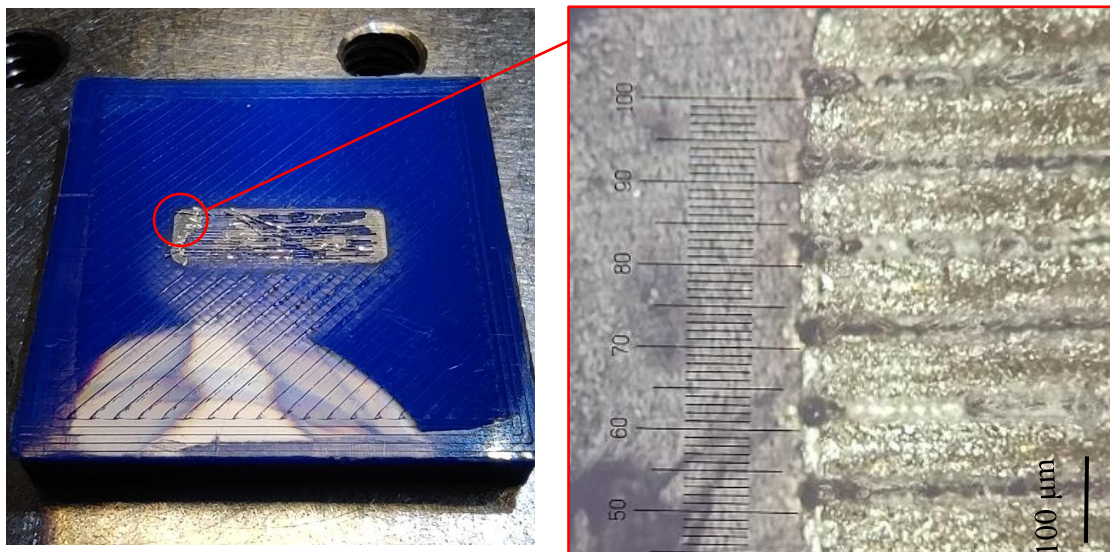
Material Combination (Adhesive Joints)	Shear Stress Test	
	Mean Value (MPa)	Standard Deviation (MPa)
PLA - Glass	1,44	0,17
Aluminum - Glass	6,23	0,23

Πίνακας 10 Μέση Διατμητική Αντοχή των συνδέσμων με κόλλα.

Η ίδια διαδικασία δοκιμής ακολουθήθηκε και για τους συνδέσμους που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο του laser. Η ιδιαιτερότητα εδώ ωστόσο βρίσκεται στον υπολογισμό της επιφάνειας συγκόλλησης. Η ενεργή επιφάνεια για όλα τα μοτίβα συγκόλλησης υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το συνολικό μήκος της διαδρομής σάρωσης με το πάχος των γραμμών. Η εκτίμηση της επιφάνειας έγινε με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου, χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη κλίμακα, όπου κάθε υποδιαίρεση αντιστοιχεί σε 10 μm . Παρατηρούμε ότι το πάχος της κάθε γραμμής στους συνδέσμους PLA – Αλουμινόχαρτο - Γυαλί είναι κατά μέσο όρο $D = 75 \mu\text{m}$ (εικόνα 57) και η μέτρηση αυτή επιβεβαιώθηκε με 5 δείγματα όπου βρέθηκε σε όλα το πάχος να είναι το ίδιο με μια μικρή βέβαια διακύμανση. Το σύνολο των γραμμών είναι $N = 36$ με μήκος $L = 12 \text{ mm}$ η κάθε μια. Η συνολική επιφάνεια συνεπώς υπολογίζεται από :

$$A_{PLA} = L * N * D \quad (10)$$

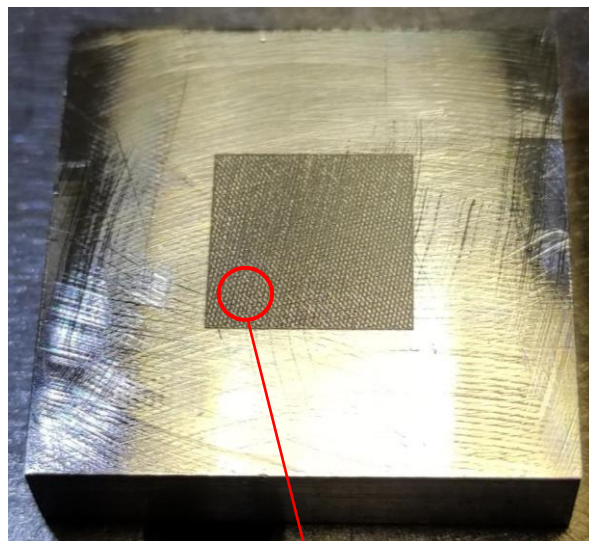
$$A_{PLA} = 12 \text{ mm} * 36 * 0,075 \text{ mm} = 32,40 \text{ mm}^2$$



Εικόνα 57 Παρατήρηση της περιοχής συγκόλλησης PLA-Al Foil -Glass με οπτικό μικροσκόπιο.

Αντίστοιχα υπολογίζεται και η επιφάνεια συγκόλλησης για τους συνδέσμους Αλουμινίου-Γυαλιού με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου. Αρχικά μετράται το πάχος των γραμμών που απαρτίζουν το πλέγμα και στη συνέχεια υπολογίζεται το συνολικό μήκος των γραμμών του πλέγματος μέσω του λογισμικού Image J. Όπως και προηγουμένως, αρχικά έγιναν μετρήσεις με τη βοήθεια της ενσωμάτωσης κλίμακας του μικροσκοπίου και βρέθηκε για το κάθε δείγμα διαφορετικό πάχος γραμμής D , επίσης από το λογισμικό εκτιμάται το ολικό μήκος των γραμμών $L = 960 \text{ mm}$ (για Fill Spacing = 0.2 mm), επειδή ωστόσο η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων είναι σημαντική υπολογίζεται η ενεργή επιφάνεια συγκόλλησης του κάθε δοκιμίου μεμονωμένα από την ακόλουθη σχέση :

$$A_{Al} = L * D \text{ mm}^2$$

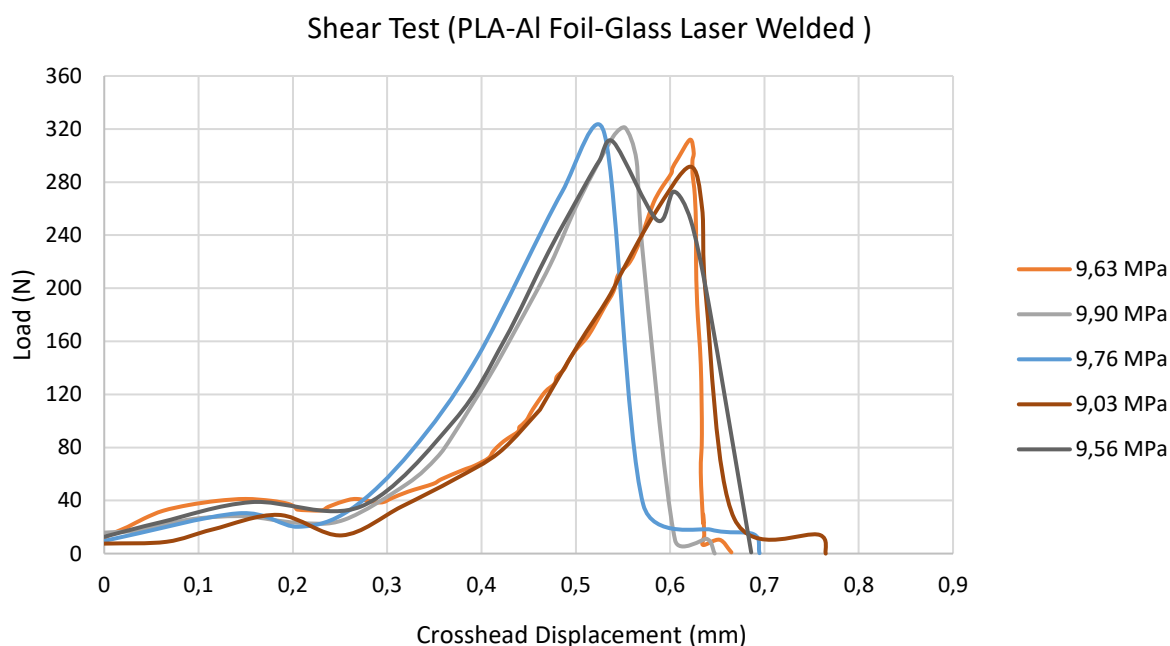


Εικόνα 58 Παρατήρηση της περιοχής συγκόλλησης Al-Glass με οπτικό μικροσκόπιο.

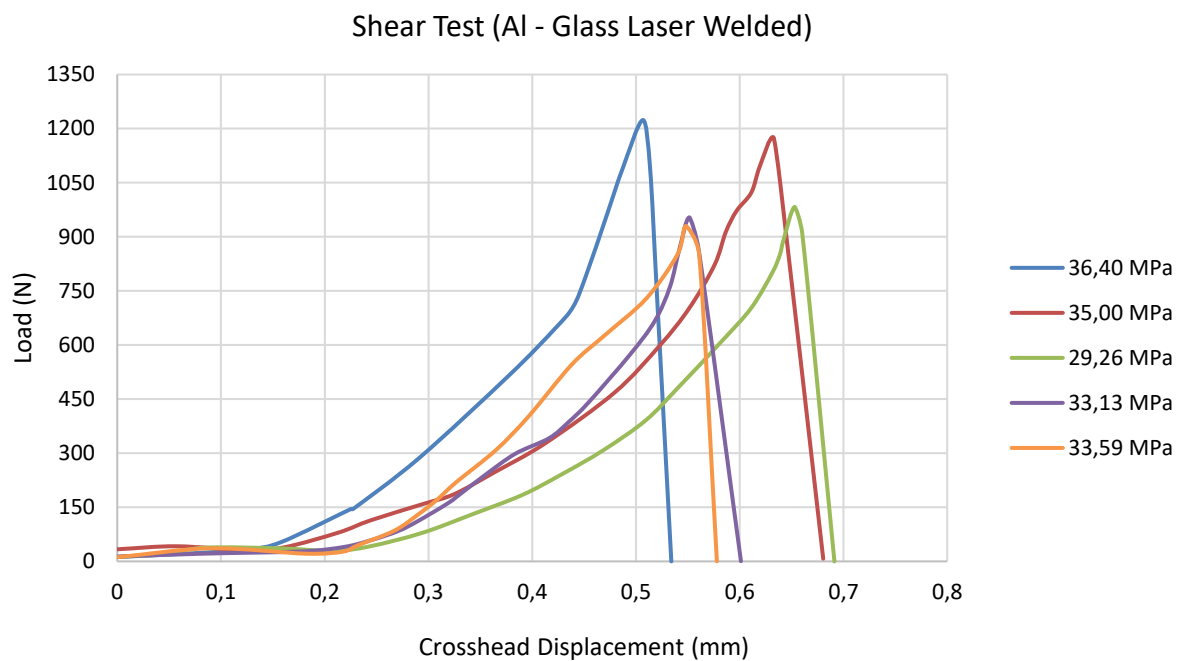
Sample	Max Shear Force	Line Width (μm)	Welded Surface (mm^2)	Shear Strength (MPa)
1	1223	35	33,6	36,40
2	1176	35	33,6	27,22
3	983	35	33,6	22,75
4	954	30	28,8	33,12
5	848	30	28,8	29,44

Πίνακας 11 Οργανωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων Al-Glass

Έπειτα από τον υπολογισμό των ενεργών επιφανειών συγκόλλησης με Laser για τα δείγματα PLA- Αλουμινόχαρτο – Γυαλί και Αλουμίνιο – Γυαλί χρησιμοποιούμε τη σχέση 9 για την εύρεση της μέγιστης διατμητικής πριν την αστοχία του συνδέσμου. Στα επόμενα διαγράμματα παρατίθενται οι καμπύλες διατμητικής δύναμης και μετατόπισης της κινούμενης κεφαλής.



Διάγραμμα 6 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων PLA- Al Foil -Glass με Laser



Διάγραμμα 7 Διατμητικής Δύναμης – Μετατόπισης συνδέσμων Al - Glass με Laser

Material Combination (Laser Joints)	Shear Stress Test	
	Mean Value (MPa)	Standard Deviation (MPa)
PLA-Al Foil – Glass (5 Samples)	9,57	0,33
Aluminium – Glass (5 Samples)	32,80	2,91

Πίνακας 12 Μέση Διατμητική Αντοχή των συνδέσμων με Laser.

8.2 Στατιστική Μελέτη της Αντοχής των Συνδέσμων

Κατά τη φόρτιση ενός ψαθυρού υλικού, όπως είναι για παράδειγμα το γυαλί, είναι πιθανόν η αστοχία να συμβεί πριν την αναμενομένη αντοχή προκαλώντας μη αναμενομένη βλάβη στην κατασκευή μας. Υπάρχει συνεπώς ένα ρίσκο το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό με ψαθυρά υλικά ώστε να βρισκόμαστε στην ασφαλή περιοχή λειτουργίας ή να γνωρίζουμε τουλάχιστον την πιθανότητα αστοχίας. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην ύπαρξη ατελειών και μικρορωγμών στον όγκο τους. Οι περιοχές αυτές είναι και τα πιθανά σημεία έναρξης των ρωγμών καθώς εμφανίζονται μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων. Στα όλκιμα υλικά η συμπεριφορά αυτή δεν είναι σημαντική διότι έχουμε ανακούφιση των τάσεων στις περιοχές αυτές μέσω του μηχανισμού πλαστικής διαρροής του υλικού. Η διαδικασία δημιουργίας των συνδέσμων με τη χρήση Laser εισάγει ατέλειες στο όγκο του γυαλιού επηρεάζοντας με στοχαστικό τρόπο την αντοχή τους. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η στατιστική ανάλυση αντοχής.

Η στατιστική ανάλυση επιβίωσης (survival analysis) βασίζεται στη μέθοδο που ανακάλυψε ο Σουηδός μηχανικός Weibull. Ο ίδιος καθόρισε την πιθανότητα επιβίωσης $P_s(\sigma)$ ως το κλάσμα πανομοιότυπων δειγμάτων, το καθένα με όγκο V_0 , τα οποία επιβιώνουν πέραν της φόρτισης σ ενός πειράματος αντοχής και δίνεται από τη σχέση

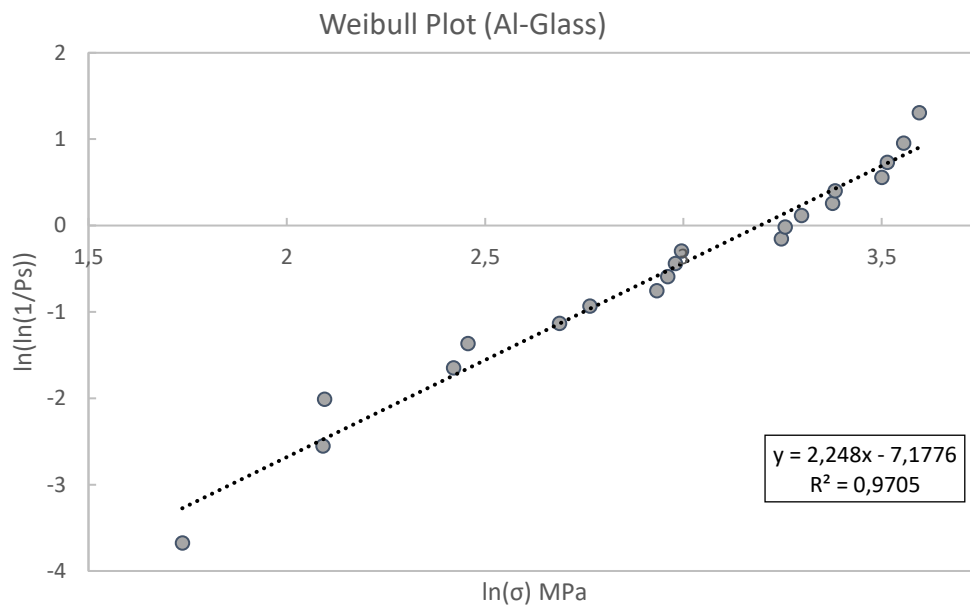
$$P_s(\sigma) = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (11)$$

όπου σ_0 και m είναι σταθερές. Στη περίπτωση που θέτουμε $\sigma = \sigma_0$ στη σχέση 11 βρίσκουμε $P_s(\sigma) = 1/e$, οπότε σ_0 είναι η τάση στην οποία επιβιώνει το 37% ($1/e$) των δοκιμίων. Η σταθερά m (Weibull modulus) φανερώνει πόσο γρήγορα μειώνεται η αντοχή πλησιάζοντας την σ_0 , όσο μικρότερη η τιμή της m τόσο πιο μεγάλη η διακύμανση στις τιμές της αντοχής. Ο προσδιορισμός των δυο σταθερών σ_0 και m γίνεται μέσω του διαγράμματος του $\ln(\ln(1/P_s))$ συναρτήσει του φυσικού λογάριθμου της τάσης, $\ln(\sigma)$. Η μορφή του διαγράμματος προκύπτει γράφοντας τη σχέση 11 στην ακόλουθη μορφή

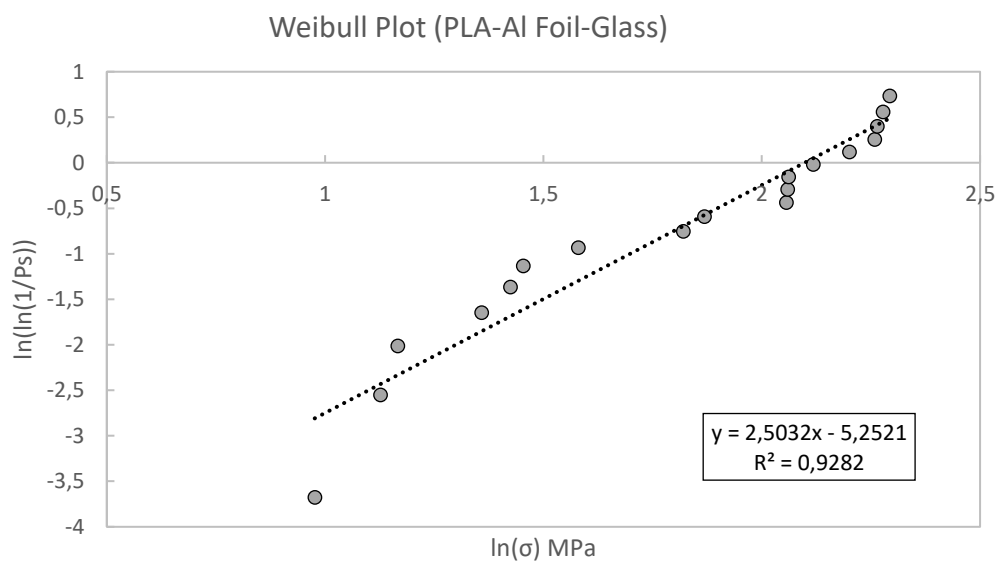
$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0) \quad (12)$$

Καθώς γνωρίζουμε μόνο ένα πλήθος πειραματικών τιμών, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων για την εύρεση της ευθείας που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα μας.

Από τους συντελεστές της εξίσωσης της ευθείας αυτής βρίσκουμε στη συνέχεια τις σταθερές μας. Η ανάλυση γίνεται για τα δείγματα που συγκολλήθηκαν με το Laser. Για τον πρώτο συνδυασμό υλικών (αλουμίνιο, γυαλί) χρησιμοποιήθηκαν 20 δείγματα ενώ για το δεύτερο συνδυασμό (PLA, αλουμινόχαρτο, γυαλί) 17 δείγματα.

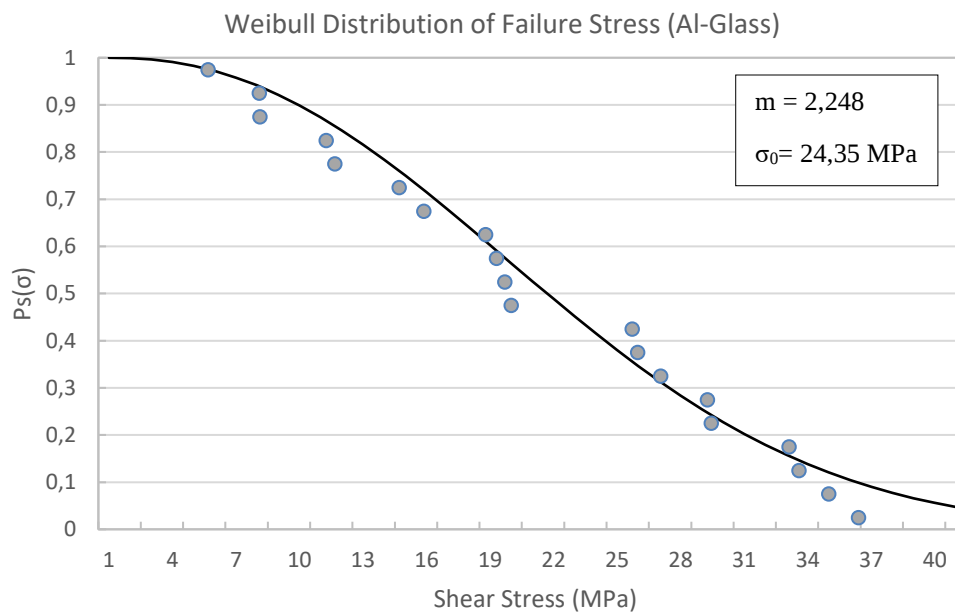


Διάγραμμα 8 Weibull Plot των συνδέσμων Al – Glass (Linear Fitting).

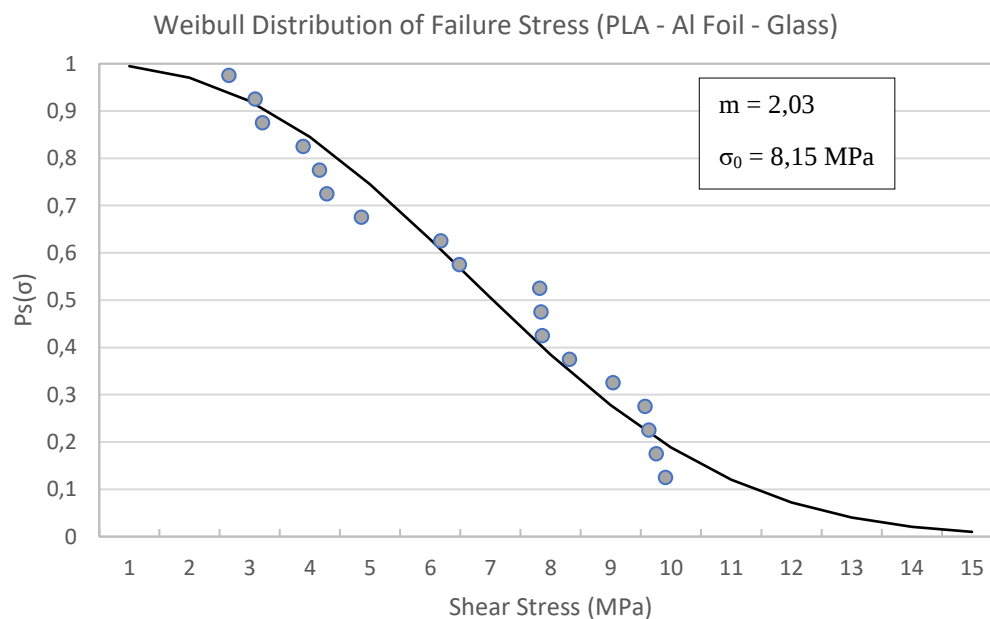


Διάγραμμα 9 Weibull Plot των συνδέσμων PLA- Al Foil – Glass (Linear Fitting).

Παρατηρούμε ότι σχεδόν όλα τα σημεία του διαγράμματος, τα οποία απεικονίζουν τα πειραματικά δεδομένα, βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση από την ευθεία και ο συντελεστής R^2 πλησιάζει τη μονάδα, ειδικά για την περίπτωση των συνδέσμων Αλουμίνιου - Γυαλίου. Η προσαρμογή λοιπόν των δεδομένων στην γραφική παράσταση της γραμμικής εξίσωσης της ευθείας είναι αποδεκτή.



Διάγραμμα 10 Weibull Distribution των συνδέσμων Al – Glass.



Διάγραμμα 11 Weibull Distribution των συνδέσμων PLA - Al – Glass.

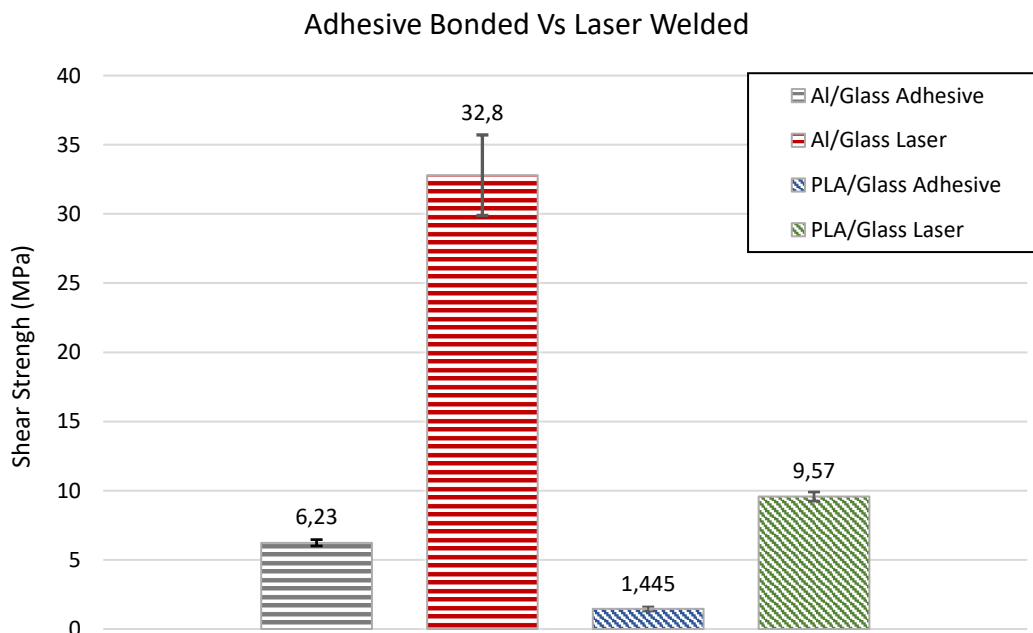
Βάσει των διαγραμμάτων Weibull είναι εφικτό να εξάγουμε την πιθανότητα επιβίωσης του συνδέσμου υπό την διατμητική φόρτιση που πρόκειται να παραλάβει. Για παράδειγμα για τους συνδέσμους Αλουμινίου- Γυαλίου η πιθανότητα επιβίωσης διατμητικών τάσεων 14,5 MPa είναι 80% και για τους συνδέσμους PLA- Αλουμινόχαρτο- Γυαλί έχουν αντίστοιχα πιθανότητα 80% να αντέξουν φόρτιση 4,5 MPa ενώ η τάση σ_0 στην οποία επιβιώνει το 37% ($1/e$) των δοκιμίων είναι 24,35 MPa και 8,15 MPa αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΧ: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι συγκολλητοί σύνδεσμοι με χρήση Laser φαίνεται να αποδίδουν αυξημένη διατμητική αντοχή σε σύγκριση με τους αντίστοιχους συνδέσμους κόλλας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής για τους συνδέσμους Laser είναι σε τεράστιο βαθμό βελτιωμένα με την αντοχή να αυξάνεται κατά 426 % για τους δοκίμια Αλουμίνιου - Γυαλιού και 565 % για τα δοκίμια PLA – Γυαλιού. Αναμφισβήτητα λοιπόν η νέα τεχνική σύνδεσης με τη χρήση Laser είναι σημαντικά αποδοτικότερη και με προοπτικές χρήσης στη βιομηχανία χάρη στην αμεσότητα, ευελιξία και ποιότητα των συνδέσμων που δύναται να προσφέρει. Στον πίνακα 13 και το διάγραμμα 12 παρουσιάζονται τα εν λόγω συγκριτικά αποτελέσματα.

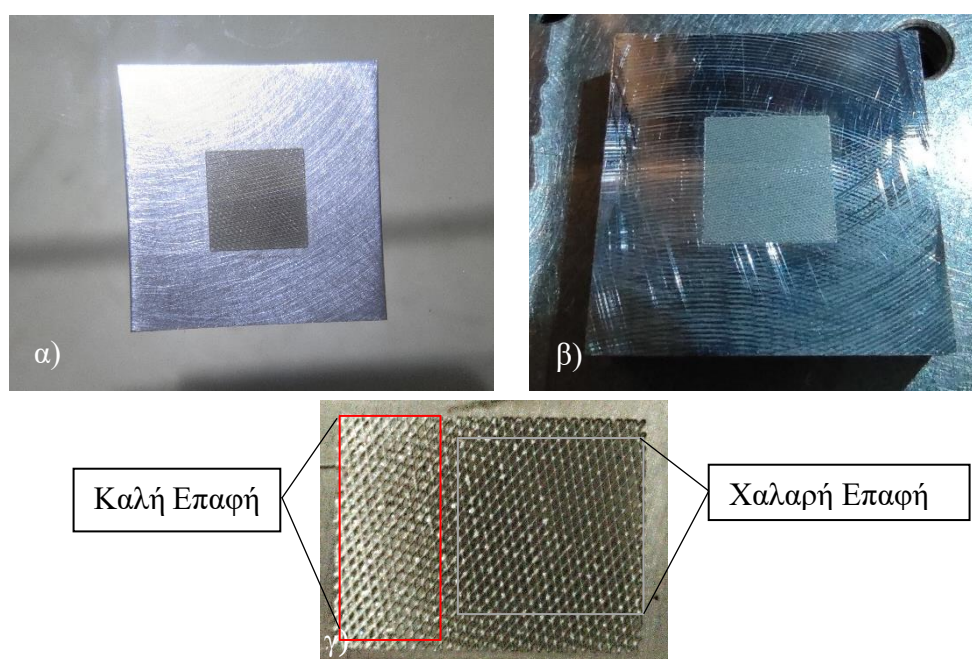
<i>Material Combination</i>	<i>Average Shear Strength</i>		
	Adhesive Bonded Joints	Laser Assisted Joints	Strength Increment
<i>Aluminum - Glass</i>	6,23 MPa	32,8 MPa	426,5 %
<i>PLA - Glass</i>	1,44 MPa	9,57 MPa	564,6 %

Πίνακας 13 Συγκριτικός Πίνακας αποτελεσμάτων αντοχής για τις δυο μεθόδους συγκόλλησης



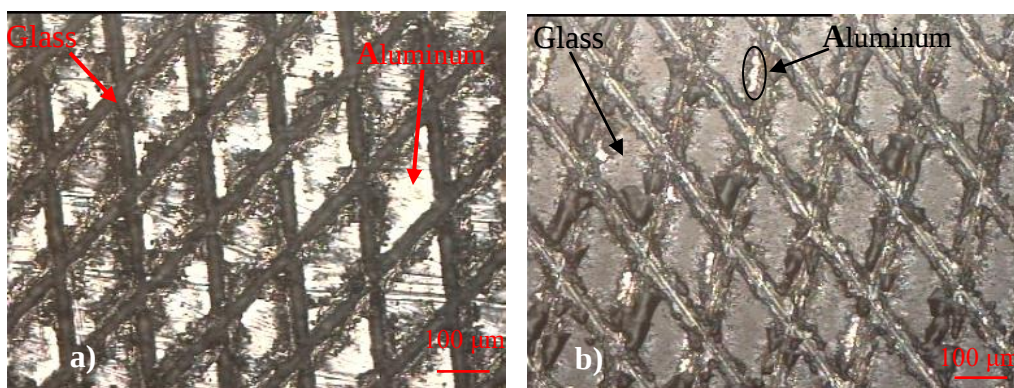
Διάγραμμα 12 Συγκριτικό διάγραμμα της αντοχής των συνδέσμων με τη χρήση κόλλας και Laser

Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού σύνδεσης των υλικών μεταξύ τους, ο οποίος προσφέρει τόσο υψηλή αντοχή, παρατηρούμε τις περιοχές συγκόλλησης με οπτικό μικροσκόπιο. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα το γυαλί είναι διαφανές για μήκος κύματος 1064 nm και η ένταση της ακτινοβολίας $I_{peak} = 314 \text{ MW/cm}^2$ δεν προκαλεί την οπτική διηλεκτρική κατάρρευση του καθώς είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτή που απαιτείται ($10^{12} \text{ W/cm}^2 \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$) [21], η απορρόφηση συνεπώς της ακτινοβολίας συμβαίνει στην επιφάνεια του μετάλλου με γραμμικό τρόπο. Για τους παλμούς nanosecond η διάρκεια τους είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το ρυθμό ψύξης των ηλεκτρονίων ο οποίος είναι στη χρονική κλίμακα του 1 picosecond, έτσι τα διεγερμένα ηλεκτρόνια μεταδίδουν την ενέργεια τους στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά το επαρκές αυτό χρονικό διάστημά. Η απορροφούμενη ενέργεια της δέσμης αρχικά θερμαίνει την επιφάνεια πρόσπτωσης στο σημείο τήξης του μετάλλου και στη συνέχεια στη θερμοκρασία ζέσεως, ατμοί του αλουμινίου αρχίζουν να εκλύονται από την επιφάνεια μαζί με σταγονίδια τηγμένου μετάλλου στο χρονικό διάστημά μεταξύ 2 και 5 ns έπειτα από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια [37]. Η θερμότητα μεταδίδεται και στο γυαλί προκαλώντας σημειακά την τήξη του. Εντός της κοιλότητας που δημιουργείται στη διεπιφάνεια των δυο υλικών γίνεται ανάμειξη των τηγμάτων και κατά τη στερεοποίηση δημιουργείται η κόλληση. Αν υπάρχει κενό μεταξύ του γυαλιού και του μετάλλου στη περιοχή της διεπιφάνειας τότε το τήγμα μαζί με ατμούς διαφεύγουν από την κοιλότητα προκαλώντας αφαίρεση υλικού.

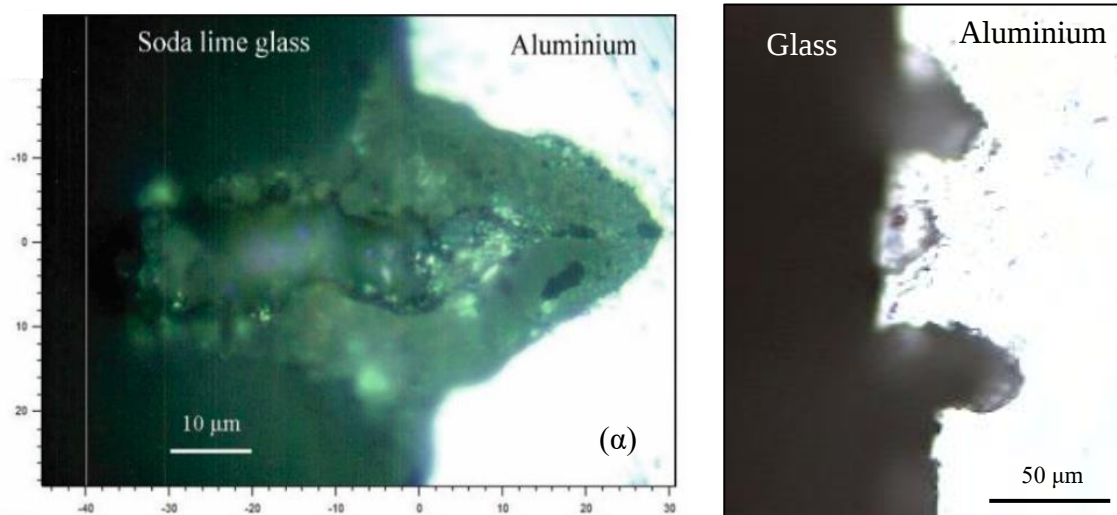


Εικόνα 59 α) Δείγμα με κακή επαφή μεταξύ των δυο υλικών β) Δείγμα με καλή επαφή μεταξύ του γυαλιού και του αλουμινίου γ) Δείγμα με χαλαρή επαφή στις σκουρόχρωμες περιοχές.

Το δείγμα της εικόνας 59 (α) είναι παράδειγμα της περίπτωσης όπου μεταξύ των δυο επιφανειών υπάρχει κενό, η σκούρα απόχρωση στην περιοχή της συγκόλλησης αποτελεί ένδειξη διαφυγής αέριων από την κοιλότητα του τήγματος. Στην δεύτερη εικόνα ωστόσο παρατηρούμε πόσο πιο ανοιχτόχρωμη είναι η περιοχή καθώς η μηχανουργική κατεργασία στην οποία έχει υποβληθεί το πλακίδιο αλουμινίου προσφέρει καλύτερη επιπεδότητα και συνεπώς πολύ καλή τοπική επαφή των υλικών, ενώ πρέπει επίσης να σημειωθεί πως τα δυο δείγματα είχαν μεγάλη απόκλιση στην μηχανική αντοχή του συνδέσμου. Στην εικόνα 60 (α) διακρίνεται επάνω στην επιφάνεια του αλουμινίου το πλέγμα συγκόλλησης με σκούρο χρώμα, οι γραμμές έχουν πλάτος περίπου 35 μm . Στις αυλακώσεις που δημιουργούνται κατά την ακτινοβολή στο μέταλλο, βλέπε εικόνα 61, έχει γίνει εισχώρηση του γυαλιού. Με τη τεχνική της φασματοσκοπίας Raman παρέχεται η δυνατότητα καλύτερης μελέτης της περιοχής συγκόλλησης και η απόκτηση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας των αντιδράσεων που συνοδεύουν τη συγκόλληση, ωστόσο η μελέτη αυτή ξεπερνά τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής. Για το δείγμα της εικόνας 61 (α) έχει πραγματοποιηθεί φασματοσκοπία Raman με ιδιαίτερα ενδιαφέροντα αποτελέσματα αναφορικά με τη περιοχή συγκόλλησης καθώς φαίνεται να σχηματίζονται εκτεταμένες περιοχές νανοκρυσταλλιτών πυριτίου Si, τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι διαθέσιμα στη δημοσίευση ‘P. Floropoulos, V. Karoutsos, K. Turlouki, G. Papanicolaou, and D. Alexandropoulos, “Glass-to-Aluminum Joints Using Industrial Nanosecond IR Fiber Lasers,” in *Conference on Lasers and Electro-Optics (2021)*, paper ATh2R.4, May 2021, p. ATh2R.4. doi: 10.1364/CLEO_AT.2021.ATh2R.4.’.

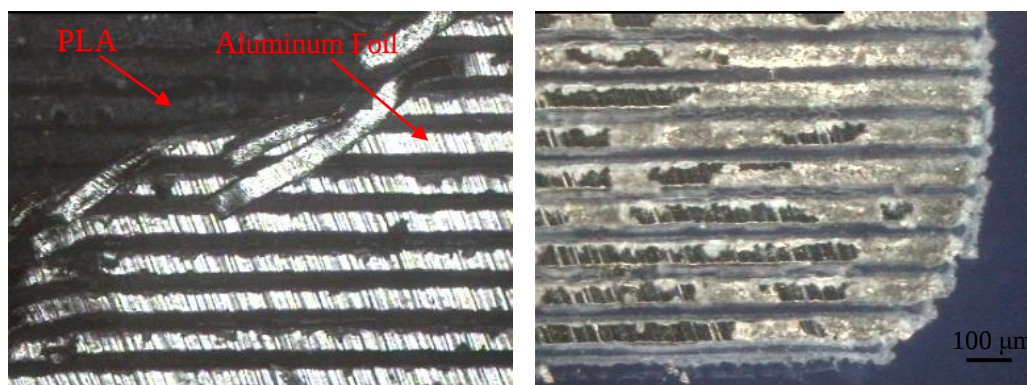


Εικόνα 60 α) Εικόνα από το οπτικό μικροσκόπιο στην επιφάνεια συγκόλλησης του αλουμινίου (πάχος γραμμών 35 μm) β) Εικόνα από το οπτικό μικροσκόπιο στην επιφάνεια συγκόλλησης του γυαλιού.



Εικόνα 61 Εγκάρσια τομή στη περιοχή συγκόλλησης, το βάθος διείσδυσης είναι σχεδόν 30 μm .

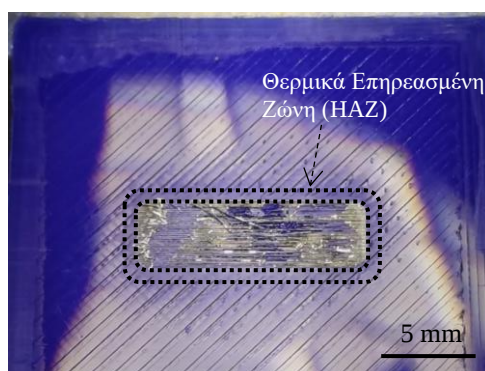
Αναφορικά με τους συνδέσμους PLA – Αλουμινόχαρτο – Γυαλί ο μηχανισμός συγκόλλησης του αλουμινόχαρτου με το γυαλί είναι ίδιος ωστόσο η σύνδεση του αλουμινόχαρτου στο θερμοπλαστικό πραγματοποιείται με διαφορετική μέθοδο. Για τη συγκόλληση του συνδυασμού αυτών των τριών ανόμοιων υλικών χρησιμοποιούνται δυο προφίλ παραμέτρων. Σε πρώτο χρόνο και με το ένα προφίλ συγκολλάται το αλουμινόχαρτο στο γυαλί ενώ ταυτόχρονα προθερμαίνεται η επιφάνεια συγκόλλησης του θερμοπλαστικού. Η ταχύτητα συγκόλλησης του αλουμινόχαρτου στο γυαλί είναι μεγάλη με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο θερμοπλαστικό να μην ανέρχεται στο σημείο τήξεως του πλαστικού. Με το δεύτερο προφίλ δια της μεθόδου Direct Laser Welding (DLW) η ακτινοβολία απορροφάται από τη μεταλλική επιφάνεια του αλουμινίου και το μεγαλύτερο μέρος της μετατρέπεται σε θερμότητα, η θερμότητα μεταδίδεται στον όγκο του υλικού ταχύτατα χάρη στη καλή θερμική αγωγιμότητα του μετάλλου και φτάνει στην επιφάνεια του πλαστικού. Το πλαστικό λιώνει και διαβρέχει την επιφάνεια του αλουμινόχαρτου. Είναι πολύ σημαντικό σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως επιφάνειες του αλουμινόχαρτου είναι σχεδόν λείες με μικρή τραχύτητα, ωστόσο κατά την συγκόλληση του αλουμινόχαρτου στο γυαλί δεν παραμορφώνεται μόνο η επιφάνεια που είναι σε επαφή με το γυαλί αλλά επηρεάζεται και η δεύτερη, που είναι σε επαφή με το θερμοπλαστικό, λόγω του μικρού πάχους του φύλλου αλουμινίου, δημιουργώντας επιφανειακές ανωμαλίες και σημεία αγκίστρωσης για το τηγμένο θερμοπλαστικό αυξάνοντας τη μηχανική πρόσφυση έτσι δραστικά.



Εικόνα 62 Εικόνα της περιοχής συγκόλλησης από το οπτικό μικροσκόπιο στην επιφάνεια του PLA

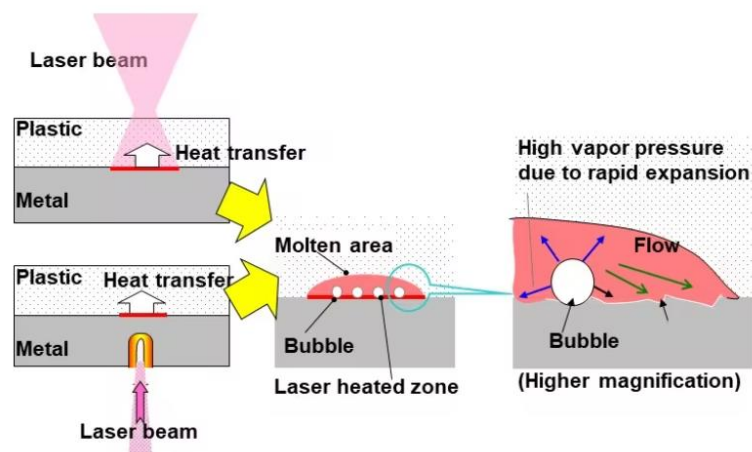
Κατά την αστοχία του συνδέσμου υπό το διατμητική φορτίο το αλουμινόχαρτο αποκολλάται τμηματικά είτε από την επιφάνεια του πλαστικού είτε από την επιφάνεια του γυαλιού χωρίς να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο αστοχίας (εικόνα 62). Στους συνδέσμους που απέδωσαν χαμηλή αντοχή η αστοχία τους οφείλονταν στην αποκόλληση του αλουμινίου από το πλαστικό και όχι από το γυαλί.

Στην εικόνα 63 παρατηρούμε την θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) η οποία είναι σχετικά μικρή και περίπου 0,4 mm περιμετρικά της συγκόλλησης. Η επιφάνεια του PLA στη ζώνη αυτή δεν φαίνεται να έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό ούτε να έχει αλλοιωθεί πάρα τη θερμική ευαισθησία του PLA. Επιπλέον από τη μορφολογία της περιοχής που έχει συγκολληθεί γίνεται αντιληπτό πως η διάχυση της θερμότητας περιορίστηκε σε πολύ μικρό βάθος λόγω της γρήγορης ταχύτητας σάρωσης και της στενευμένης θέρμανσης που επιτυγχάνεται με το Laser. Καλύτερη επαλήθευση αυτής της παρατήρησης θα μπορούσε να γίνει με τη βοήθεια μιας εγκάρσιας τομής στην περιοχή αυτή.



Εικόνα 63 Η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη στην επιφάνεια του PLA

Τέλος κατά την κατασκευή των συνδέσμων προκειμένου να αντιληφθούμε την επίδραση που επιφέρει η ύπαρξη υγρασίας στη συγκολλησιμότητα των θερμοπλαστικών πλακιδίων κάποια από αυτά ξηράνθηκαν πριν την διαδικασία της συγκόλλησης. Το αποτέλεσμα ήταν η διατμητική αντοχή των δειγμάτων αυτών να μειωθεί κατά 80-85 % .



Εικόνα 64 Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας θέρμανσης και συγκόλλησης πλαστικού και μετάλλου.[38].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Hormann et al., 2014) το ποσοστό περιεκτικότητας σε υγρασία στο υλικό συσχετίζεται με την ανάπτυξη φυσαλίδων αέριων κατά τη θέρμανση του πολυμερούς. Ο σχηματισμός φυσαλίδων αέρα στη διεπιφάνεια είναι κυρίως επιθυμητός καθώς η αύξηση της πίεσης βοηθά στη διαβροχή του μετάλλου από το λιωμένο πλαστικό και τον σχηματισμό δεσμών. Ωστόσο, η ύπαρξη πολλών φυσαλίδων μεγάλου όγκου λειτουργούν ως ατέλειες μειώνοντας την μηχανική αντοχή του συνδέσμου [39]. Στα δοκίμια που είχαν υποστεί ξήρανση παρατηρήσαμε τεράστια πτώση στην αντοχή, με το αλουμίνιο να αποκολλάται από το πλαστικό, βάσιμο είναι συνεπώς το συμπέρασμα πως στα δοκίμια αυτά δεν αναπτυχθήκαν φυσαλίδες αέριων στην διεπιφάνεια κάτι που επενέργησε στην ελάχιστη διαβροχή της μεταλλικής επιφάνειας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση της τεχνολογίας Laser φαίνεται να προσφέρει νέες προοπτικές στη συγκόλληση μεταξύ ανόμοιων υλικών όπως είναι τα μέταλλο, γυαλί και το πλαστικό. Η ιδιαίτερη φύση της αλληλεπίδρασης της δέσμης laser με την ύλη προσφέρει νέες δυνατότητες στην βελτίωση της συγκόλλησης υλικών που μέχρι πρότινος γινόταν με συγκολλητικές ουσίες και μηχανικά μέσα (κοχλίες, ήλοι). Υλικά διαφορετικών κλάσεων τείνουν να αντικαθιστούν ολοένα και περισσότερα μονοκόμματα τμήματα ελαφρών κατασκευών λόγω του βέλτιστου αποτελέσματος, συνδυάζοντας τις διαφορετικές ιδιότητες τους, δημιουργώντας έτσι όμως την ανάγκη για αποτελεσματική και αποδοτική σύνδεση μεταξύ αυτών των τμημάτων της κατασκευής. Κατά τη βιβλιογραφική έρευνα συγκεντρώθηκαν πληροφορίες σχετικά με μελέτες που αφορούν στη συγκόλληση συνθέτων υλικών τόσο θερμοπλαστικής όσο και θερμοσκληρυνόμενης μήτρας, θερμοπλαστικών ενώ επιπρόσθετα παρουσιάστηκαν μελέτες συγκόλλησης γυαλιού-γυαλιού και γυαλιού με μέταλλο με παλμικά laser της τάξης Nanosecond και Picosecond. Τα σύνθετα υλικά, θερμοπλαστικής πολυμερικής μήτρας όπως είδαμε είναι σχετικά εύκολο να συγκολληθούν με αλλά θερμοπλαστικά ή με μέταλλα που έχουν υποστεί κατάλληλη επιφανειακή κατεργασία, αναπτύσσοντας ισχυρή μηχανική αντοχή, ωστόσο δεν εντοπίστηκαν δημοσιευμένες αναφορές μελέτης απευθείας συγκόλλησης πολυμερούς με γυαλί παρά μόνο η συγκόλληση μεταξύ αυτών με τη χρήση ενδιάμεσου στρώματος μετάλλου. Όσων αφορά στα σύνθετα υλικά θερμοσκληρυνόμενης μήτρας είναι αδύνατον να συγκολληθούν με χρήση θερμικών μεθόδων όπως είναι η συγκόλληση με laser καθώς δεν τήκονται. Η διαδικασία που εφαρμόζεται σε αυτή τη περίπτωση είναι η χρήση ενδιάμεσης στρώσης θερμοπλαστικού φύλλου το οποίο είτε έχει ενσωματωθεί κατά τον πολυμερισμό του θερμοσκληρυνόμενου στην επιφάνεια είτε η επιφανειακή κατεργασία του πολυμερισμένου πλαστικού ώστε το ενδιάμεσο φύλλο θερμοπλαστικού να αγκυρωθεί στην επιφάνεια όταν τακεί και στερεοποιηθεί ξανά. Κατανοώντας και λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα στοιχεία που μελετήθηκαν βαίνουμε στο συμπέρασμα πως η συγκόλληση για τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή με γυαλί χωρίς τη χρήση ενδιάμεσης θερμοπλαστικής ή μεταλλικής στρώσης στη διεπιφάνεια είναι ίσως απίθανη. Η ‘ενσωμάτωσή’ της ενδιάμεσης στρώσης στην επιφάνεια μπορεί να γίνει κατά τον πολυμερισμό του θερμοσκληρυνόμενου όπως αναφέρεται στο άρθρο με τίτλο ‘Co-curing of thermoset composites on metal structures with reduced cycle times for high-volume car applications’ (Thomas et al., 2020) [26] και στην αναφορά [19] είτε αν πρόκειται για θερμοπλαστική ενδιάμεση στρώση αρκεί η επιφανειακή

τράχυνση του θερμοπλαστικού και η τοποθέτηση της θερμοπλαστικής μεμβράνης στη διεπιφάνεια. Αξιοποιώντας στη συνέχεια τα στοιχεία των δημοσιευμένων ερευνών και το διαθέσιμο εξοπλισμό του εργαστήριου κρίθηκε σκόπιμο στη πειραματική μελέτη να διερευνηθεί η δυνατότητα συγκόλλησης γυαλιού τύπου Extra Clear με Αλουμίνιο καθώς και με PLA. Το PLA επιλέχθηκε με βασικά κριτήριά την ικανότητα του να αποτελέσει μήτρα για πληθώρα συνθέτων υλικών, την ευρεία και αυξανόμενη χρήση του ως βιοδιασπώμενο υλικό αλλά και τη δυνατότητα διαμόρφωσης του με 3D εκτυπωτή (Fused Deposition Model). Οι σύνδεσμοι Αλουμινίου - Γυαλιού συγκολλήθηκαν με το μοντέλο LTW αποφέροντας μέση αντοχή 32,8 MPa. Για τους συνδέσμους PLA – Γυαλιού αναγκαία κρίθηκε η ενδιάμεση στρώση από φύλλο αλουμινίου (αλουμινόχαρτο). Το αλουμίνιο συγκολλάται πρώτα στο γυαλί και στη συνέχεια με τη μέθοδο LDW στο θερμοπλαστικό. Τα πλακίδια και των τριών υλικών δεν έχουν υποστεί κάποια ειδική κατεργασία τράχυνσης ή λείανσης καθιστώντας τη διαδικασία έτσι πιο οικονομική και γρήγορη. Ωστόσο το κλειδί για την επίτευξη ισχυρών συνδέσμων πέρα από την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης είναι η εξασφάλιση καλής επαφής των υλικών και η εξασφάλιση του μικρότερου δυνατού κενού στη διεπιφάνεια. Η μέση αντοχή αυτών των συνδέσμων ανήλθε στα 9,57 MPa, και για τους δυο συνδυασμούς υλικών η μέση αντοχή υπερβαίνει κατά 400 – 550% αυτής των συνδέσμων με κόλλα. Με καλύτερη βελτιστοποίηση των παραμέτρων θα μπορούσε ίσως η αντοχή να αυξηθεί περαιτέρω, αυτό θα ήταν εφικτό με τη μοντελοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης και των φυσικών φαινομένων που συμβαίνουν. Η μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να αποτελέσει θέμα μελλοντικής μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Messler, Robert W. 1993. 'Joining Of Advanced Materials. Boston', Mass.: Butterworth-Heinemann.
- [2] Yousefpour, Ali, Mehdi Hojjati, and Jean-Pierre Immarigeon. 2004. "Fusion Bonding/Welding Of Thermoplastic Composites". Journal Of Thermoplastic Composite Materials 17 (4): 303-341. doi:10.1177/0892705704045187.
- [3] Ageorges, C., L. Ye, and M. Hou. 2020. "Advances In Fusion Bonding Techniques For Joining Thermoplastic Matrix Composites: A Review."
- [4] Jeevi, G., Sanjay Kumar Nayak, and M. Abdul Kader. 2019. "Review On Adhesive Joints And Their Application In Hybrid Composite Structures". Journal Of Adhesion Science And Technology 33 (14): 1497-1520. doi:10.1080/01694243.2018.1543528.
- [5] Universidad de Babilonia. Obtenido de Theories of Adhesion http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_3_4711_164.pdf
- [6] Κόττου, Σοφία. 2009. "Τα Laser Και Οι Εφαρμογές Τους"
- [7] Katayama, S. 2013. 'Handbook of Laser Welding Technologies'. Cambridge, UK: Woodhead Pub.
- [8] Chen, Jianyong. 2016. 'Ultrafast Laser Microwelding Of Glass-To-Glass And Glass-To-Opaque Materials'. Heriot-Watt University.
- [9] Κουρής, Σ., 2015. 'Φυσική των λέιζερ'. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα.
- [10] Osswald, Tim A, Erwin Baur, and Sigrid Brinkmann. 2006. International Plastics Handbook. Munich: Hanser.
- [11] Klein, Rolf. 2012. Laser Welding Of Plastics. Weinheim: Wiley-VCH.
- [12], K. F. Tamrin, Y. Nukman, and S. S. Zakariyah. 2013. "Laser Lap Joining Of Dissimilar Materials – A Review Of Factors Affecting Joint Strength". Materials And Manufacturing Processes. doi:10.1080/10426914.2013.792413.
- [13] ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΙΩΡΓΟΣ, ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΟΥΖΑΚΗ. 2007. 'ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ'. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- [14] Troughton, Michael John. 2008. 'Handbook of Plastics Joining'. Norwich, NY: William Andrew.
- [15] Jaeschke, Peter, Verena Wippo, Oliver Suttman, and Ludger Overmeyer. 2015. "Advanced Laser Welding Of High-Performance Thermoplastic Composites". Journal Of Laser Applications 27. doi:10.2351/1.4906379.

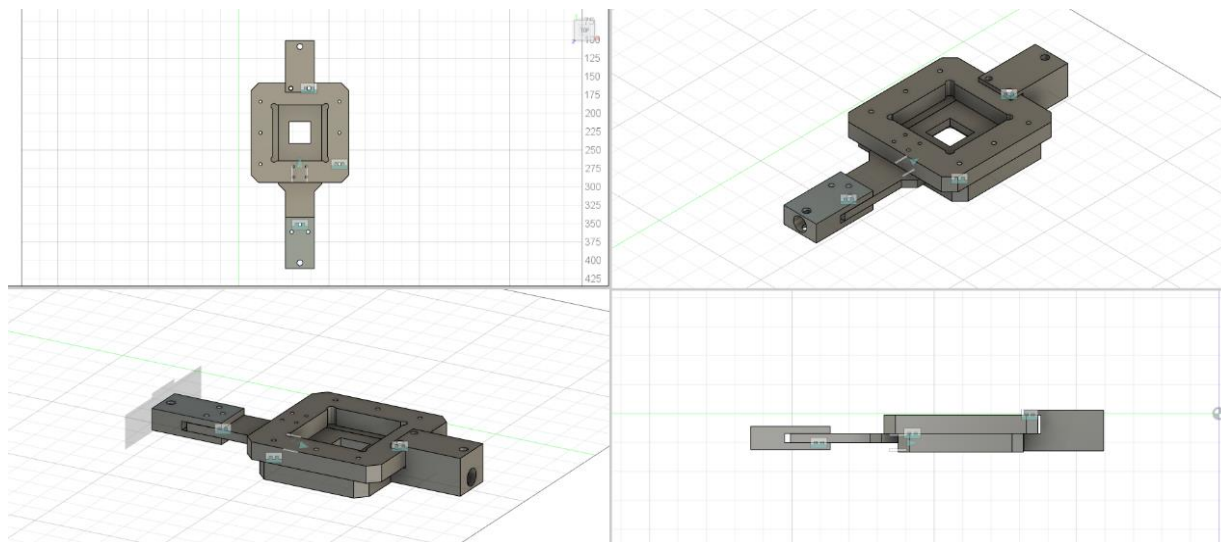
- [16] ‘Pramanik, A., A.K. Basak, Y. Dong, P.K. Sarker, M.S. Uddin, G. Littlefair, A.R. Dixit, and S. Chattopadhyaya. 2017. "Joining Of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Composites And Aluminium Alloys – A Review". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 101. doi: 10.1016/j.compositesa.2017.06.007.
- [17] Amend, P., T. Frick, and M. Schmidt. 2011. "Experimental Studies On Laser-Based Hot-Melt Bonding Of Thermosetting Composites And Thermoplastics". *Physics Procedia* 12: 166-173. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.021.
- [18] Amend, P., B. Pillach, T. Frick, and M. Schmidt. 2012. "Laser-Based Hot-Melt Bonding Of Thermosetting GFRP". *Physics Procedia* 39. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.024.
- [19] Wippo, V., Rettschlag, K., Surjoseputro, W., Jaeschke, P., Suttmann, O., Ziegmann, G. and Overmeyer, L., 2017. Laser transmission welding of semi-interpenetrating polymer networks-composites. *Journal of Laser Applications*, 29(2), p.022407.
- [20] A.de Pablos-Martín and Th. Höche. 2017. "Laser Welding of glasses using a Nanosecond Pulsed Nd:YAG Laser". *Optics And Lasers In Engineering* 90. doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.09.009.
- [21] Corning Incorporated 2019, ‘Laser Glass-Metal welding principles’.
- [22] Carter, Richard M., Jianyong Chen, Jonathan D. Shephard, Robert R. Thomson, and Duncan P. Hand. 2014. "Picosecond Laser Welding of Similar and Dissimilar Materials". *Applied Optics* 53 (19). doi:10.1364/ao.53.004233.
- [23] Cvecek, Kristian, Sarah Dehmel, Isamu Miyamoto, and Michael Schmidt. 2019. "A Review on Glass Welding by Ultra-Short Laser Pulses". *International Journal of Extreme Manufacturing* 1 (4). doi:10.1088/2631-7990/ab55f6.
- [24] Carter, Richard M., Michael Troughton, Jinanyong Chen, Ian Elder, Robert R. Thomson, Robert A. Lamb, M. J. Daniel Esser, and Duncan P. Hand. 2016. "Picosecond Laser Welding of Optical to Metal Components". *Laser-Based Micro- and Nanoprocessing X*. doi:10.1117/12.2213227.
- [25] Mian, Ahsan, Golam Newaz, Tonfiz Mahmood, and Greg Auner. 2007. "Mechanical Characterization of Glass/Polyimide Microjoints Fabricated Using Cw Fiber and Diode Lasers". *Journal of Materials Science* 42 (19). doi:10.1007/s10853-007-1703-x.
- [26] Thomas, R., Handtke, S., Wehler, S., Fischer, F. and Gude, M., 2020. Co-curing of thermoset composites on metal structures with reduced cycle times for high-volume car applications. *Materials Today: Proceedings*.

- [27] Jiao, Junke, Shaohui Jia, Zifa Xu, Yiyun Ye, Liyuan Sheng, and Wenwu Zhang. 2019. *"Laser Direct Joining of CFRTP And Aluminium Alloy with A Hybrid Surface Pre-Treating Method"*. Composites Part B: Engineering 173: 106911. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106911.
- [28] Jia, Le, Haifeng Yang, Yisai Wang, Baocai Zhang, Hao Liu, and Jingbin Hao. 2021. *"Direct Bonding Of Copper Foil And Liquid Crystal Polymer By Laser Etching And Welding"*. Optics And Lasers In Engineering 139: 106509. doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106509.
- [29] Ulf Blieske, Gunther Stollwerck, Chapter Four - *Glass and Other Encapsulation Materials*,
Editor(s): Gerhard P. Willeke, Eicke R. Weber, Semiconductors and Semimetals, Elsevier, Volume 89, 2013.
- [30] Research, Grand View. 2014. *Lactic Acid And Poly Lactic Acid (PLA) Market Analysis By Application (Packaging, Agriculture, Transport, Electronics, Textiles) And Segment Forecasts To 2020*. San Francisco: Grand View Research.
- [31] Karagiannidou, Evrykleia. "Χημεία Των Εποξειδικών Ρητινών". *Academia.Edu*. https://www.academia.edu/12201694/Χημεία_των_Εποξειδικών_Ρητινών.
- [32] Lim, L.-T., R. Auras, and M. Rubino. 2008. "Processing Technologies For Poly(Lactic Acid)". Progress In Polymer Science 33 (8): 820-852. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004.
- [33] "Low Iron Soda-Lime Glass - Abrisa Technologies". 2021. Abrisa Technologies. <https://abrisatechnologies.com/glass-materials/low-iron-soda-lime/>.
- [34] Kuklik, Julian, Verena Wippo, Peter Jaeschke, Stefan Kaierle, and Ludger Overmeyer. 2020. *"Laser Transmission Welding Of Additive Manufactured Parts: Process Modifications To Reduce Cavities Inside The Weld Seam"*. Procedia CIRP 94: 139-143. doi: 10.1016/j.procir.2020.09.027.
- [35] Pagano, Nunzianta, Giampaolo Campana, Maurizio Fiorini, and Raffaele Morelli. 2017. *"Laser Transmission Welding of Polylactide To Aluminium Thin Films For Applications In The Food-Packaging Industry"*. Optics & Laser Technology 91: 80-84. doi: 10.1016/j.optlastec.2016.12.014.

- [36] Chen, Lan, and Xinzhou Zhang. 2019. "Modification The Surface Quality And Mechanical Properties By Laser Polishing Of Al/PLA Part Manufactured By Fused Deposition Modeling". *Applied Surface Science* 492: 765-775. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.06.252.
- [37] Li, Xinxin, and Yingchun Guan. 2020. "Theoretical Fundamentals of Short Pulse Laser–Metal Interaction: A Review". *Nanotechnology And Precision Engineering* 3 (3): 105-125. doi: 10.1016/j.npe.2020.08.001.
- [38] KATAYAMA, S, and Y KAWAHITO. 2008. "Laser Direct Joining of Metal And Plastic". *Scripta Materialia* 59 (12): 1247-1250. doi: 10.1016/j.scriptamat.2008.08.026.
- [39] Lamberti, C., Peral Alonso, I. and Plapper, P. (2017). "Influence of Material Moisture during Laser Joining of Polyamide 6.6 to Aluminum", Athens: ATINER'S Conference Paper Series, No: IND2017-2270.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μηχανολογικά Σχέδια της Ιδιοσυσκευής Διάτμησης



PART	QUANTITY	MATERIAL
BODY_1	1	17-4PH (stainless steel)
BODY_2	1	17-4PH (stainless steel)
BLADE	1	17-4PH (stainless steel)
BLADE JOINT	1	17-4PH (stainless steel)
BODY JOINT	1	17-4PH (stainless steel)
PLATE (3 mm)	1	17-4PH (stainless steel)
ALLEN BOLT M5- 0.8 x 30mm	10	Aluminium
ALLEN BOLT M4- 0.7 x 8mm	6	Aluminium
ALLEN BOLT M6- 1 x 30mm	10	Aluminium
TOGGLE CLAMP GH10B	1	

