



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ &  
ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Αθήνα

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ, ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗ

ΧΡΗΣΤΟΣ Π. ΙΟΡΔΑΝΙΔΗΣ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
& ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

## Συγκόλληση πολυμερικών μικρορευστονικών διατάξεων με υπερήχους, χωρίς τη χρήση ενεργειακού κατευθυντή

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΙΟΡΔΑΝΙΔΗ ΧΡΗΣΤΟΥ**

**Επιβλέπων :** Λεωνίδας Αλεξόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2016.

(Υπογραφή)

.....  
Λεωνίδας Αλεξόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Χριστόφορος Προβατίδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Ιωάννης Αντωνιάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2016

*(Υπογραφή)*

.....

**ΧΡΗΣΤΟΣ ΙΟΡΔΑΝΙΔΗΣ**

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2016 – All rights reserved



## Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η συγκόλληση θερμοπλαστικών πολυμερικών μικρορευστονικών διατάξεων από πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA) και από πολυμερές κυκλοολεφίνης (COP), χωρίς τη χρήση ενεργειακού κατευθυντή. Οι μικρορευστονικές διατάξεις κατασκευάζονται σε διαστάσεις 1.50 cm x 4.50 cm, πάχους 0.2 cm, και επεξεργάζονται οι επιφάνειες τους για να αποκτήσουν μια επιπεδότητα. Η επιπεδότητα των δοκιμίων διαδραματίζει τεράστιο ρόλο στη συγκόλληση με υπερήχους.

Η τεχνολογική στάθμη στη συγκόλληση με υπερήχους σε θερμοπλαστικά πολυμερή μέχρι και σήμερα, παρατίθεται και γίνεται προσπάθεια επιβεβαίωσης και αναπαραγωγής κάποιων μεθόδων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρήση διαλύτη ισοπροπανόλης, ακετόνης και μίγμα αυτών, αλλά και η εισαγωγή μικρο-κατευθυντών ενέργειας, με πρόσδωση τραχύτητας στις επιφάνειες των πολυμερών. Επίσης, εξετάζεται η περίπτωση πολλαπλών διαδοχικών συγκολλήσεων με υπερήχους, με στάδια προθέρμανσης. Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση που το ένα εκ των δύο δοκιμίων προς συγκόλληση είναι λεπτό φιλμ από το υλικό πάχους 0.03 cm.

Χρησιμοποιείται διάταξη ελαστικού υποστρώματος για βελτίωση της επιπεδότητας και της ομοιόμορφης κατανομής της ενέργειας. Η διάταξη αποτελείται από λεπτό φιλμ PDMS πάχους 0.03 cm, και επίπεδου πλακιδίου πυριτίου, πάχους 0.05 cm. Απαιτείται περισσότερη ενέργεια στα δείγματα μας, αλλά τα αποτελέσματα εμφανίζουν μεγαλύτερα ποσοστά συγκόλλησης σε όλη τη διεπιφάνεια. Για πλάτος ταλάντωσης 4.5 και 5 μm, με δύναμη συγκόλλησης 400 Newton, σε μεγάλους χρόνους συγκόλλησης 16 δευτερολέπτων, η ενέργεια είναι 1500 Joule, το ποσοστό συγκόλλησης είναι πάνω από 90% της επιφάνειας για το PMMA, ενώ για το COP έχουμε ακόμα μεγαλύτερα ποσοστά συγκόλλησης. Οι αντίστοιχες συνθήκες είναι για πλάτος ταλάντωσης 5.5 και 6 μm, δύναμη συγκόλλησης 550 N, σε χρόνους συγκόλλησης 16 δευτερολέπτων και ενέργεια συγκόλλησης 2500 Joule.

Αν και δεν καταφέραμε να επιτύχουμε ακόμη μια στιβαρή ομοιόμορφη συγκόλληση χωρίς παραμορφώσεις των επιφανειών, αποδείξαμε ότι με καλή προετοιμασία των δειγμάτων και έμφαση στην επιπεδότητα τους, καταφέρνουμε να αυξήσουμε την επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα μας και να αυξήσουμε τα ποσοστά συγκόλλησης. Επιπροσθέτως, επιβεβαιώσαμε ότι η τραχύτητα σε μια επιφάνεια και η χρήση διαλύτη συμβάλλουν σε μια ποιοτικότερη συγκόλληση και αυξάνουν το ποσοστό συγκόλλησης. Τέλος, με τη μέθοδο του στατιστικού σχεδιασμού Box-Benken, καταλήξαμε ότι το πλάτος της ταλάντωσης και η δύναμη συγκόλλησης διαδραματίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στην επίδραση που έχουν σαν παράμετροι της συγκόλλησης.

**Λέξεις Κλειδιά:** << Συγκόλληση με υπερήχους χωρίς ενεργειακό κατευθυντή, μικρορευστονικές διατάξεις, θερμοπλαστικά πολυμερή, PMMA, COP, συγκόλληση υπερήχων με χρήση διαλύτη, συγκόλληση υπερήχων με στάδιο προθέρμανσης, συγκόλληση υπερήχων με τραχύτητα στην επιφάνεια, χρήση ελαστικού υποστρώματος για βελτίωση της επιπεδότητας PDMS – Πυριτίου >>



## Abstract

The purpose of this thesis was to investigate the principles of ultrasonic bonding of thermoplastic polymeric microfluidic devices of polymethyl methacrylate (PMMA) and cyclic olefin polymer (COP), without using an energy director. Microfluidic devices were made in dimensions 1.50 cm x 4.50 cm, with thickness of 0.2 cm. We processed their surfaces to obtain a flatness. The flatness of samples withholds a significant role in the ultrasonic welding.

We have studied the technological level in ultrasonic welding of thermoplastic polymer materials until today, and we tried to confirm and reproduce some methods. Specifically, we tried solvent assisted ultrasonic bonding, using isopropanol, acetone and mixtures of the above, as a solvent. We also examine micro-energy directors, imparting roughness to the surface of polymers. Also, we try multiple successive steps, with a preheating stage. Finally, we try ultrasonic bonding, where one of the two pieces to be welded, is a thin film with a thickness of 0.03 cm.

We use an elastic substrate device for improving the flatness and the uniform distribution of energy. The device consists of a thin PDMS film with thickness of 0.03 cm and a flat wafer made of Silicon, with thickness of 0.05 cm. With this device, our samples required more energy, but the results show higher welding rates across the interface. For performing ultrasonic bonding experiments with an amplitude of 4.5 and 5 microns, bonding strength 400 Newton, welding time of 16 seconds, and energy given about 1500 Joules, the bonding rate was more than 90% of the surface of PMMA, while at the COP material we achieved even more higher welding rates. The corresponding conditions for COP were an amplitude of 5.5 and 6 microns, and a welding force of 550 N, welding times in 16 seconds and welding energy 2500 Joule.

Although we could not achieve yet a robust uniform welding, without the distortion (thermal deformation) of the surfaces, we demonstrated that with a proper preparation of the samples and processing their surface with flatness, we managed to increase the reproducibility of our results and increase the welding rate. In addition, we confirmed that the roughness of the surface and the solvent assisted ultrasonic bonding, contribute to a better quality of welding and increase the welding rate. Finally, using the statistical design Box-Benken, we concluded that both amplitude and welding force, play an equally important role, in the effect they have to ultrasonic bonding, as welding parameters.

**Keywords:** << Ultrasonic Bonding without energy directors, microfluidic devices, thermoplastic polymers, PMMA, COP, solvent assisted ultrasonic bonding, ultrasonic bonding with pre-heating step, ultrasonic bonding with roughness at surface, elastic substrate consist of PDMS - Silicon for improving the flatness >>



## Περιεχόμενα

1. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ .....	12
1.1.1 ΕΙΔΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	13
2. ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	28
3. ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ .....	29
4. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΕΡΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	30
2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ .....	32
2.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ.....	32
2.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ..	49
2.3.1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	49
2.3.2 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ .....	51
2.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ .....	53
3.1 ΜΗΧΑΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ HERRMANN .....	54
3.1.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ .....	55
3.1.2 ΒΑΣΗ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ. ....	57
3.1.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ.....	59
3.2 ΚΟΠΗ ΜΕ LASER .....	64
3.3 ΠΡΕΣΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	66
3.4 ΠΡΟΦΙΛΟΜΕΤΡΟ.....	67
3.5 ΜΗΧΑΝΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΟΠΩΝ .....	67
3.6 ΜΗΧΑΝΗ PLASMA .....	67
3.7 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ .....	68
3.8 ΓΙΑΛΟΧΑΡΤΑ ΕΜΠΟΡΙΟΥ .....	69
3.9 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (MATLAB, IMAGEJ) .....	69
4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΓΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ.....	70
4.1.1 ΚΟΠΗ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	71
4.1.2 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥΣ .....	74
4.1.3 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΣΦΡΑΓΙΣΑ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΟΠΩΝ.....	74

4.1.4 ΕΠΙΠΕΔΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	76
4.1.5 ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ.....	77
4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	77
4.2.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΟΧ-BENKEN .....	78
4.2.2 ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ IMAGEJ .....	79
5. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ .....	80
5.1. ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	81
5.1.1. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗ .....	81
5.1.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΒΟΧ-BENKEN.....	85
5.1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΤΗΤΑΣ .....	90
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΑ ΜΕ ΧΟΝΤΡΟ ΚΑΠΑΚΙ.....	91
5.2.1. ΜΕ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΑ ΜΕ ΧΟΝΤΡΟ ΚΑΠΑΚΙ.....	94
5.2.2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΓΧΑΡΑΞΗ ΜΕ ΠΛΑΣΜΑ ΟΞΥΓΟΝΟΥ, ΓΥΑΛΟΧΑΡΤΟ ΚΛΠ) ΜΕ ΧΟΝΤΡΟ ΚΑΠΑΚΙ.....	109
5.2.3 ΜΕ ΔΙΑΛΥΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΑ ΜΕ ΧΟΝΤΡΟ ΚΑΠΑΚΙ.....	116
5.2.4 ΜΕ ΛΕΠΤΟ ΚΑΠΑΚΙ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΜΑ .....	119
5.2.5 ΜΕ ΛΕΠΤΟ ΚΑΠΑΚΙ ΚΑΙ ΔΙΑΛΥΤΗ .....	120
5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΑ.....	120
5.3.1. ΜΕ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΑ.....	122
5.3.3 ΜΕ ΔΙΑΛΥΤΗ ΓΙΑ ΤΟ ΡΜΜΑ ΜΕ ΛΕΠΤΟ ΚΑΠΑΚΙ .....	122
5.3.4 ΔΙΑΛΥΤΗΣ ΣΕ ΧΟΝΤΡΟ ΚΑΠΑΚΙ ΡΜΜΑ .....	124
5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΡΜΜΑ .....	127
5.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΚΥΚΛΟΟΛΕΦΙΝΗΣ COP .....	128
5.6.1 ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ COP .....	128
5.6.2 ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΠΕΔΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΟ COP .....	129
5.6 ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ COP .....	130
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	131
7.1 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	133

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική διατριβή εκπονήθηκε στο πρώην Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής και νυν Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» με τη συνεργασία του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το χρονικό διάστημα 2015-2016.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Λ. Αλεξόπουλο, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία με υπεύθυνο και επιβλέποντα από πλευράς Ε.Μ.Π. καθηγητή τον ίδιο.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Ε. Γογγολίδη, Διευθυντή Ερευνητών του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» επιβλέποντα ερευνητή της διατριβής αυτής, εξαιρετικού επιστήμονα, για την ανεκτίμητη βοήθεια, συμπαράσταση και υπομονή που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους Δρ. Γ. Μπουλούση και τον Δρ. Κ. Έλληνα, από την ομάδα του εργαστηρίου πλάσματος και μικρορευστονικών διατάξεων στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», για την πολύτιμη βοήθειά τους στην διεξοδική συζήτηση των αποτελεσμάτων, καθώς για την βοήθεια τους στην εκτέλεση των πειραμάτων και που στάθηκαν, εκτός από καλοί συνάδελφοι και πολύτιμοι φίλοι.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλη την «ομάδα του εργαστηρίου πλάσματος και μικρορευστονικών διατάξεων», όπως και όλα τα μέλη του εργαστηρίου του καθηγητή κ. Αλεξόπουλου, και ιδιαίτερα τους Γ. Κανακάρη και Α. Πόλεσιουκ.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την αγάπη, την ανοχή και την υποστήριξή τους. Η ανιδιοτελής τους στήριξη σε κάθε τομέα της ζωής μου, καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, μου έδωσε τα εφόδια τόσο για τις γνώσεις που οφείλει να έχει ένας μηχανικός, όσο για τη σωστή διάπλαση του χαρακτήρα μου.

**ΑΘΗΝΑ 2016**

# Κεφάλαιο 1

---

## 1. Συγκόλληση

Συγκόλληση είναι μια κατασκευή ή μια κατασκευαστική διαδικασία που ενώνει τα υλικά προκαλώντας σύντηξη μεταξύ τους με τελικό αποτέλεσμα ένα ενιαίο συσσωμάτωμα. Τα υλικά είναι συνήθως μέταλλα ή θερμοπλαστικά.

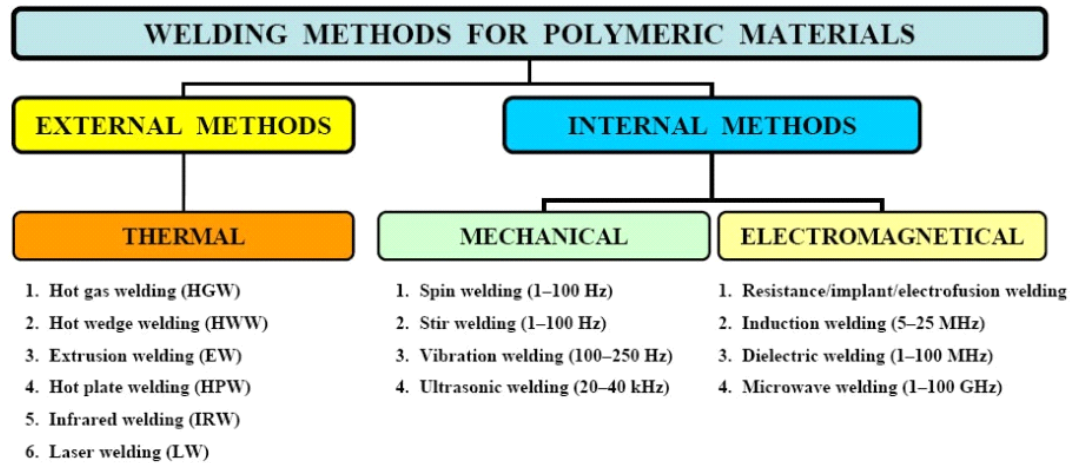
Συγκόλληση πλαστικών: Η συγκόλληση για πλαστικά υλικά περιγράφεται στο πρότυπο ISO 472 ως μια διαδικασία που ενώνει τις επιφάνειες των υλικών με τη βοήθεια της θερμότητας που βοηθάει στο να «μαλακώσουν» οι επιφάνειες αυτές (εξαιρείται η συγκόλληση όπου χρησιμοποιείται διαλύτης –solvent welding-). Συγκόλληση των θερμοπλαστικών πραγματοποιείται σε τρία διαδοχικά στάδια, δηλαδή a) την προετοιμασία της επιφάνειας, b) την εφαρμογή κατάλληλης θερμότητας και πίεσης, και c) την ψύξη.

Η συγκόλληση είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους σύνδεσης στις μηχανουργικές κατασκευές. Είναι γρήγορη, φθηνή και αποδίδει στεγανές ραφές και έτσι προτιμάται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές από την απλή κατασκευή δοχείων μέχρι την αεροναυπηγική. Με αφετηρία τη συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου πέρασε από πολλά στάδια εξέλιξης και σήμερα εφαρμόζεται ως διαδικασία σύνδεσης με μεγάλη ποικιλία μεθόδων. Πριν λίγες δεκαετίες η συγκόλληση αφορούσε κατά κανόνα μεταλλικά υλικά και κυρίως χάλυβες. Οι ανάγκες διαφόρων κλάδων της βιομηχανίας με μεγάλες προοπτικές όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυπηγική μικρών και μεγάλων σκαφών και πολλές άλλες δημιούργησαν κατάλληλες συνθήκες για την ανάπτυξη και βιομηχανοποίηση νέων μεθόδων. Μία ιδιαίτερα ισχυρή ώθηση στην επινόηση, εφαρμογή και διάδοση μεθόδων συγκόλλησης έδωσε ο Β' παγκόσμιος πόλεμος. Δεύτερη ισχυρή ώθηση στην εφαρμογή νέων τεχνικών συγκόλλησης έδωσε η διάδοση των εργαλειομηχανών CNC. Η αυτοματοποίηση και η παραγωγικότητα βελτιώθηκαν πολύ στις εργασίες συγκόλλησης. Η στόχευση της τσιμπίδας συγκόλλησης άλλαξε της φιλοσοφία της συγκόλλησης. Πέρασε μέσα από τα προγράμματα των υπολογιστών που ανέλαβαν την οδήγησή της αντί για το χέρι του συγκολλητή. Η συγκόλληση με laser έγινε ρουτίνα. Η συγκόλληση με τις μεθόδους TIG και MIG και η συγκόλληση με plasma, συνεργάστηκαν άμογα με τη νέα φιλοσοφία οδήγησης. παράλληλα όμως αναπτύχθηκαν τεχνικές για τη συγκόλληση υλικών που μέχρι πρόσφατα δεν γνώριζαν ευρεία βιομηχανική εφαρμογή. Ελαφρά αλλά ισχυρά κράματα με βάση το Αλουμίνιο, το Τιτάνιο, το Νικέλιο και άλλα μέταλλα επέβαλλαν την ανάπτυξη νέων τύπων ηλεκτροδίων και συρμάτων και ανάπτυξη νέων τεχνικών συγκόλλησης. Αλλά και μη μεταλλικά υλικά, όπως τα πλαστικά χρησιμοποιούνται πλέον ευρύτατα σε βιομηχανικές κατασκευές. Η ανάγκη για τη συγκόλλησή τους αναζήτησε λύσεις και στις συγκολλήσεις μετάλλων. Μία από τις λύσεις που φαίνεται ότι δουλεύει καλά και στα πλαστικά και στα μέταλλα είναι η μέθοδος συγκόλλησης με υπερήχους.



### 1.1.1 Είδη συγκόλλησης πολυμερικών υλικών

Πολυάριθμες μέθοδοι συγκόλλησης έχουν αναπτυχθεί για τη σύνδεση των πλαστικών υλικών. Με βάση το μηχανισμό της παραγωγής θερμότητας στη διεπιφάνεια, των συγκολλημένων τεμαχιών, οι μέθοδοι συγκόλλησης για θερμοπλαστικά μπορούν να ταξινομηθούν ως εξωτερικές και εσωτερικές μέθοδοι συγκόλλησης, [2], όπως φαίνεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1 Μέθοδοι συγκόλλησης πολυμερικών υλικών

Οι εσωτερικές μέθοδοι συγκόλλησης, που κυρίως είναι θερμικές συγκολλήσεις είναι:

- Συγκόλληση θερμού αερίου
- Συγκόλληση με χρήση θερμαινόμενης σφήνας
- Συγκόλληση εξώθησης
- Συγκόλληση θερμαινόμενων πλακών
- Συγκόλληση με υπέρυθρη ακτινοβολία
- Συγκόλληση με laser

Οι εξωτερικές μέθοδοι συγκόλλησης, χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες οι οποίες είναι: α) μηχανικές μέθοδοι και β) ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

Οι μηχανικές μέθοδοι συγκόλλησης είναι οι εξής:

- Συγκόλληση περιστροφής
- Συγκόλληση ανάδευσης

- Συγκόλληση δόνησης
- Συγκόλληση με υπερήχους

Αντίστοιχα οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι συγκόλλησης είναι:

- Συγκόλληση αντίστασης με χρήση εμφυτεύματος για σύντηξη
- Συγκόλληση με επαγωγή
- Διηλεκτρική συγκόλληση
- Συγκόλληση με μικροκύματα

Ενδεικτικά, θα αναλυθούν κάποιες από τις παραπάνω συγκολλήσεις:

#### **1.1.1.1 Συγκόλληση θερμού αερίου**

Η συγκόλληση θερμού αέρα, είναι μια τεχνική συγκόλλησης πλαστικών με χρήση θερμότητας. Ένα ειδικά σχεδιασμένο πιστόλι θερμότητας, παράγει έναν πίδακα θερμού αέρα που μαλακώνει τα μέρη που πρόκειται να συγκολληθούν καθώς και μια πλαστική ράβδο που λειτουργεί ως υλικό πληρώσεως. Το υπόστρωμα και η ράβδος λιώνουν και επιτυγχάνεται η επιθυμητή συγκόλληση. Τα υλικά προς συγκόλληση καθώς και η ράβδος θα πρέπει να είναι από τον ίδιο ή πολύ παρόμοιο πλαστικό (η συγκόλληση PVC σε ακρυλικό αποτελεί εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα). Τα πλαστικά, που μπορούν να συγκολληθούν, είναι PVC, πολυαιθυλένιο, πολυανθρακικά και νάιλον.

Η συγκόλληση θερμού αέρα είναι μια κοινή τεχνική κατασκευής αντικειμένων μικρής κλίμακας, όπως χημικές δεξαμενές, δεξαμενές νερού, εναλλάκτες θερμότητας και είδη υγιεινής. Επίσης, χρησιμοποιείται στην επισκευή διαφόρων πλαστικών σχηματισμών όπως οι προφυλακτήρες αυτοκινήτων.

Στην ειδική περίπτωση που αφορά ελάσματα ή ταινίες, είναι αδύνατη η χρήση ράβδου πληρώσεως. Τα δύο φύλλα πλαστικού θερμαίνονται μέσω θερμού αέρα (ή κάποιου θερμαντικού στοιχείου) και στη συνέχεια κατεργάζονται με διέλαση. Αυτή είναι μια γρήγορη διαδικασία συγκόλλησης που μπορεί να επαναλαμβάνεται συνεχώς.



## **Hot Gas Welding**

Εικόνα 2 Συγκόλληση θερμού αερίου

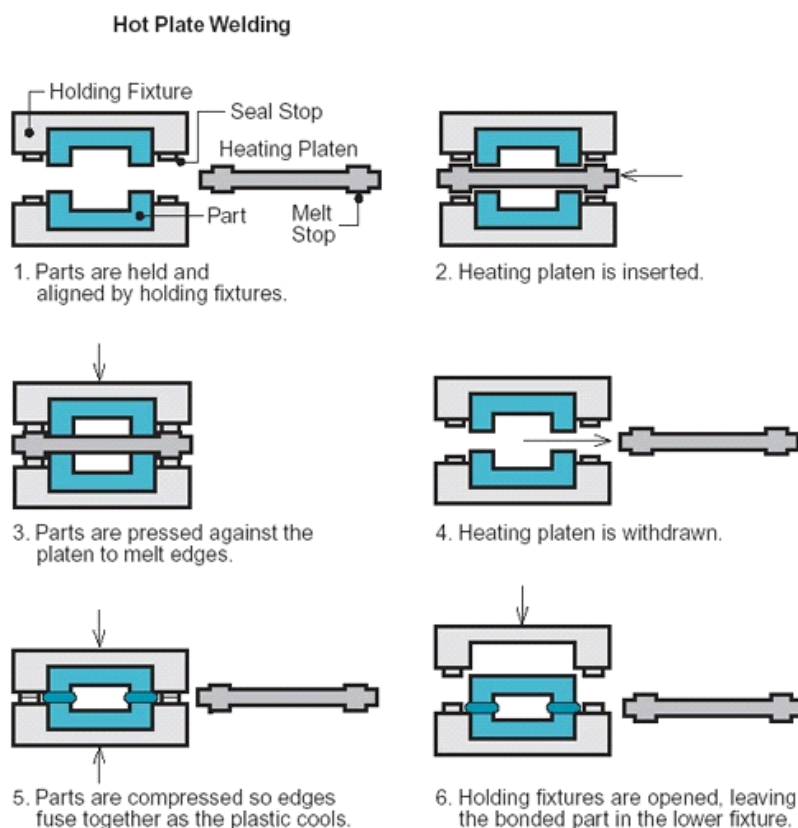
### **1.1.1.2 Συγκόλληση θερμαινόμενων πλακών**

Η συγκόλληση θερμαινόμενων πλακών, ανήκει στη κατηγορία των συγκολλήσεων επαφής και είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να συνδεθούν μεγαλύτερα τμήματα ή τμήματα που έχουν σύνθετη γεωμετρία. Τα δύο μέρη που πρόκειται να συγκολληθούν τοποθετούνται και στερεώνονται στις δύο αντίθετες πλάκες μιας πρέσας. Μια αγωγίμη πλάκα, με ένα σχήμα που ταιριάζει με το σύνδεσμο συγκόλλησης, όσον αφορά τη γεωμετρία των τμημάτων που πρόκειται να συγκολληθούν, τοποθετείται μεταξύ των δύο μερών. Οι δύο πλάκες συγκλίνουν, ώστε να έρθουν σε επαφή τα τμήματα με τη θερμή πλάκα, μέχρι η θερμότητα να μαλακώσει την διεπιφάνεια (κοντά στο σημείο υαλώδους μετάπτωσης του πλαστικού). Όταν επιτευχθεί αυτή η κατάσταση η θερμή πλάκα απομακρύνεται, και τα τμήματα πιέζονται μεταξύ τους. Εφόσον πραγματοποιείται μια ομαλή ψύξη σε συνθήκες περιβάλλοντος, δημιουργείται ένας μόνιμος δεσμός, και τα δύο τμήματα συνθέτουν ένα νέο, με σταθερή δομή σ' όλη του τη σύσταση.

Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται γενικά μεταξύ 100° και 230° ανάλογα με το πάχος και τον τύπο του υλικού που συγκολλείται.

Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για συγκόλληση μερών των αυτοκινήτων όπως στο εσωτερικό του καπό, τη σύνδεση των σωλήνων και των συνδετήρων επάνω στις δεξαμενές καυσίμων των αυτοκινήτων, τις δεξαμενές υγρού των φρένων, τα οπίσθια φώτα, τα φλάς κλπ. καθώς και συσκευών καθημερινής χρήσης όπως οι ηλεκτρικές σκούπες, κάποια από τα συστατικά για τα πλυντήρια ρούχων ή τα πλυντήρια πιάτων κ.α.

Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι είναι σχετικά αργή. Η συγκόλληση μπορεί να διαρκέσει από 10 έως 20 λεπτά για τα μικρά στοιχεία και από 30 έως 50 λεπτά για μεγαλύτερα και πιο παχιά. Η θερμοκρασία των πλακών ελέγχεται από ηλεκτρονικούς ρυθμιστές, με αισθητήρα θερμοκρασίας τοποθετημένο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην επιφάνεια εργασίας.



**Εικόνα 3 Συγκόλληση θερμαινόμενων πλακών**

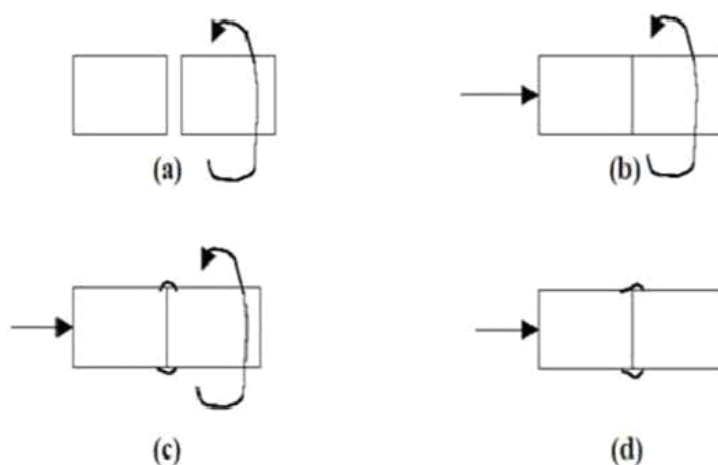
### **1.1.1.3 Συγκόλληση περιστροφής**

Η συγκόλληση περιστροφής είναι μια ιδιαίτερη μορφή της συγκόλλησης με τριβή. Στη συγκόλληση με τριβή δύο τεμάχια συγκολλούνται με τη βοήθεια της θερμότητας, που παράγεται από την τριβή του ενός πάνω στο άλλο. Στη συγκεκριμένη διαδικασία, το ένα από τα δύο τεμάχια συγκρατείται ακίνητο, ενώ το άλλο περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα και συμπιέζεται έναντι του σταθερού στοιχείου. Οι μεταξύ τους επιφάνειες τρίβονται έντονα και παράγεται θερμότητα. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία συγκόλλησης και επιτευχθεί μια ημίρρευση κατάσταση,

τότε η περιστροφή διακόπτεται απότομα. Στη συνέχεια, ασκείται μια συνεχόμενη πίεση στα δύο κομμάτια μέχρι να στερεοποιηθούν και έτσι επιτυγχάνεται η συγκόλληση.

Αυτός είναι ένας συνηθισμένος τρόπος παραγωγής χαμηλής και μεσαίας ποιότητας πλαστικών τροχών, π.χ., για παιχνίδια, καρτσάκια, κάδους ανακύκλωσης, κ.λ.π. Επίσης, αυτή η μέθοδος έχει βρει εφαρμογές στη συγκόλληση των κοπτικών πλακιδίων σε μανέλες κοπτικών εργαλείων, συγκόλληση ράβδων κ.λπ..

Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης τριβής είναι η υψηλή ποιότητα συγκόλλησης, η απλότητα και η δυνατότητα αναπαραγωγής της διαδικασίας. Το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας, είναι ότι στην απλούστερη μορφή, είναι εφαρμόσιμη όταν τουλάχιστον ένα από τα συστατικά είναι κυκλικό και δεν απαιτεί καμία γωνιακή ευθυγράμμιση.



Εικόνα 4 Συγκόλληση περιστροφής

Στο εικόνα 4 φαίνεται η διαδικασία συγκόλλησης ράβδων με τριβή. Η διαδικασία που φαίνεται στο σχήμα περιλαμβάνει : a) περιστροφή της μίας ράβδου, b) περιστροφή της πρώτης ράβδου και ταυτόχρονη συμπίεση της δεύτερης ράβδου πάνω στην περιστρεφόμενη, c) επίτευξη της θερμοκρασίας συγκόλλησης και d) προκύπτει η συγκόλληση των ράβδων.

#### 1.1.1.4 Συγκόλληση λέιζερ

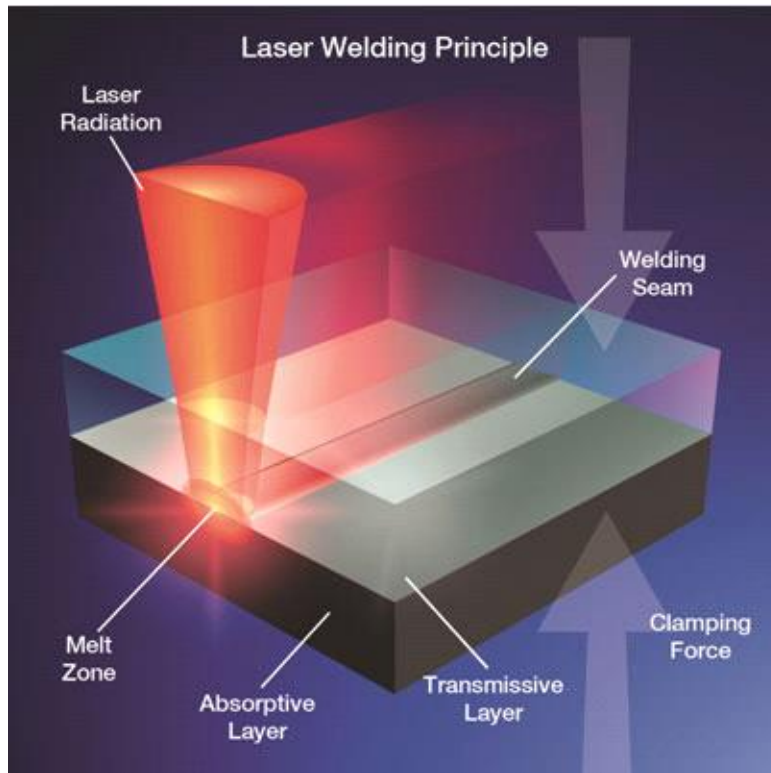
Η συγκόλληση με λέιζερ χρησιμοποιεί μια ακτίνα λέιζερ για να λιώσει το πλαστικό στην περιοχή επαφής. Το λέιζερ παράγει μια έντονη ακτινοβολία (συνήθως στον υπέρυθρο τομέα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος) που εφαρμόζεται επάνω στο υλικό που ενώνεται. Αυτό διεγείρει μια συχνότητα στο μόριο, με συνέπεια τη θέρμανση του περιβάλλοντος υλικού. Ειδικότερα, η τεχνική αυτή απαιτεί το ένα από τα προς συγκόλληση τεμάχια να είναι διαπερατό σε μία δέσμη λέιζερ και το άλλο να

μπορεί να απορροφήσει ή να διαθέτει μία επικάλυψη στη διαχωριστική επιφάνεια, η οποία να είναι ικανή να απορροφήσει τη δέσμη λέιζερ. Στα δύο τεμάχια προς συγκόλληση, εφαρμόζεται πίεση ενώ παράλληλα η δέσμη λέιζερ κινείται κατά μήκος της γραμμής που δημιουργεί την ένωση. Η δέσμη περνά μέσα από το πρώτο κομμάτι και απορροφάται από το άλλο ή την επικάλυψη του, ώστε να παράξει αρκετή θερμότητα για να μαλακώσει τη διεπαφή των δύο κομματιών και συμβάλλει στη δημιουργία μιας μόνιμης συγκόλλησης. Σε πλαστικές συγκολλήσεις συνήθως χρησιμοποιούνται τα λέιζερ ημιαγωγού διόδου. Για τους περισσότερους συνδυασμούς πλαστικής συγκόλλησης, τα μήκη κύματος του φάσματος ανήκουν στην περιοχή των 808 nm έως 980 nm . Τα επίπεδα ισχύος που απαιτούνται είναι λιγότερο από 1W φτάνουν έως 100W ανάλογα με το υλικό, την ταχύτητα, το πάχος και επιθυμητή διαδικασία

Η συγκόλληση λέιζερ είναι κατάλληλη για την συγκόλληση πλαστικών ταινιών και για τον φορμάρισμα των θερμοπλαστικών. Ένας κατάλογος υλικών που μπορούν να ενωθούν αυτή τη μέθοδο είναι: Polypropylene, Polycarbonate, Acrylic ,Nylon και ABS. Η συγκόλληση λέιζερ είναι μια διαδικασία μαζικής παραγωγής με τα πλεονεκτήματα ότι δεν παράγει καμία δόνηση με ελάχιστη λάμψη συγκόλλησης. Τα οφέλη ενός συστήματος λέιζερ περιλαμβάνουν:

- Καθαρότητα σε σχέση με τις συμβατικές συγκολλήσεις (δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τα εξωτερικά μέρη των τεμαχίων)
- Δεν υπάρχει συσσώρευση υλικού (φράξιμο) σε μικρο-ακροφύσια
- Δεν αφήνει υγρά ή προκαλεί αναθυμιάσεις με το φινίρισμα της επιφάνειας
- Δεν χρησιμοποιεί αναλώσιμα
- Πολύ υψηλή απόδοση συγκόλλησης
- Συγκόλληση κομματιών με απαιτητική δύσκολη γεωμετρία
- Διαθέτουν υψηλό επίπεδο ελέγχου της διαδικασίας (ελέγξιμη θέση και ισχύς ακτινών)
- Ακριβής εστίαση της ακτίνας λέιζερ που επιτρέπει την διαμόρφωση ενώσεων.

Από τα μειονεκτήματα της συγκόλλησης λέιζερ είναι πως ο εξοπλισμός της και τα μηχανήματα που απαιτεί είναι πολύ ακριβά.



Εικόνα 5 Συγκόλληση λέιζερ

#### 1.1.1.5 Συγκόλληση δόνησης

Συγκόλλησης δόνησης είναι μια διαδικασία συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που παράγει θερμότητα μέσω μηχανικής τριβής μεταξύ των τεμαχίων σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, με την προσθήκη μιας πλευρικής δύναμης που ονομάζεται "ανατροπέας" και προκαλεί πλαστική παραμόρφωση που οδηγεί τελικά στη σύντηξη των υλικών. Από τεχνική άποψη, επειδή δεν υπάρχει τήξη, η συγκόλληση δόνησης δεν είναι στην πραγματικότητα μια διαδικασία συγκόλλησης με την παραδοσιακή έννοια, αλλά μια τεχνική σφυρηλάτησης. Ωστόσο, λόγω των ομοιοτήτων μεταξύ των παραδοσιακών τεχνικών συγκόλλησης, έχει καθιερωθεί ως κοινός όρος. Η συγκόλληση δόνησης χρησιμοποιείται σε μέταλλα και θερμοπλαστικά σε ένα μεγάλο εύρος στο πεδίο των αερομεταφορών και διαφόρων αυτοματοποιημένων εφαρμογών.

Στην συγκόλληση δόνησης, τα δύο μέρη που πρόκειται να συναρμολογηθούν τρίβονται μαζί σε χαμηλή συχνότητα (τυπικά 100-300 Hz) και υψηλό πλάτος ταλάντωσης (τυπικά 1 έως 4 mm). Η τριβή που προκαλείται από την κίνηση της δόνησης του εργαλείου σε συνδυασμό με την πίεση σύσφιξης μεταξύ των δύο τμημάτων, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμότητας, η οποία αρχίζει να λιώνει τις περιοχές στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο τμημάτων. Σε αυτό το σημείο, τα πλαστικοποιημένα υλικά αρχίζουν να διαμορφώνονται σε στρώματα που διαπλέκονται μεταξύ τους, διαδικασία που οδηγεί σε μια ισχυρή συγκόλληση. Μετά το πέρας της κίνησης δόνησης, τα τμήματα παραμένουν συγκρατημένα μεταξύ τους με την επιβολή συγκεκριμένης πίεσης, έως ότου το λιωμένο πλαστικό να

στερεοποιηθεί. Η κίνηση της δόνησης μπορεί να είναι γραμμική ή κυκλοειδής, και έχει τεράστια σημασία ο κοινός σχεδιασμός των δύο τμημάτων, που θα πρέπει να επιτρέψει την παραπάνω κίνηση.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η δυνατότητά της να συγκολλήσει τις μεγάλες σύνθετες γραμμικές ενώσεις σε υψηλό ρυθμό παραγωγής. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα να συγκολληθούν διάφορα συστατικά ταυτόχρονα, η απλότητα της σχεδίασης και η καταλληλότητα για σχεδόν όλα τα θερμοπλαστικά υλικά. Η συγκόλληση δόνησης εφαρμόζεται κυρίως στη αυτοκινητοβιομηχανία και στη βιομηχανία εσωτερικών συσκευών.

Η συγκόλληση δόνησης μπορεί να εφαρμοστεί σχεδόν σε όλα τα θερμοπλαστικά υλικά.

### **1.1.1.6 Συγκόλληση με υπερήχους**

Τη συγκόλληση με υπερήχους συναντάμε σε βιομηχανικές εφαρμογές τόσο στη σύνδεση μετάλλων όσο και στη σύνδεση πλαστικών. Η διάκριση μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών υλικών γίνεται σκόπιμα γιατί σε κάθε κατηγορία έχουμε διαφορετική αρχή λειτουργίας. Μια ειδικά σχεδιασμένη μηχανή, η μηχανή συγκόλλησης με υπερήχους, χρησιμοποιεί μηχανικές δονήσεις για να διαμορφώσει την ένωση. Και στις δύο περιπτώσεις, το ένα από τα δύο κομμάτια που συγκολλούνται προσαρμόζεται σταθερά στο έδρανο βάσης (τραπέζι) της συσκευής συγκόλλησης. Το δεύτερο κομμάτι είναι σε επαφή με το πρώτο αλλά και με την κεφαλή συγκόλλησης της μηχανής που

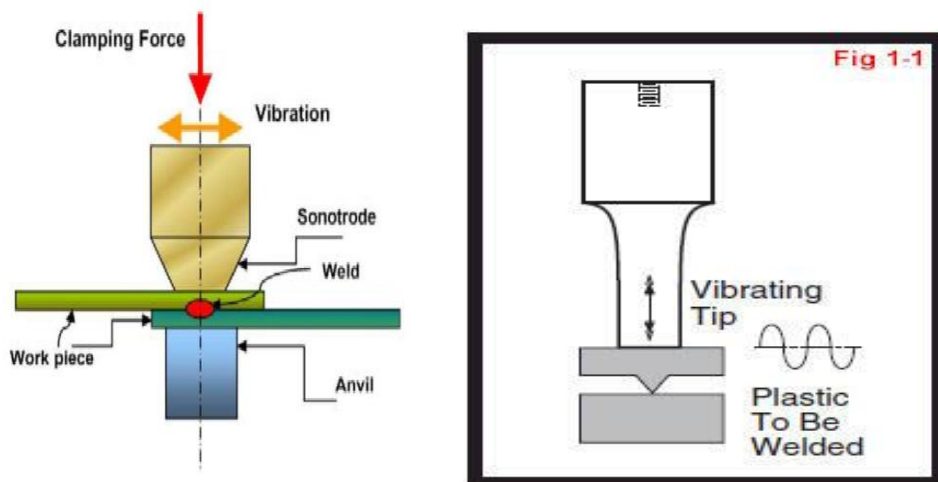
α. πιέζει το κομμάτι στο άλλο και

β. υποβάλλει το άνω κομμάτι και κατ' επέκταση και το κάτω που έρχεται σε επαφή, σε μία ταλάντωση με υπερηχητική συχνότητα.

Αναλυτικότερα, η συγκόλληση με υπερήχους είναι μια τεχνική συγκόλλησης με την οποία οι υψηλές συχνότητες (συνήθως 20 - 40 kHz), υπερηχητικών ακουστικών δονήσεων εφαρμόζονται τοπικά στα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν, τα οποία συγκρατούνται υπό πίεση για να δημιουργήσουν τελικά σταθερή και στιβαρή συγκόλληση. Τα τεμάχια συνδέονται μεταξύ τους μέσω πίεσης με ταυτόχρονη ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Η ταλάντωση αυτή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στη θέση συγκόλλησης και η πίεση ανάμεσα στα κομμάτια δημιουργεί την τελική σύνδεση. Οι δονήσεις είναι υψηλής συχνότητας ταχύτητας υπερήχων. Τα μέρη προς κόλληση, έρχονται σε επαφή υπό πίεση μεταξύ του ταλαντώμενου κέρατος (horn) και μιας ακίνητης βάσης, και υποβάλλονται σε ταλάντωση. Η ταλάντωση είναι είτε οριζόντια, δηλαδή το κέρατος ταλάντωσης κινείται αριστερά-δεξιά και έχουμε εγκάρσια μεταφορά ενέργειας (εικόνα 6.1), είτε κάθετη, δηλαδή το κέρατος ταλάντωσης κινείται πάνω-κάτω και έχουμε διαμήκη μεταφορά ενέργειας (εικόνα



6.2). Η εναλλασσόμενη υψηλή συχνότητα παράγει θερμότητα στο σημείο επαφής και με τη βοήθεια της πίεσης επιτυγχάνεται μια συγκόλληση καλής ποιότητας. Η κάθετη ταλάντωση χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση πλαστικών, ενώ η οριζόντια κυρίως για τη συγκόλληση μετάλλων. Η διάκριση μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών υλικών γίνεται σκόπιμα γιατί σε κάθε κατηγορία έχουμε διαφορετική αρχή λειτουργίας.

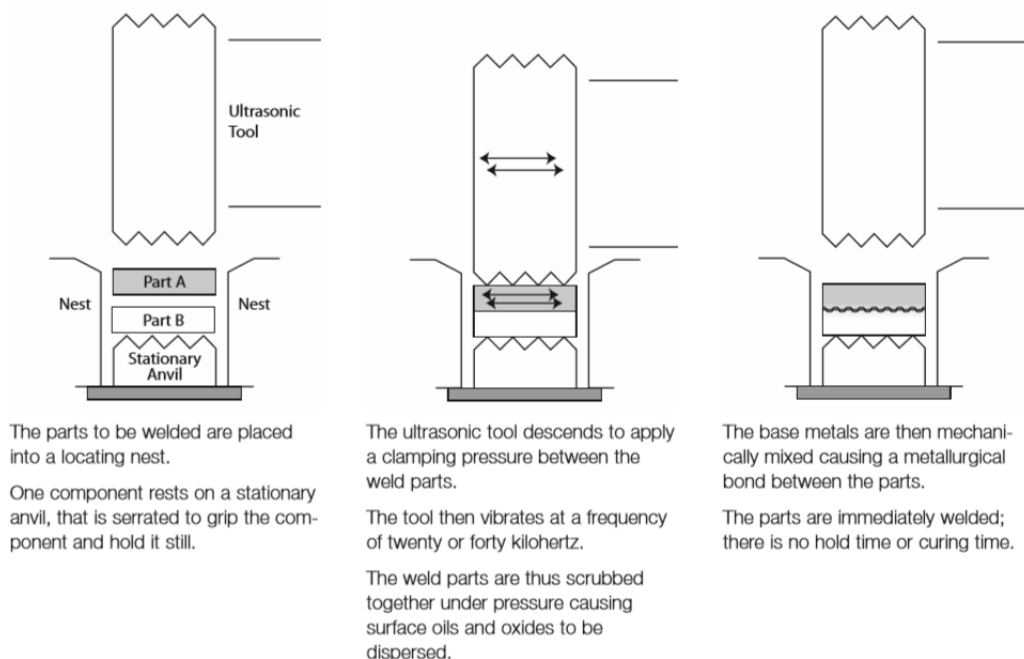


Εικόνα 6.1 συγκόλληση μετάλλων και Εικόνα 6.2 συγκόλληση πολυμερών

#### 1.1.1.6.1 Συγκόλληση μετάλλων με υπερήχους

Σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους συγκόλλησης αλλά και τη συγκόλληση πλαστικών με υπερήχους, η συγκόλληση μετάλλων με υπερήχους δεν είναι θερμική μέθοδος. Δεν προκαλεί την τοπική τήξη των προς συγκόλληση μετάλλων. Αν και υπάρχει θέρμανση, δεν είναι αρκετή για την τήξη των υλικών βάσης. Πιέζει τα κομμάτια μεταξύ τους και εξαναγκάζει το ένα από αυτά να ταλαντώνεται μηχανικά κινούμενο οριζόντια (εικόνα 7). Η συγκόλληση γίνεται με μία περίπλοκη διεργασία όπου εμπλέκονται οι στατικές δυνάμεις συμπίεσης, οι μηχανικές δονήσεις μετατρέπονται σε «παλλόμενες» διατμητικές δυνάμεις που προκαλούν επιφανειακή τριβή μεταξύ των επιφανειών και μία πεπερασμένη αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής. Το μέγεθος των παραγόντων αυτών εξαρτάται από το πάχος των προς συγκόλληση υλικών, την επιφανειακή τους δομή και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η υπερηχητική συγκόλληση συμβαίνει λόγω της υψηλής πίεσης που προκαλεί διασπορά των επιφανειακών οξειδίων και της τοπικής κίνηση των υλικών. Η συχνότητα της ταλάντωσης είναι 20 ή 35 ή 40 KHz (πάνω από 16KHz). Η πιο συνηθισμένη είναι η συχνότητα των 20 KHz που δεν γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο αυτί και επιτρέπει την καλύτερη απόδοση της ενέργειας συγκόλλησης. Οι συχνότητες των 35 και 40 KHz χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που δεν απαιτούν μεγάλη ενέργεια συγκόλλησης. Η διαδικασία συγκόλλησης είναι πολύ σύντομη – κρατά λιγότερο από δευτερόλεπτο – και βασίζεται στο διασκορπισμό των στρωμάτων οξειδίων που καλύπτουν τις επιφάνειες.

## How Ultrasonic Metal Welding Works



**Εικόνα 7 συγκόλληση μετάλλων με τα επιμέρους στάδια: 1) τοποθέτηση τεμαχίων, 2) εφαρμογή υπερήχων και 3) συγκολλημένο δοκίμιο**

Η συγκόλληση με υπερήχους για μέταλλα εφαρμόζεται κυρίως σε χαλκό, άργυρο, αλουμίνιο, νικέλιο και άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα ή νημάτια. Σημαντικές εφαρμογές έχουν και στα λεπτά φύλλα μεταλλικών υλικών που απαιτούν ένα ενιαίο σημείο συγκόλλησης, είτε για συγκόλληση πολλαπλών σημείων, με σύντομη συγκόλληση ταινίας.

Η τεχνική αυτή δεν θα μας απασχολήσει στη παρούσα διπλωματική εργασία.

### **1.1.1.6.2 Συγκόλληση πλαστικών με υπερήχους**

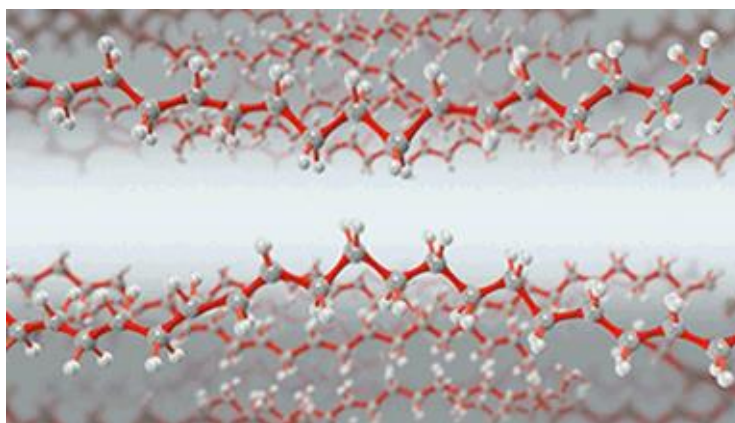
Η συγκόλληση με υπερήχους είναι μια διαδικασία που υψηλή ημιτονοειδής συχνότητα μετατρέπεται σε μηχανική δόνηση και εφαρμόζεται σε δυο ή παραπάνω θερμοπλαστικά στοιχεία προκειμένου να συγκολληθούν μεταξύ τους. Συγκριμένα, η συγκόλληση με υπερήχους θερμοπλαστικών υλικών είναι μια τεχνική συγκόλλησης που χρησιμοποιεί μηχανικές δονήσεις, οι οποίες προκαλούν τριβή μεταξύ των μορίων, η οποία τριβή με τη σειρά της παράγει θερμότητα. Αναλυτικότερα, οι μηχανικές δονήσεις διεγείρουν τα μόρια μέσα στο πλαστικό και αυτά αρχίζουν να κινούνται. Τότε, το πλαστικό υλικό, γίνεται πιο μαλακό και αρχίζει να λιώνει. Δημιουργείται ένας συνεκτικός δεσμός μεταξύ των υλικών που πρόκειται να συγκολληθούν. Μετά από μια μικρή περίοδο συγκράτησης των τεμαχίων, όπου

εφαρμόζεται πίεση σε αυτά, κρύνουν και έτσι επιτυγχάνεται η ένωση σε μοριακό επίπεδο.

### Αρχή λειτουργίας

Οι υπερηχητικές δονήσεις είναι διαμήκη μηχανικά κύματα που:

- Επιτυγχάνουν αποδιαμόρφωση της δομής/ μικροδομής των πλαστικών υλικών
- Προκαλούν εσωτερική τριβή μεταξύ των μορίων



**Εικόνα 8** οι υπέρηχοι ενεργοποιούν τις πολυμερικές αλυσίδες - δημιουργείται θερμότητα λόγω τριβής

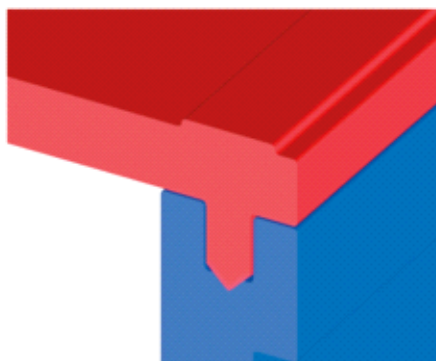
Το αποτέλεσμα της τριβής αυτής προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας που οδηγεί στο λιώσιμο του υλικού και στη συνέχεια στην ένωση του με το συμπληρωματικό του, σε μοριακό επίπεδο. Η τριβή συμβαίνει λόγω αντίστασης του υλικού, στην απορρόφηση και στην ανάκλαση της μηχανικής δόνησης. Έτσι έχουμε αφενός εσωτερική τριβή στους δεσμούς μεταξύ των μορίων και αφετέρου, εξωτερική τριβή μεταξύ των δύο επιφανειών των διατάξεων (επιφανειακή τριβή).

Η συγκόλληση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή χαμηλού πλάτους ταλάντωσης (amplitude) από 1 έως 250  $\mu\text{m}$  και υψηλής συχνότητας (10 έως 70 kHz) μηχανικές δονήσεις στα επιμέρους τεμάχια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κυκλική αποδιαμόρφωση των τεμαχίων, πρωταρχικά στις επιφάνειες επαφής και κατόπιν στις επιφανειακές τραχύτητες. Η κινητική ενέργεια από την κυκλική κίνηση μετατρέπεται σε θερμότητα –μέσα στο θερμοπλαστικό υλικό- μέσω διαμοριακής τριβής και ανεβαίνει η θερμοκρασία των υλικών. Αυτή η θέρμανση είναι παρόμοια μ' αυτή που δημιουργείται σε ένα μεταλλικό καλώδιο που λυγίζεται πάνω-κάτω επανειλημμένα, ή γενικότερα όταν εφαρμόζεται κυκλική φόρτιση σε οποιοδήποτε υλικό. Το ποσό της θερμότητας που προσδίδεται στα θερμοπλαστικά δοκίμια είναι μεγαλύτερο στη διεπιφάνεια (επειδή υπάρχει τραχύτητα στις επιφάνειες (νάνο ή μικρο-εξογκώματα)

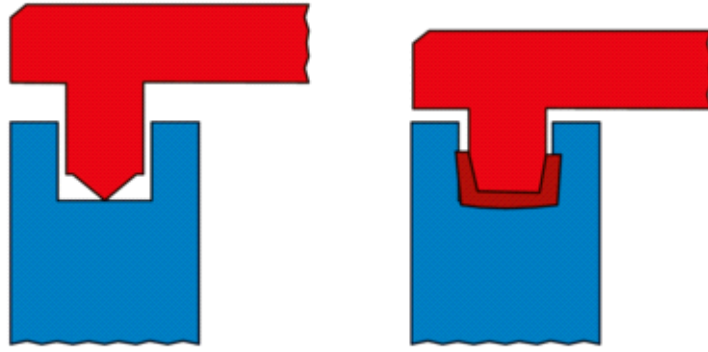
που συγκεντρώνουν μεγαλύτερη παραμόρφωση από τον κύριο όγκο των δοκιμίων) και εκεί λιώνει το θερμοπλαστικό για την τελική σύντηξη των επιμέρους στοιχείων.

Συνήθως, η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για πλαστικά και ειδικά για τη σύνδεση ανόμοιων πλαστικών υλικών. Στη συγκόλληση με υπερήχους, δεν απαιτούνται συνδετικές βίδες, ήλοι, κόλλες ή υλικά που βοηθούν στη συγκόλληση, για τη δημιουργία ενός ισχυρού δεσμού συγκόλλησης. Τα εργαλεία για αυτήν την διαδικασία είναι αρκετά ακριβά γι' αυτό προτιμάται σε μεγάλες ποσότητες παραγωγής. Η συγκόλληση αυτή περιορίζεται στα μικρά συστατικά με τα μήκη συγκόλλησης που δεν υπερβαίνουν λίγα εκατοστόμετρα.

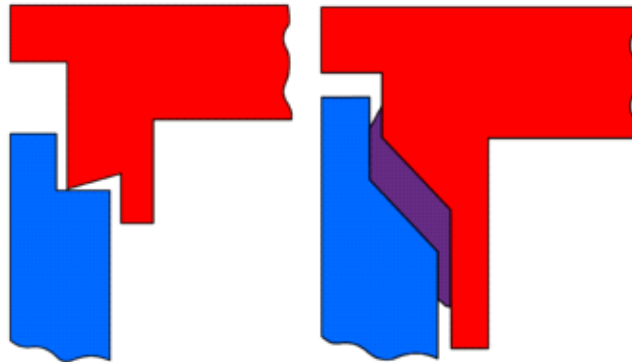
Συνήθως, μια τεχνητή αύλακα (εξόγκωμα) με τη μορφή μιας τριγωνικής προεξοχής σχηματίζεται σε ένα από τα τμήματα προς συγκόλληση για να βελτιωθεί η συνοχή της θέρμανσης και συγκόλλησης, στη μορφή μικρής προβολής που προεξέχει από την επιφάνεια του στοιχείου προς συγκόλληση που βρίσκεται συνήθως στο πάνω μέρος, όπως στην εικόνα 9. Αυτή η προεξοχή αποκαλείται ενεργειακός κατευθυντής ή συγκεντρωτής (energy director or concentrator) και δέχεται τη μεγαλύτερη κυκλική παραμόρφωση και συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας. Η υπερηχητική ενέργεια δηλαδή, εστιάζεται στον ενεργειακό κατευθυντή, που περιορίζεται σε μια τοπικά καθορισμένη περιοχή, ενώ χρησιμοποιείται μόνο λίγη ενέργεια. Συνεπώς, ο ενεργειακός κατευθυντής λιώνει και το λιωμένο υλικό ρέει ανάμεσα στα δοκίμια και με τη ψύξη αυτού δημιουργεί την ένωση και την συγκόλληση των στοιχείων. Υπάρχει μια μεγάλη γκάμα σχεδιασμού των ενεργειακών κατευθυντών και πως αυτοί θα ρέουν ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής, που σε συνδυασμό με τραχείες επιφάνειες, ενισχύουν τη στιβαρότητα και τη δύναμη της συγκόλλησης. Παρακάτω, παρατίθενται διάφοροι σχεδιασμοί ενεργειακών κατευθυντών, και μια εικόνα που δείχνει τη συγκόλληση με ενεργειακό κατευθυντή (εικόνες 10 έως 12). Όμως, είναι πέρα από το σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας να εξετάσει ή να αναλύσει περισσότερο τις εναλλακτικές σχεδίασης των ενεργειακών κατευθυντών.



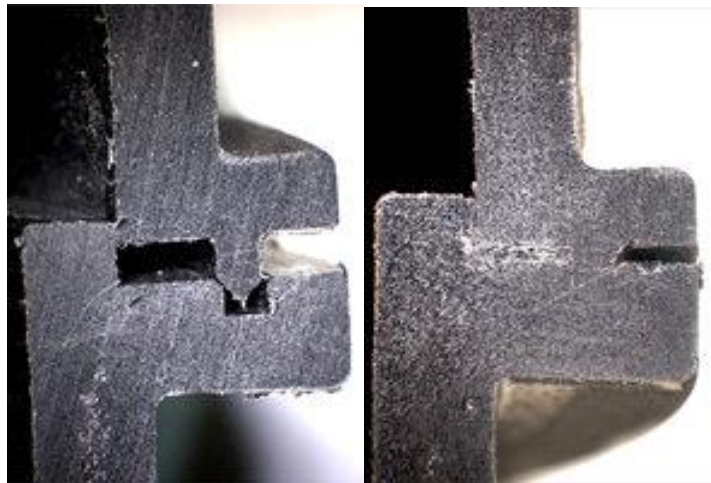
**Εικόνα 9** Ενεργειακός κατευθυντής



Εικόνα 10 διαδικασία λιωσίματος - ενθυλάκωση



Εικόνα 11 διάφορες διατάξεις ενεργειακών κατευθυντών



Εικόνα 12 συγκόλληση με ενεργειακό κατευθυντή (πριν και μετά)

Ενώ οι περισσότερες εφαρμογές συγκόλλησης με υπερήχους εμπεριέχουν τη διάταξη του ενεργειακού κατευθυντή, στη παρούσα διπλωματική εξετάζεται η περίπτωση της συγκόλλησης με υπερήχους χωρίς ενεργειακό κατευθυντή, ώστε αφενός να απαιτείται περαιτέρω σχεδίαση αυτού, και αφετέρου να εξοικονομήσουμε υλικό. Προφανώς όμως, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είναι ο καταλληλότερος για τη συγκόλληση με υπερήχους, αφού η ροή υλικού μέσα στη διάταξη της ενθυλάκωσης, οδηγεί σε μια στιβαρή συγκόλληση, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα λοιπά προβλήματα που αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

### **1.1.1.6.3 Πλεονεκτήματα**

Δεδομένου ότι η συγκόλληση με υπέρηχους είναι πολύ γρήγορη ( ο χρόνος συγκόλλησης είναι συνήθως λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο) και αυτοματοποιείται εύκολα , είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική . Για να εξασφαλιστεί όμως, η επιτυχής συγκόλληση των κομματιών, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός των εξαρτημάτων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, και για το λόγο αυτό η τεχνική είναι καταλληλότερη για μαζική παραγωγή. Η συγκόλληση με υπέρηχους είναι μια από τις δημοφιλέστερες τεχνικές συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Είναι γρήγορη, οικονομική, αυτοματοποιείται εύκολα, και ευνοεί τη μαζική παραγωγή, με ποσοστά παραγωγής που φτάνουν μέχρι και 60 τεμάχια ανά λεπτό. Παράγει συνεπώς, υψηλής αντοχής ενώσεις με τη χρήση σχετικά πολύ μικρού εξοπλισμού συγκριτικά με τις άλλες τεχνικές συγκόλλησης. Οι χρόνοι συγκόλλησης είναι πιο σύντομοι απ' οποιαδήποτε άλλη μέθοδο συγκόλλησης, και δεν υπάρχει καμία ανάγκη εξαερισμού για την αφαίρεση καπνού ή θερμότητας. Η διαδικασία είναι ενεργειακά αποδοτική και οδηγεί σε υψηλή παραγωγικότητα, με το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με πολλές άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Τα εργαλεία και ο εξοπλισμός της συγκόλλησης με υπέρηχους λόγω του μικρού όγκου που έχουν μπορούν να αλλαχτούν γρήγορα, σε αντίθεση με πολλές άλλες μεθόδους συγκόλλησης, με άμεση συνέπεια την αύξηση της ευελιξίας και της μεταβλητότητας της κατεργασίας της συγκόλλησης.

Χρησιμοποιείται συνήθως στη βιομηχανία υγειονομικής υλικού επειδή δεν εισάγει τους μολυσματικούς παράγοντες ή άλλες πηγές υποβάθμισης της συγκόλλησης που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στη βίο-συμβατότητα της οποιαδήποτε ιατρικής συσκευής.

### **1.1.1.6.4 Μειονεκτήματα**

Ένας περιορισμός της συγκόλλησης με υπέρηχους είναι πως με την τρέχουσα τεχνολογία, οι μεγάλες ενώσεις δοκιμίων ( μεγαλύτερες από 250\*300mm ή 750cm<sup>2</sup>; 10\*12 ίντσες), δεν μπορούν να ενωθούν ή συγκολληθούν σε μια ενιαία φάση. Ο κύριος περιορισμός είναι οι διαστάσεις του κέρατος συγκόλλησης, καθώς και ο περιορισμός της βάσης συγκόλλησης.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι μεγάλες επιφάνειες επαφής δεν μπορούν να συγκολληθούν με αυτόν τον τρόπο, ακόμα και με ενεργειακό κατευθυντή γι' αυτό και κρίνονται αντιπαραγωγικές. Απαιτούν πολύ πιο υψηλή ισχύ και η συγκόλληση μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε απροσδιόριστες περιοχές, ενώ η συγκόλληση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί δυνατή.

Επιπλέον, απαιτείται καλός σχεδιασμός των δοκιμίων, με ιδιαίτερη έμφαση στις λεπτομέρειες της συγκόλλησης με υπέρηχους και παράλληλα χρειάζεται να ξέρουμε σε κάθε θερμοπλαστικό υλικό και στην εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί ποιες θα είναι οι καλύτερες συνθήκες για να επιτύχουμε καλές και δυνατές συγκολλήσεις.

Οι υπερηχητικές δονήσεις μπορούν επίσης να βλάψουν τα ηλεκτρικά συστατικά, αν και με χρήση εξοπλισμού υψηλότερης συχνότητας μπορεί να μειωθεί ή και να εξαφανιστεί αυτή η πιθανότητα και κατ' επέκταση η βλάβη. Επίσης ανάλογα με τα μέρη που πρόκειται να συγκολληθούν, οι δαπάνες σχεδίασης των δοκιμών μπορούν να κυμαίνονται σε αρκετά υψηλές τιμές.

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό μειονέκτημα είναι αναπαραγωγή θορύβου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Ειδικά για την ειδική περίπτωση που το κέρασ συγκόλλησης έρχεται πολύ κοντά με τις μεταλλικές επιφάνειες της βάσης, παράγεται ένας ενοχλητικός θόρυβος λόγω της ανάκλασης των υπερήχων. Στην ατυχή περίπτωση που το κέρασ θα έρθει σε επαφή με το μέταλλο της βάσης, όταν εκτελεί εγκάρσια κίνηση, εκτός από την πιθανή καταστροφή του κέρατος, θα προκαλέσει σοβαρή βλάβη στο ανθρώπινο ακουστικό όργανο.

#### **1.1.1.6.5 Εφαρμογές της συγκόλλησης με υπερήχους**

Η συγκόλληση με υπέρηχους χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις σημαντικές βιομηχανίες στις οποίες θερμοπλαστικά πλαστικά φορμάρονται και συγκολλούνται μαζί. Μερικά παραδείγματα των βιομηχανιών αυτών και των εφαρμογών τους είναι τα εξής:

- Κόλληση ομοιογενών θερμοπλαστικών υλικών, φιλμ και συνθετικών υλών
- Βιομηχανία οικιακών συσκευών: πλυντήρια, σίδερα, εξαρτήματα ψυγείων, ηλεκτρική σκούπα
- Υφάσματα: Κοπή ετικέτας, κοπή κουμπότρυπας, κόλληση καλυμμάτων
- Αυτοκινητοβιομηχανία: προφυλακτήρες, φανάρια, καθρέπτες, βαλβίδες μέρη προβολέων, ταμπλό, κουμπιά και διακόπτες, φίλτρα καυσίμων, φίλτρα υγρών, δοχεία ρευστών, κλειδαριές ζωνών καθισμάτων, ηλεκτρονικά κουμπιά, συναρμολόγηση λαμπτήρων, αεραγωγοί, πάνελ των οργάνων, τα πάνελ των πορτών, οι αεραγωγοί, τα τιμόνια, τα τμήματα ταπετσαριών και μηχανών
- Ηλεκτρονική και βιομηχανία συσκευών: διακόπτες, αισθητήρες, USB, κασέτες, δισκέτες, συγκόλληση ενσύρματων συνδέσεων, σπείρες τομέων, μετασχηματιστές και πυκνωτές, συγκόλληση των καλωδίων και των ταινιών καθώς επίσης και ολόκληρα τσιπ στα μικροκυκλώματα.
- Ιατρική βιομηχανία και φαρμακοβιομηχανία: σύριγγες, αρτηριακά φίλτρα, τα φίλτρα αναισθησίας, οι καθετήρες, οι σωλήνες διάλυσης, τα σταγονόμετρα, τα φίλτρα αίματος και φίλτρα αερίου, αποστειρωμένα ιατρικά ενδύματα και τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, οι μάσκες προσώπου τα μικροκυκλώματα που χρησιμοποιούνται στους ιατρικούς αισθητήρες για να ελέγξουν την ανθρώπινη καρδιά στους by pass ασθενείς,



- Βιομηχανία συσκευασίας: προστατευτικά πακέτα (με φουσκάλες), σακούλες, σωλήνες, εμπορευματοκιβώτια αποθήκευσης, σφράγιση εμπορευματοκιβωτίων, σωλήνες και διάφορες άλλες συσκευασίες, όπως οι συσκευασίες κυψελών (blisters), δοχεία γάλακτος και χυμού

Περίληπτικά, οι βιομηχανίες ηλεκτρικών και υπολογιστών, αυτοκίνητων, αεροδιαστημικών, ιατρικών, και συσκευασίας, είναι μερικές από τις πολλές βιομηχανίες στις οποίες η συγκόλληση με υπέρηχους χρησιμοποιείται. Η διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται για να συναρμολογήσουμε από τα μικροκυκλώματα έως τα χαρτοκιβώτια γάλακτος. Οι λόγοι που ολοένα αυξάνεται η χρήση της μεθόδου αυτής από τις βιομηχανίες κυρίως είναι οι μικροί κύκλοι ζωής, η αυτοματοποίηση, τα χαμηλά κόστη παραγωγής, η ευελιξία, η καθαρότητα και η σύνδεση ανόμοιων υλικών. Μερικά από τα μειονεκτήματα της συγκόλλησης με υπέρηχους είναι ότι περιορίζεται από το πάχος των υλικών, απαιτεί ακριβά και εξειδικευμένα εργαλεία και μπορεί να παράγει θόρυβο.

## 2. **Θερμοπλαστικά πολυμερή**

Τα θερμοπλαστικά υλικά ανήκουν σε μια ομάδα τεχνικών πολυμερών τα οποία μπορούν να σχηματιστούν με έγχυση σε καλούπι ή με σφράγιση εν θερμώ με καλούπι. Διαφέρουν από τα άλλα ελαστομερή και τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά, λόγω της ιδιότητας τους να «μαλακώνουν» ή να λιώνουν, είτε να μεταβάλλουν το σχήμα τους, όταν εκτίθενται σε μεγάλες θερμοκρασίες, παράλληλα όμως κρατώντας τη χημική τους σύσταση και τη μοριακή τους δομή σταθερή σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων. Τα υλικά αυτά είναι γενικά άμορφα και δεν έχουν σημείο τήξεως, αλλά μια θερμοκρασιακή περιοχή «υαλώδους μεταπτώσεως» μετά την οποία μεταπίπτουν από σκληρά «γυαλιά» σε μαλακά έως ρευστά υλικά.

Οι μέθοδοι που σχηματοποιούνται τα θερμοπλαστικά είναι : έγχυση σε καλούπι ή με σφράγιση εν θερμώ με καλούπι σε επίπεδη επιφάνεια ή ρολό. Η ευκολία παρασκευής, η ευκολία διαμόρφωσης της επιφάνειας τους, η συμβατότητα με τα βιοϋλικά, το χαμηλό κόστος και η ποικιλία σε αρκετά μεγάλο εύρος υλικών, ώθησαν τους ερευνητές και τους επιστήμονες να αξιολογούν τα θερμοπλαστικά πολυμερή σαν υλικά αναλώσιμων μικροσυστημάτων (MEMS - micro-electrical-mechanical system).

Υλικά όπως το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο PMMA (polymethylmethacrylate), πολυκαρβονικό PC (polycarbonate), πολυμερές κυκλοολεφίνης COP (cyclic olefin polymer) και συμπολυμερές κυκλοολεφίνης COC (copolymer) αποτελούν παραδείγματα θερμοπλαστικών υλικών.

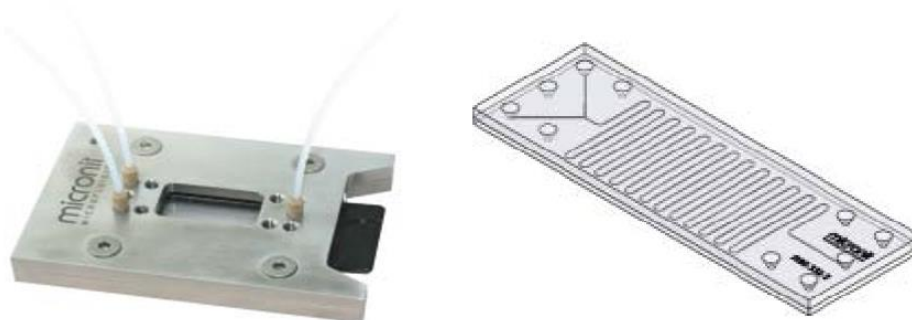


### 3. Μικρορευστονικές διατάξεις

Μικρορευστονική είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που συνδυάζει τις επιστήμες της μηχανικής, φυσικής, χημείας, βιοχημείας και της νανοτεχνολογίας με πρακτικές εφαρμογές στο σχεδιασμό συστημάτων στα οποία μικρές ποσότητες ρευστών διακινούνται και επεξεργάζονται με σκοπό τη χημική ανάλυση ή τη σύνθεση ή την ανίχνευση. Η μικρορευστονική πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των κεφαλών εκτύπωσης inkjet, για κατασκευή τσιπ DNA, για κατασκευή ολοκληρωμένων μικροεργαστηρίων σε ψηφίδα. Σχετίζεται με τη συμπεριφορά, τον ακριβή έλεγχο και τη χειραγώγηση των ρευστών, που περιορίζονται γεωμετρικά σε μια μικρή κλίμακα, συνήθως υπο-χιλιοστού. Συνήθως, *micro* σημαίνει ένα από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μικροί όγκοι ( $\mu\text{L}$ , nL, pL, fL)
- Μικρό μέγεθος (τουλάχιστον μια διάσταση της τάξεως των 1 – 1000  $\mu\text{m}$  )
- Μικρή κατανάλωση ενέργειας
- Επιπτώσεις σε μικρό τομέα

Οι μικρορευστομηχανικές διατάξεις αποτελούνται από μικροκανάλια ροής ρευστών μικρών ποσοτήτων (microfluidics). Το σύστημα ολοκληρωμένης χημικής ανάλυσης (Total analysis system, TAS) είναι μια έννοια που χρησιμοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 80 στην αντιμετώπιση του θέματος της αυτοματοποίησης στην αναλυτική χημεία [Widmer 1983]. Αν και υπάρχουν και πριν από το 1990 παραδείγματα μικρορευστομηχανικών διατάξεων (εικόνα 13) για χημικές εφαρμογές [Terry 1979], η δημοσίευση των Manz et al. [Manz 1990] το 1990 οριοθέτησε τον τομέα της σμίκρυνσης συστημάτων ολοκληρωμένης χημικής ανάλυσης ( $\mu\text{TAS}$ ) συστατικά των οποίων είναι οι μικρορευστομηχανικές διατάξεις. (Boulousis)



Εικόνα 13 Τυπική εμπορική μικρορευστομηχανική διάταξη α) η θήκη που δέχεται την διάταξη με υποδοχές για είσοδο και έξοδο και β) ένας τυπικός μικρομείκτης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως ως υποστρώματα για μικρορευστομηχανικές διατάξεις είναι το πυρίτιο, το γυαλί και τα πολυμερικά υλικά και κατασκευάζονται με

χημική εγχάραξη (υγρή ή σε πλάσμα wet etching or plasma etching) και φωτολιθογραφία (photolithography). Υπάρχει όμως η τάση να κατασκευαστούν πολυμερικές μικρορευστομικές διατάξεις.

Η πολυδυμεθυλοσιλικόνη (PDMS) είναι ένα πολυμερές που γίνεται όλο και πιο δημοφιλές για εφαρμογές σε μικρορευστομηχανικές διατάξεις διότι είναι φθηνό, εύχρηστο, και κατασκευάζεται με τη χρήση έκχυσης σε καλούπι και δεν χρειάζεται καθαρούς χώρους (cleanroom). Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα είναι πολυμερικά πλακίδια όπως τα μεθακρυλικά πολυμερή π.χ. πλεξιγκλάς (PMMA), πολύ-καρβονικά (PC), πολυστυρένιο (PS), πολυτετραφθαλικά (PET), PEEK, COC, COP κ.α.

#### **4. Σκοπός και μέρη της διπλωματικής εργασίας**

Οι πολυμερικές μικρορευστομικές διατάξεις κατασκευάζονται με διάφορες μεθόδους με επικρατέστερη την έγχυση πολυμερούς σε καλούπι και την σφράγιση εν θερμώ. Τα μικροκανάλια είναι μετά την αποτύπωση ανοιχτά «χαντάκια», συνήθως ορθογωνικής διατομής. Τα κανάλια καταλήγουν σε φρεάτια, από τα οποία γίνεται η είσοδος και έξοδος του ρευστού. Μετά την αποτύπωση του μικροκαναλιού πρέπει να ακολουθήσει σφράγιση του πάνω μέρους του με ένα επίπεδο φύλλο πολυμερούς. Το φύλλο αυτό θα συγκολληθεί με το πλακίδιο πάνω στο οποίο βρίσκονται αποτυπωμένα τα μικροκανάλια. Το βήμα αυτό της σφράγισης/συγκόλλησης είναι από τα δυσκολότερα βήματα, αν επιθυμεί κανείς το μικροκανάλι να αντέχει μεγάλες πιέσεις, να έχει ακριβώς ελεγχόμενη διατομή και να μην βουλώσει. Επίσης το βήμα αυτό μπορεί να είναι χρονοβόρο και να περιορίζει την μαζική παραγωγή μικρορευστομικών διατάξεων.

Υπάρχει λοιπόν έντονο επιστημονικό, τεχνολογικό και οικονομικό ενδιαφέρον στην ανάπτυξη νέων τεχνικών σφράγισης/συγκόλλησης φύλλων πολυμερούς με αποτυπωμένα σε αυτά μικροκανάλια. Στην προσπάθεια αυτή εντάσσεται και η παρούσα διπλωματική εργασία.

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση των συνθηκών και των παραμέτρων εκείνων που θα μας επιτρέψουν την αποτελεσματική συγκόλληση των πολυμερικών μικρορευστομικών διατάξεων. Ειδικότερα, η επιτυχής συγκόλληση των συγκεκριμένων υλικών, θα δώσει μια πληθώρα νέων εφαρμογών και θα καταστήσει πιο παραγωγική για βιομηχανική κλίμακα την κατασκευή μικρορευστομικών διατάξεων.

Η συγκόλληση αφορά πολυμερικά υλικά και συγκεκριμένα το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο PMMA (polymethylmethacrylate) και το πολυμερές κυκλοολεφίνης COP (cyclic olefin polymer), χωρίς τη χρήση ενεργειακού κατευθυντή.

Κριτήρια της επιτυχούς συγκόλλησης είναι

1. Ομοιόμορφη συγκόλληση χωρίς ατέλειες
2. Διατήρηση του μικροκαναλιού χωρίς αλλοιώσεις στις διαστάσεις του, χωρίς παραμορφώσεις και χωρίς εισαγωγή ύλης που θα το βουλώνει
3. Αντοχή της συγκόλλησης σε πίεση ρευστού που ρέει στο μικροκανάλι.

Συμπερασματικά, η όλη διαδικασία για την στιβαρή συγκόλληση των πολυμερικών υλικών σε βαθμό που να προσεγγίζει την δημιουργία ενός ενιαίου συσσωματώματος χωρίς ατέλειες, αποτελεί κύριο σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη ως εξής:

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι συγκόλλησης υλικών με έμφαση στην συγκόλληση με υπερήχους, και εισάγεται ο αναγνώστης στο πεδίο της παρούσης εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται εφαρμογές συγκολλήσεων πολυμερών με τη μέθοδο των υπερήχων καθώς και διάφορες εξισώσεις που διέπουν την αρχή λειτουργίας της συγκόλλησης με υπερήχους.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαραγωγή της μεθόδου της συγκόλλησης με υπερήχους και της κατασκευής μικρορευστονικών πολυμερικών διατάξεων.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά στο πρώτο μέρος η προετοιμασία που απαιτείται στα πολυμερικά δείγματα προς συγκόλληση και στο δεύτερο μέρος παρατίθεται ο σχεδιασμός και η ανάλυση των πειραμάτων.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα στην περιοχή λειτουργίας και αξιολογούνται ανάλογα με την ποιότητα συγκόλλησης.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο κεφάλαιο 7 αναφέρονται οι προοπτικές της συγκόλλησης με υπερήχους και η μελλοντική εργασία.

# Κεφάλαιο 2

---

## 2. Τεχνολογική Στάθμη και βιβλιογραφική επισκόπηση

### 2.1. Ιστορική αναδρομή της συγκόλλησης με υπερήχους

Η πρώτη πρακτική εφαρμογή της υπερηχητικής συγκόλλησης για άκαμπτα πλαστικά πραγματοποιήθηκε το 1960. Σε αυτό το χρονικό σημείο, υπήρχε δυνατότητα συγκόλλησης μόνο για σκληρά πλαστικά. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη μέθοδο της συγκόλλησης με υπερήχους άκαμπτων θερμοπλαστικών απονεμήθηκε στους Robert Soloff και Seymour Linsley το 1965. Ο Soloff, ο ιδρυτής της Sonics & Materilas Inc., ήταν διευθυντής εργαστηρίου στο Branson Instruments όπου λεπτά φιλμ πλαστικών συγκολλούνταν σε τσάντες και σωλήνες, χρησιμοποιώντας υπερηχητικούς ανιχνευτές. Ο Soloff, κάποια στιγμή, ακούσια μετακίνησε τον υπερηχητικό ανιχνευτή κοντά σε ένα αυτόματο διανομέα πλαστικής ταινίας και παρατήρησε ότι περίπου το μισό κομμάτι της πλαστικής ταινίας του διανομέα είχε συγκολληθεί μαζί. Έτσι, συμπέρανε ότι ο ανιχνευτής δεν απαιτεί να κινείται χειροκίνητα γύρω από το μέρος που πρόκειται να συγκολληθεί, αλλά ότι η υπερηχητική ενέργεια μπορεί να «ταξιδέψει» μέσα και γύρω από το άκαμπτο πλαστικό και να συγκολλήσει μια ολόκληρη στοιβάδα υλικών. Η πρώτη του κίνηση ήταν να αναπτύξει την πίεση στην υπερηχητική συγκόλληση. Η πρώτη εφαρμογή αυτής της νέας τεχνολογίας ήταν στη βιομηχανία παιχνιδιών.

Το πρώτο αυτοκίνητο κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από πλαστικό, συναρμολογήθηκε χρησιμοποιώντας συγκόλληση με υπερήχους το 1969. Ακόμη κι αν τα πλαστικά αυτοκίνητα δεν βρήκαν εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, η υπερηχητική συγκόλληση βρήκε, αλλά και σε πολλούς άλλους βιομηχανικούς τομείς. Συγκεκριμένα, στο τομέα της βιομηχανίας που απαιτεί αυτοματισμούς και επαναληψιμότητα έχει χρησιμοποιηθεί τακτικά από τη δεκαετία του 1980. Πλέον, χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών όπως αναπτύχθηκε παραπάνω.

### 2.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση στη συγκόλληση μικρορευστονικών πολυμερικών διατάξεων με υπερήχους.

Από τον οδηγό συγκόλλησης με υπερήχους (Assebly , Welding), έχουμε ότι ο χρόνος για να φτάσουν στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ) είναι αρκετά μεγαλύτερος για δοκίμια που δεν έχουν ενεργειακό κατευθυντή. Στα δοκίμια που έχουμε ενεργειακό κατευθυντή έχουμε χρόνους συγκόλλησης από 0.5 έως 2 με 3 δευτερόλεπτα, συνεπώς για δοκίμια χωρίς ενεργειακό κατευθυντή θα πρέπει να έχουμε χρόνους γύρω στα 10 δευτερόλεπτα. Στο χαρακτηριστικό διάγραμμα που

παρατίθεται φαίνεται η επίδραση του ενεργειακού κατευθυντή τόσο στη θερμοκρασία, όσο και στο χρόνο συγκόλλησης, στην επόμενη εικόνα 14.

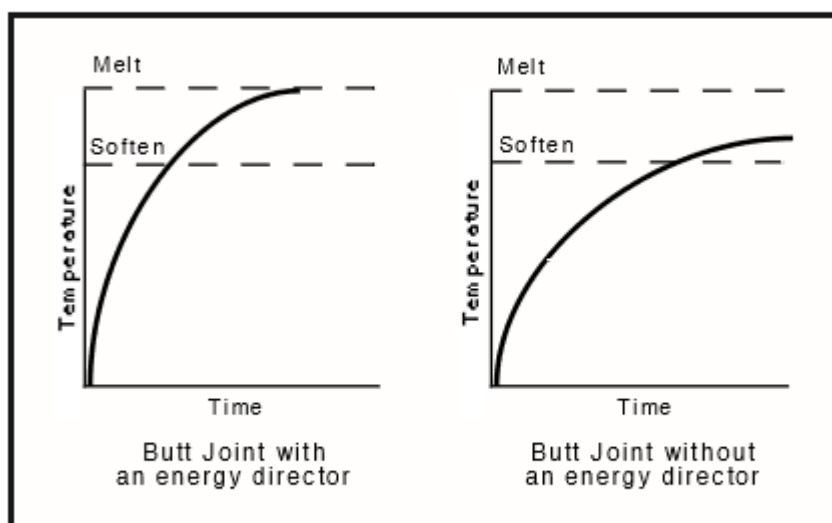
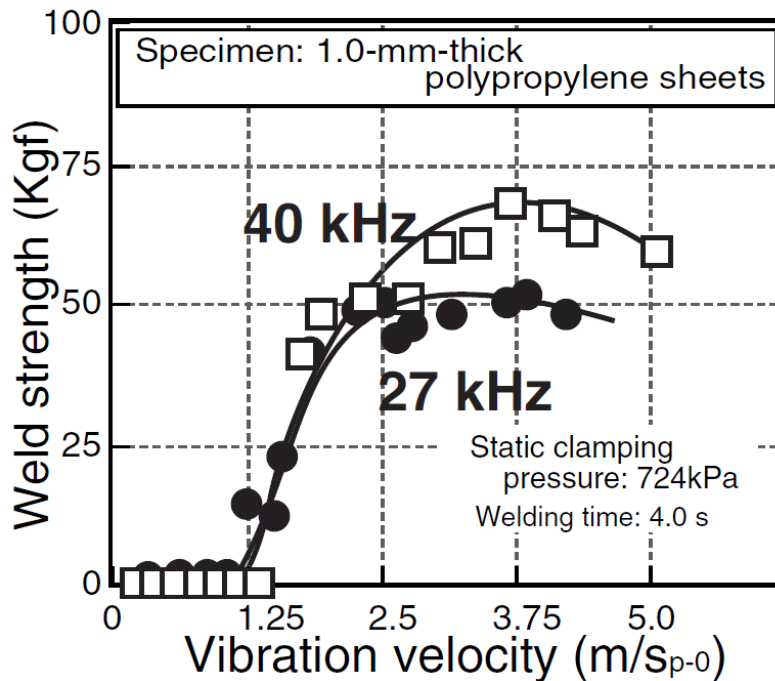


Figure 3-6 Time and Temperature Graphs for Butt Joints

Εικόνα 14 Καμπύλη θερμοκρασίας - χρόνου με ενεργειακό κατευθυντή και χωρίς

Το 2002 οι Tsujino, Hongoh και Ueoka (Tsujino02 2002) απέδειξαν ότι η αύξηση της συχνότητας των υπερήχων επιτυγχάνει καλύτερη και πιο δυνατή συγκόλληση. Η αιτία είναι πως στη συγκόλληση με υπερήχους στα πλαστικά υλικά, ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας της δόνησης δεν απορροφάται από το πλαστικό υλικό και η ενέργεια από τη δόνηση χάνεται. Η εικόνα 15 μας δείχνει τη σχέση της ταχύτητας δόνησης με τη δύναμη συγκόλλησης για τεμάχια από πολυπροπυλένιο σε συνθήκες συγκόλλησης των 27 kHz και των 40 kHz. Η στατική δύναμη που ασκήθηκε από το κέρασ συγκόλλησης ήταν 724 kPa και ο χρόνος συγκόλλησης 4 δευτερόλεπτα. Όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα η δύναμη συγκόλλησης είναι η ίδια μέχρι 2 m/s της ταχύτητας δόνησης αλλά από εκεί και μετά η δύναμη συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερη συχνότητα, στην ίδια ταχύτητα.

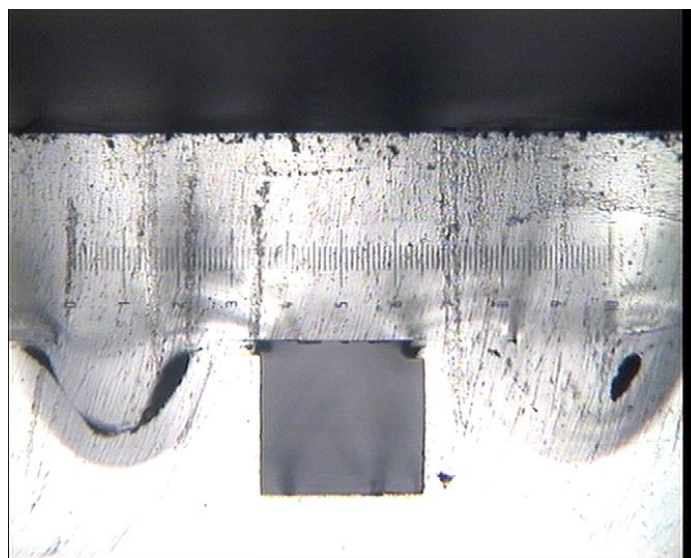


Εικόνα 15 σχέση ταχύτητας δόνησης - δύναμης συγκόλλησης

Το 2006 οι Truckenmuller, Ahrens και Cheng (Truckenmüller, Ahrens et al. 2006) πραγματοποίησαν τη πρώτη συγκόλληση με υπερήχους σε πολυμερική μικρορευστονική διάταξη. Ονόμασαν τη διαδικασία «μικρο συγκόλληση με υπερήχους», χρησιμοποίησαν το στάνταρ εξοπλισμό της συγκόλλησης με υπερήχους και σφράγισαν μικροκανάλι συναρμολογώντας μικροαντλία σε αυτό, για την κατεύθυνση της ροής. Το κανάλι είχε πλάτος και βάθος 500μm. Οι αντλίες βοήθησαν ώστε να μπορέσει να εξεταστεί η πίεση που μπορεί να ‘αντέξει’ το κανάλι και κατ’ επέκταση την ποιότητα της συγκόλλησης. Τα υλικά που συγκολλήθηκαν ήταν δύο πόλυμερή, το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA) και το PEEK. Η συγκόλληση αυτή περιελάμβανε ενεργειακούς κατευθυντές (energy directors), αν και είχαν μικρότερο μέγεθος από αυτό που υπήρχε μέχρι τότε σε άλλες εφαρμογές. Αναφέρεται ότι τα δοκίμια τους κατασκευάστηκαν ώστε να έχουν μια λειτουργική δομή, που είναι οι ίδιες οι (μικρο) ρευστονικές διατάξεις και οι βοηθητικές διατάξεις που αποσκοπούν στην ένωση. Οι τελευταίες αποτελούνται από τους ενεργειακούς κατευθυντές και τις αντιδιαμετρικές διατάξεις που θα εισχωρήσουν οι ενεργειακοί κατευθυντές, καθώς και βοηθητικές διατάξεις- οδηγί, ώστε να ελέγχεται και να καθοδηγείται η ροή του λιωμένου υλικού. Όλες οι βοηθητικές διατάξεις συνορεύουν με τις μικρορευστονικές διατάξεις, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG in Karlsbad, κατασκευασμένη στη Γερμανία, με γεννήτρια παραγωγής συχνότητας των 35 kHz και ισχύς των 1000W.

Μετά τη σφράγιση, πραγματοποίησαν διάφορα τεστ στα δοκίμια με ελάχιστη αντοχή των καναλιών σε υπερπίεση 0.4MPa. Τα ρευστά που έρρευσαν μέσα στο κανάλι ήταν άζωτο και νερό, σε δύο κατευθύνσεις, μπρος και πίσω. Η διαρροή είχε ποσοστό μικρότερο του 0,6 sccm για το άζωτο και από 0 ml / min για το νερό ( εντός της ακρίβειας του οργάνου μέτρησης που χρησιμοποίησαν ), σε κάθε περίπτωση για το

φάσμα της πίεσης 0-1000 hPa , η ροή είναι πρακτικώς πιο δύσκολη (απαιτεί μεγαλύτερη πίεση) στην αντίστροφη κατεύθυνση.



**Εικόνα 16: 1<sup>η</sup> συγκόλληση μικρορευστονικής διάταξης με ενεργειακό κατευθυντή**

Στη παραπάνω εικόνα 16 φαίνεται το τετραγωνικής διατομής κανάλι (με σκούρο τετράγωνο) διαστάσεων 500 \* 500  $\mu\text{m}$ . Αν και δεν αναφέρονται οι διαστάσεις των ενεργειακών κατευθυντών, από την εικόνα μπορούμε να υποθέσουμε ότι έχουν ύψος περίπου 250-300  $\mu\text{m}$  και απέχουν από τη μικρορευστονική διάταξη περίπου 200  $\mu\text{m}$ . Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτέλεσαν ξεγρέζισμα και λείανση των δοκιμίων μετά την κοπή τους, και ότι θα πρέπει να είναι υποχρεωτικός ο παραλληλισμός και η επιπεδότητα του κέρατος συγκόλλησης, της βάσης συγκράτησης και των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν.

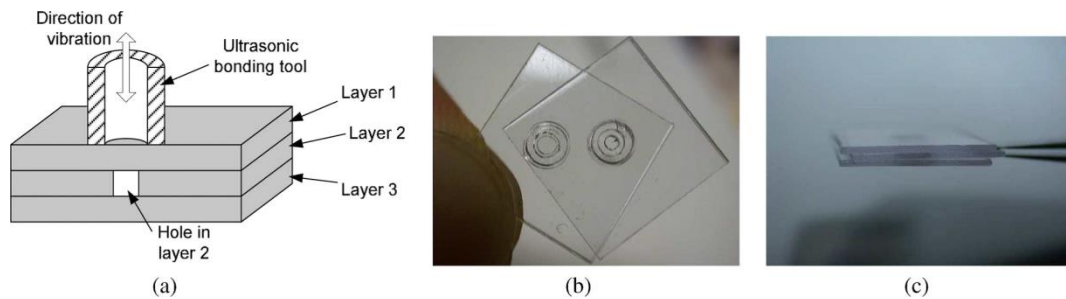
Το 2008 οι A. Siddiq και E. Ghassemieh (Siddiq and Ghassemieh 2008) έκαναν μια πρώτη προσπάθεια θεωρητικής ανάλυσης της συγκόλλησης με υπερήχους για μέταλλα.

Ο μηχανισμός της υπερηχητικής συγκόλλησης είναι υπό μελέτη εδώ και πολλές δεκαετίες , αλλά ακόμα δεν είναι πλήρως κατανοητός ( Tucker , 2002 ) . Ένα πολύ απλό ορισμό του για το μηχανισμό μιας τέτοιας συγκόλλησης προτάθηκε από Tucker (2002). Βασισμένοι σ' αυτό, οι A. Siddiq και E. Ghassemieh πραγματοποίησαν μια θερμομηχανική ανάλυση της υπερηχητικής συγκόλλησης σε κράμα αλουμινίου. Ανέλυσαν τις επιδράσεις των παραμέτρων της διεργασίας συγκόλλησης με υπερήχους, όπως εφαρμοζόμενο φορτίο (η πίεση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, welding force), το πλάτος των υπερηχητικών δονήσεων (amplitude), και η ταχύτητα του κέρατος συγκόλλησης (sonotrode), για το έργο τριβής στη διεπιφάνεια. Εξήγησαν τη μεταβολή του έργου τριβής στη διεπιφάνεια με βάση το θερμικό και ακουστικό ‘μαλάκωμα’ του δείγματος κατά τη διάρκεια της υπερηχητικής συγκόλλησης.

Το 2009 οι Jongbaeg Kim, Bongwon Jeong, Mu Chiao, και Liwei Lin,(Kim 2009) πραγματοποίησαν σφράγιση και πλήρης κατασκευή μικροσυστήματος με συγκόλληση με υπερήχους. Μετά από πειραματικά δεδομένα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ένα μέτριο εύρος συχνοτήτων είναι 60-75 kHz για συγκολλήσεις και

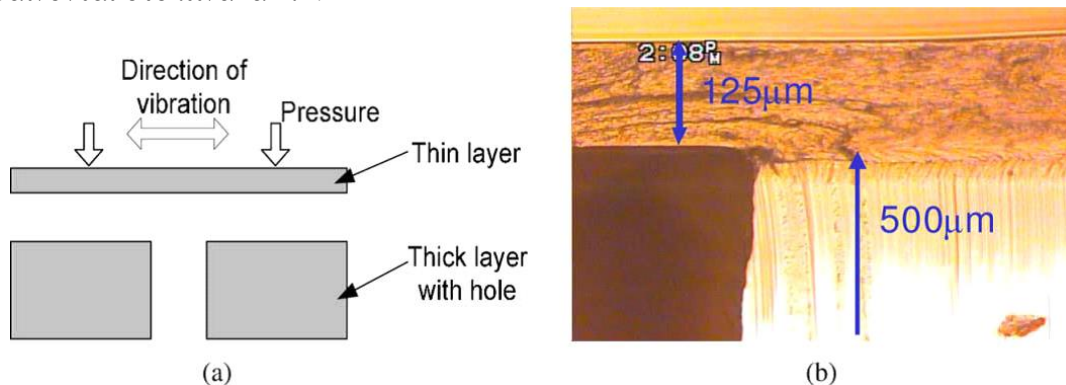


κατασκευές για εφαρμογές MEMS, όπου η δονητική μετατόπιση είναι της τάξεως αρκετών μικρών. Στην παρακάτω εικόνα, επιδεικνύουν τα αποτελέσματα της συγκόλλησης με υπερήχους σε οξική κυτταρίνη (cellulose acetate), η οποία είναι ένα βιοσυμβατό, θερμοπλαστικό πολυμερές. Δύο ή τρία υποστρώματα πάχους 500μm οξικής κυτταρίνης στοιβάζονται και συγκολλούνται με χρήσης της υπερηχητικής ενέργειας. Για τη συγκόλληση τριών υποστρωμάτων, στο μεσαίο υπόστρωμα δημιουργείται μια οπή πριν τη συγκόλληση με διάμετρο ενός χιλιοστού (1mm), για να δημιουργήσει μια κοιλότητα ίδιων διαστάσεων μετά τη συγκόλληση με υπερήχους. Όπως φαίνεται στη εικόνα 17(α), η κατεύθυνση της δόνησης είναι κάθετη προς τα στοιβαγμένα υποστρώματα οξικής κυτταρίνης και το δυναμικό φορτίο εφαρμόζεται στις επιφάνειες των υποστρωμάτων. Αυτό το φορτίο παραμορφώνει την περιοχή κάτω από το εργαλείο συγκόλλησης τοπικά σε ένα σχήμα δακτυλίου όπως φαίνεται στο σχήμα 17 (β). Στην εικόνα 17 (γ), είναι η πλευρική όψη των τριών υποστρωμάτων όπου με μια τσιμπίδα συγκρατείται μόνο το μεσαίο υπόστρωμα του συγκολλημένου θερμοπλαστικού.



Εικόνα 17 συγκόλληση τριών στρωμάτων

Για να αποφύγουν τη συγκέντρωση ενέργειας στο σχήμα του δακτυλίου από τη κατακόρυφη μετάδοση της υπερηχητικής ταλάντωσης, χρησιμοποίησαν την πλευρική ταλάντωση, όπως αυτή χρησιμοποιείται για συγκόλληση υπερήχων μετάλλων. Στο σχήμα 18 (α), φαίνεται ο μηχανισμός συγκόλλησης για ένα υπόστρωμα πάχους 500μm και ένα λεπτότερο υπόστρωμα πάχους 125μm οξικής κυτταρίνης. Στο σχήμα 18 (β) φαίνεται το συγκολλημένο δείγμα σε εγκάρσια τομή. Σ' αυτή τη περίπτωση, οι βασικοί παράμετροι είναι όπως στην υπερηχητική συγκόλληση μετάλλων, η υπερηχητική ισχύς, ο χρόνος συγκόλλησης και το φορτίο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Το κατάλληλο φορτίο κρίνεται εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για το "μαλάκωμα" των πολυμερικών υλικών και η παραπάνω ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση του πολυμερούς, αρκετή ώστε είτε να στενέψει αρκετά, είτε να βουλώσει το μικρορευστονικό κανάλι. Οι συνθήκες της συγκόλλησης φαίνονται στο πίνακα 2.1.



Εικόνα 18 Συγκόλληση με υπερήχους με πλευρική ταλάντωση του κέρατος

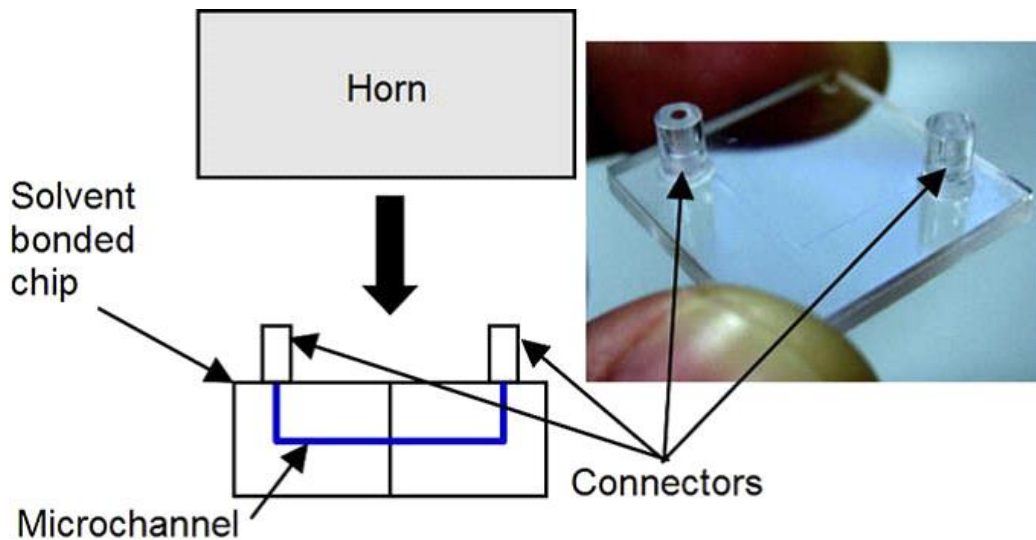


**Πίνακας 2.1**

Parameters	Polymeric bonding (cellulose acetate)
Power supply output	20 Watts
Bonding time	2.0 sec
Pressure	1.03 ~ 2.58 MPa
Vibration amplitude	N/A
Total bonding area on one chip	1.90 mm <sup>2</sup>

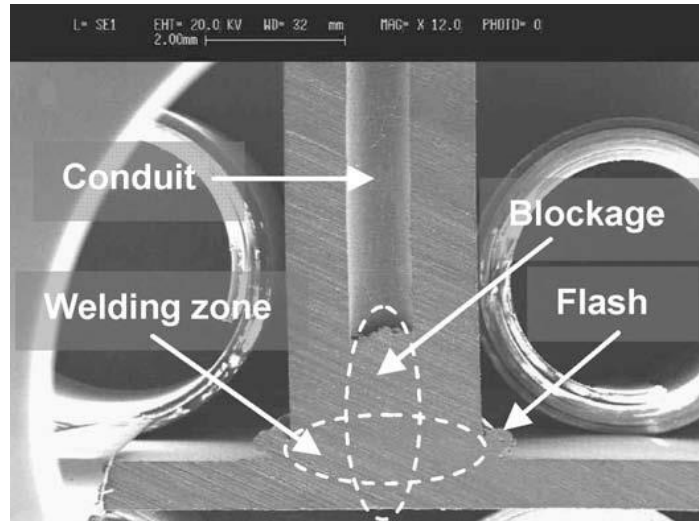
Στα συμπεράσματα των Jongbaeg Kim, Bongwon Jeong, Mu Chiao, και Liwei Lin, αναφέρεται χαρακτηριστικά πως εκτός από τις τρεις σημαντικές παραμέτρους της συγκόλλησης με υπερήχους (ισχύς, χρόνος και πίεση), η επιπεδότητα των επιφανειών, καθώς και η στενή επαφή μεταξύ τους, είναι επίσης δύο πολύ σημαντικές παράμετροι για την επιτυχή συγκόλληση. Για να επιτευχθεί ερμητική σφράγιση, απαιτείται ακριβής ρύθμιση του συστήματος και η λεπτομερής σχεδίαση των εξαρτημάτων προς συγκόλληση. Ακόμα και αν η υπερηχητική συγκόλληση δεν απαιτεί καθαρισμό του συστήματος ή των δοκιμίων πριν τη διαδικασία, τα μεγάλα σωματίδια και οι σκόνες θα πρέπει να αποφεύγονται για να επιτευχθεί η καλή επαφή των δύο επιφανειών που πρόκειται να συγκολληθούν. Επίσης, καθώς χρησιμοποίησαν δύο διαφορετικές διαδικασίες υπερηχητικής συγκόλλησης για θερμοπλαστικό υλικό, συμπεράναν πως η συγκόλληση με πλευρική δόνηση, δηλαδή η εγκάρσια μεταφορά ενέργειας, δίνει καλύτερα αποτελέσματα συγκόλλησης για τη σφράγιση και κατασκευή εφαρμογών MEMS, ενώ η κάθετη δόνηση, δηλαδή η διαμήκης μεταφορά ενέργειας, μπορεί να οδηγήσει με τοπική συγκέντρωση ενέργειας και κρίνεται καλύτερη για συγκεκριμένες μόνο εφαρμογές σφράγισης και συγκόλλησης. Τέλος, αναφέρεται πως με κατάλληλη σχεδίαση της βάσης συγκράτησης των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με υπερήχους, οι παραπάνω τεχνικές υπερηχητικής συγκόλλησης έχουν τη δυνατότητα να επεκταθούν σε κατασκευές με επιπεδότητα λεπτών τεμαχίων (wafer), με χαμηλή θερμοκρασία στις επιφάνειες και στα υποστρώματα των υλικών.

Την ίδια χρονιά, οι S.H. Ng, Z.F. Wang και N.F. de Rooij (Ng, Wang et al. 2009), κατάφεραν να συγκολλήσουν με τη μέθοδο των υπερήχων, διάταξη με δύο κατακόρυφα κανάλια (τα οποία συγκολλήθηκαν ταυτόχρονα) διασυνδεδεμένα από ένα οριζόντιο, όπως φαίνεται στην εικόνα 19, με χρόνους συγκόλλησης μικρότερους από 1 δευτερόλεπτο. Το υλικό που χρησιμοποίησαν ήταν πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA). Η οριζόντια πλάκα έχει πάχος 1 χιλιοστό (1mm) και το κανάλι είναι διαμέτρου ενός χιλιοστού στους κάθετους κυλίνδρους εξωτερικής διαμέτρου 3mm και ύψους 5-10 mm. Οι οριζόντιες επιφάνειες στο σχήμα έχουν συγκολληθεί με τη βοήθεια διαλύτη (solvent).

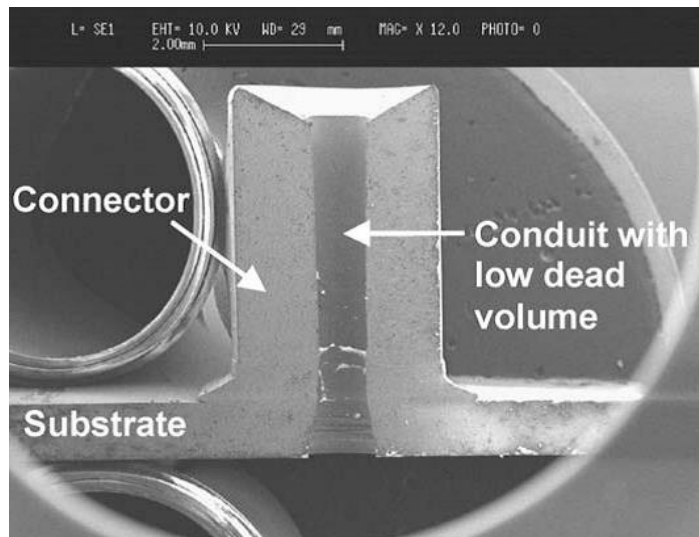


Εικόνα 19 διάταξη με κατακόρυφα κανάλια

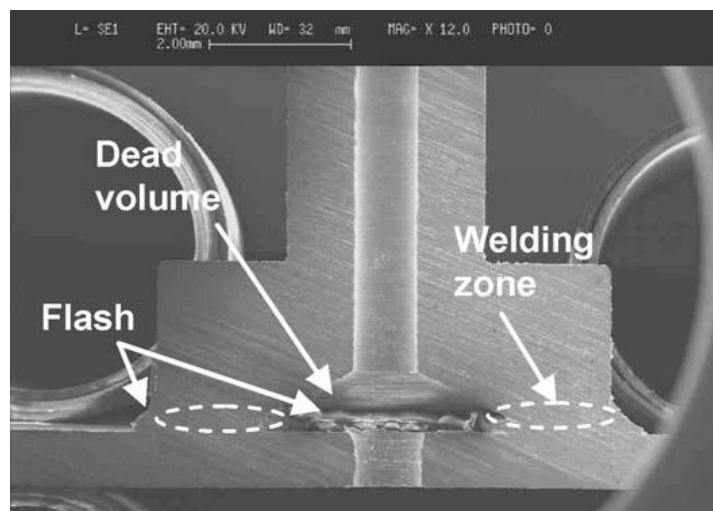
Το μηχάνημα που εφάρμοσαν τη συγκόλληση με υπερήχους ήταν το Branson 91 AES με ανώτατη ισχύς 2 kW, με μέγιστο φορτίο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (welding force) 2.8 kN. Ο μετατροπέας (converter) είχε συχνότητα 20 kHz και το booster ήταν αναλογίας 1:2,5. Το πλάτος ταλάντωσης είχε εύρος από 25 έως 50  $\mu\text{m}$ . Το ελάχιστο πλάτος ταλάντωσης που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση είναι 41.5  $\mu\text{m}$ . Εξαιτίας της ροής του υλικού με την εφαρμογή των υπερήχων, παρατηρήθηκε βούλωμα του καναλιού (εικόνα 20), πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε με τη μείωση του ύψους των κυλίνδρων από τα 10mm σε 5mm και χρήση ενθέτου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ώστε να εμποδίζει το υλικό που ρέει να βουλώσει το κανάλι. Παρατήρησαν ότι ο χρόνος συγκόλλησης έχει τεράστιο ρόλο στη συγκόλληση, καθώς όσο πιο μεγάλος είναι τόσο πιο δυνατή κρίνεται η συγκόλληση. Όμως πολύ μεγάλος χρόνος έχει σαν αποτέλεσμα το υπερβολικό λιώσιμο του υλικού, ή ακόμα και κάψιμο. Στα 0.3 δευτερόλεπτα (300msec) δεν υπήρχε συγκόλληση των καθέτων αγωγών με το υπόστρωμα. Συμπεράναν ότι ο χρόνος συγκόλλησης και το πλάτος ταλάντωσης είναι οι σημαντικότεροι παράμετροι της συγκόλλησης θερμοπλαστικών με υπερήχους. Επίσης, εξαιτίας της γεωμετρίας της διάταξης, παρατήρησαν ότι όσο μεγαλύτερο ήταν το βούλωμα του καναλιού τόσο καλύτερη ήταν η συγκόλληση και αντιστρόφως. Μετά από σειρά πειραμάτων με ένθετο στοιχείο στους κάθετους κυλίνδρους κατάφεραν να συγκολληθούν τη διάταξη (εικόνα 21), ενώ τελικώς τα κατάφεραν και χωρίς τη χρήση ενθέτου με καταλληλότερο σχεδιασμό της γεωμετρίας του καναλιού, με τη δημιουργία «χωνιού» στην είσοδο και την έξοδο της μικρορευστονικής διάταξης, με γωνία 60° και 120° αντίστοιχα (εικόνα 22).



**Εικόνα 20 βουλωμένο κανάλι**



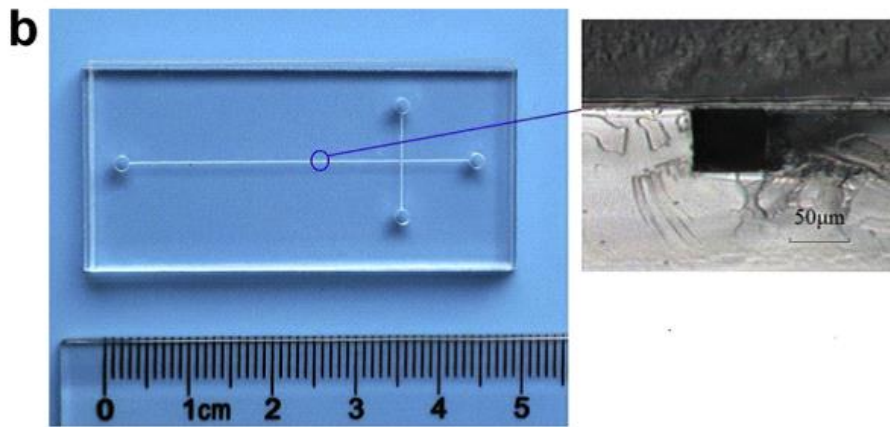
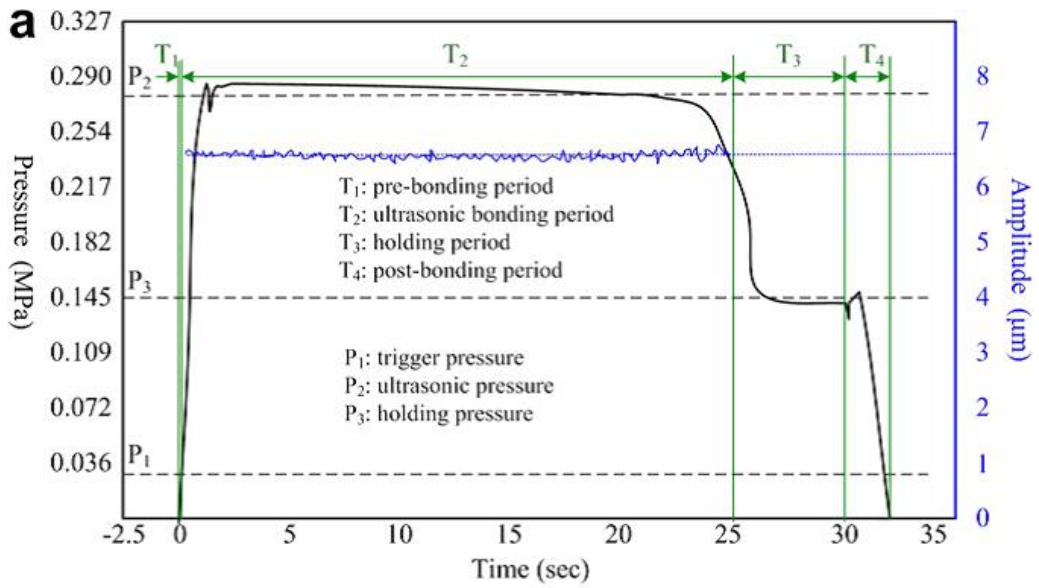
**Εικόνα 21 συγκόλληση με χρήση ενθέτου για την αποφυγή βουλώματος καναλιού**



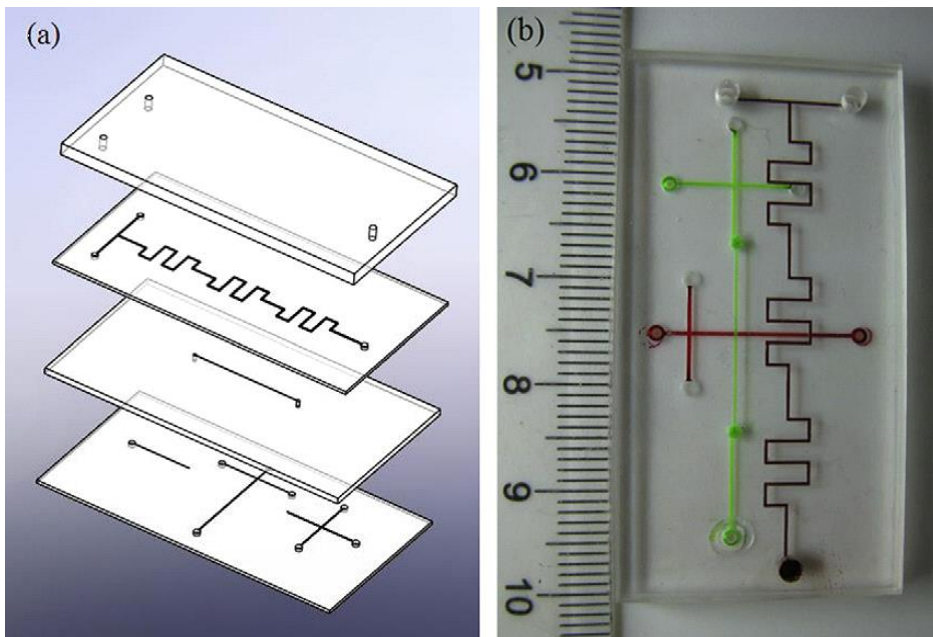
**Εικόνα 22 Συγκόλληση χωρίς τη χρήση ενθέτου**

Το 2010 Yi Luo, Zongbo Zhang, Xiaodong Wang, Yingsong Zheng (Luo, Zhang et al. 2010) χρησιμοποίησαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στη συγκόλληση μικρορευστονικών πολυμερικών διατάξεων. Και στις δύο προσεγγίσεις, η συγκόλληση επιτυγχάνεται χωρίς λιώσιμο, δεν χρησιμοποιούνται ενεργειακοί κατευθυντές (energy directors) και έτσι επιλύουν το πρόβλημα της ροής του λιωμένου υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με υπερήχους. Το σκεπτικό της παραπάνω ομάδας ήταν να επιτύχει όσο το δυνατόν πιο σφιχτή σφράγιση μεταξύ των δοκιμίων, με την ελάχιστη δυνατή παραμόρφωση. Το κρίσιμο πλάτος ταλάντωσης και στις δύο μεθόδους επιλέχτηκε έτσι ώστε οι διατάξεις να μην ξεπερνούν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$  του πολυμερές. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με ειδικές διατάξεις θερμομέτρων εσωτερικά της διάταξης. Το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε ήταν το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA). Τα δοκίμια από PMMA είχαν πάχος 2 mm και το κανάλι τους ήταν βάθους και πλάτους 80  $\mu\text{m}$ . Η εμπορική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Branson 2000X f/aef, Branson, USA, η οποία παράγει συχνότητες των 30 kHz. Οι διαστάσεις του κέρατος συγκόλλησης ήταν 30 mm x 55 mm. Το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης είναι τα 60  $\mu\text{m}$ , ενώ τα πειράματα έγιναν από πλάτη ταλάντωσης 6  $\mu\text{m}$  έως 12  $\mu\text{m}$ .

Η πρώτη μέθοδος αφορούσε τη συγκόλληση με υπερήχους με τη βοήθεια προθέρμανσης. Με μια πλάκα μετάλλου η οποία εμπεριείχε θερμοστοιχείο, βοηθούσε ώστε να φτάσει η θερμοκρασία των δοκιμίων στους 70 °C. Έπειτα, έκαναν εφαρμογή της συγκόλλησης με υπερήχους, με διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης και διαφορετικούς χρόνους, έτσι ώστε το PMMA να μην ξεπερνάει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης που είναι  $T_g = 105$  °C στην περίπτωση τους. Με τον ίδιο τρόπο κατάφεραν και κόλλησαν και μια διάταξη τεσσάρων υποστρωμάτων με θερμοκρασία προθέρμανσης στους 75 °C. Η συγκόλληση δύο υποστρωμάτων φαίνεται στην εικόνα 23 καθώς και τα διάφορα στάδια των περιόδων που συμβάλλουν στην συγκόλληση, αλλά και τη τάξη μεγέθους των διαφορετικών πιέσεων που ασκούνται κατά τη διάρκεια αυτής. Η συγκόλληση πολλαπλών υποστρωμάτων φαίνεται στην εικόνα 24.

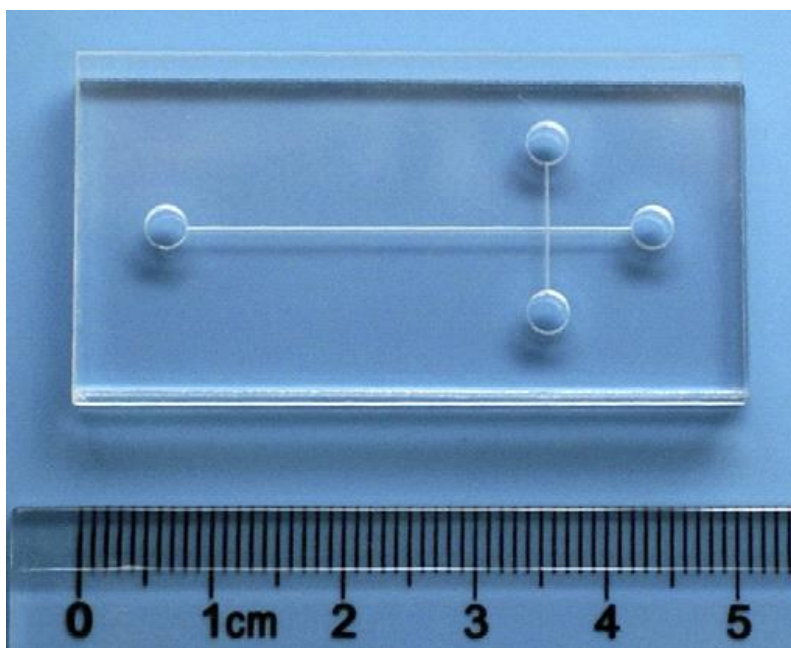


Εικόνα 23 (α) Στάδια των περιόδων με διαφορετικές θερμοκρασίες συναρτήσει των πιέσεων και των πλατών ταλάντωσης (β) Συγκόλληση υπερήχων με τη βοήθεια προθέρμανσης



Εικόνα 24 Ταυτόχρονη συγκόλληση πολλών δοκιμίων με υπερήχους υποβοηθούμενη από προθέρμανση των δοκιμίων

Η δεύτερη μέθοδος αφορούσε τη συγκόλληση με υπερήχους με τη βοήθεια διαλύτη. Ο διαλύτης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ισοπροπανόλη (IPA). Έπειτα, έκαναν εφαρμογή της συγκόλλησης με υπερήχους, με αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C), με διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης και διαφορετικούς χρόνους, έτσι ώστε το PMMA να μην ξεπερνάει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης που είναι  $T_g = 105\text{ }^\circ\text{C}$ . Στην εικόνα 25 φαίνεται η συγκόλληση που επιτεύχθηκε στις βέλτιστες συνθήκες.



Εικόνα 25 Συγκόλληση υπερήχων με τη βοήθεια διαλύτη ισοπροπανόλης

Οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 2.2:

**Πίνακας 2.2**

	Thermal assisted ultrasonic bonding	Thermal assisted four-layer ultrasonic bonding	Solvent assisted ultrasonic bonding
Preheating temperature (°C)	70	75	None
Amplitude (μm)	6.6	6.0	7.2
Trigger pressure (MPa)	0.032	0.059	0.033
Ultrasonic time (s)	25	30	10
Ultrasonic pressure (MPa)	0.276	0.101	0.297
Holding time (s)	5	30	5
Holding pressure (MPa)	0.147	0.293	0.297

Την ίδια χρονιά, οι Zongbo Zhang, Xiaodong Wang, Yi Luo, Shengqiang He και Liding Wang (Zhang, Wang et al. 2010), η ίδια ομάδα δηλαδή, έκανε άλλη μια δημοσίευση που αφορούσε τη συγκόλληση με υπερήχους με τη βοήθεια της

προθέρμανσης σε πολυμερές υλικό PMMA. Σ' αυτή, συγκόλλησαν μια μικρορευστονική διάταξη ίδιας γεωμετρίας με την προηγούμενη τους δημοσίευση και έκαναν ένα στατιστικό σχεδιασμό με τη μέθοδο Taguchi. Ο χρόνος συγκόλλησης με υπερήχους ήταν 30 δευτερόλεπτα, ενώ ο συνολικός χρόνος της συγκόλλησης με την προθέρμανση και το χρόνο ψύξης έφτανε λίγο λιγότερο από 5 λεπτά.

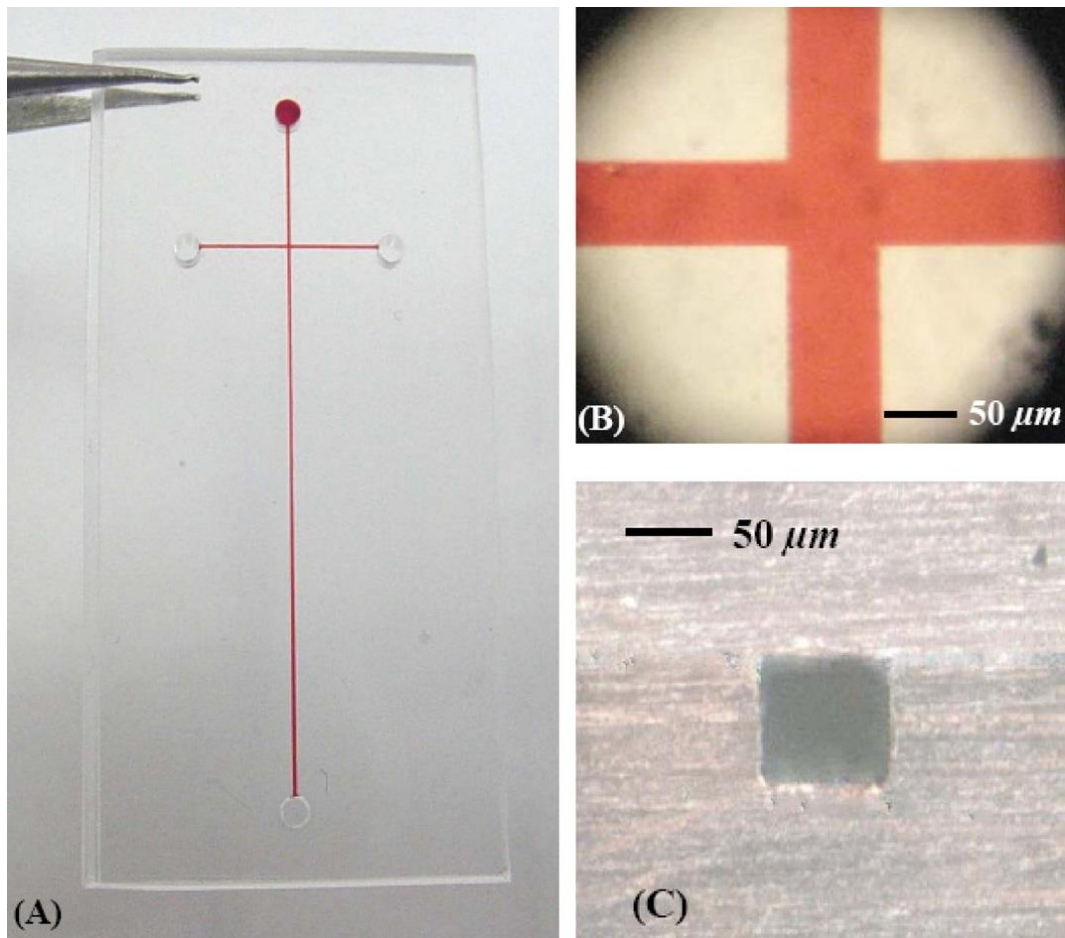
Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η θερμοκρασία προθέρμανσης (A), η πίεση κατά τη διάρκεια συγκόλλησης (B), ο χρόνος συγκόλλησης με υπερήχους (C) και το πλάτος της ταλάντωσης (D). Παρακάτω, ο πίνακας 2.3 εμφανίζει τις 3 διαφορετικές τιμές που είχε η κάθε παράμετρος.

**Πίνακας 2.3**

Factors/levels	A (°C)	B (MPa)	C (s)	D (μm)
1	75	0.08	20	6
2	80	0.16	25	7.2
3	85	0.24	30	8.4

Με τη μέθοδο Taguchi, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η δυνατότερη συγκόλληση επιτεύχθηκε με τις εξής συνθήκες: A3, B3 C2 και D3. Όμως, το μεγαλύτερο ρόλο στη παραμόρφωση (dimension loss), έχουν οι παράγοντες A και D, δηλαδή η θερμοκρασία προθέρμανσης και το πλάτος της ταλάντωσης. Η παράμετρος C έχει το λιγότερο σημαντικό ρόλο στη παραμόρφωση, αλλά έχει το σημαντικότερο ρόλο στο να έχουμε δυνατότερη συγκόλληση. Η παράμετρος B, είναι μόνο ανάλογη της δύναμης συγκόλλησης. Συμπεριλαμβάνοντας όλα τα παραπάνω, οι Κινέζοι ερευνητές κατέληξαν πως οι βέλτιστες συνθήκες παραμέτρων είναι οι A1, B2, C2 και D1, ώστε να έχει ληφθεί υπόψη και η παραμόρφωση και το πόσο δυνατή είναι η συγκόλληση. Η εικόνα 26 μας παρουσιάζει την ποιότητα της συγκόλλησης και ότι δεν υπάρχει παραμόρφωση ή αλλοίωση της μικρορευστονικής διάταξης.

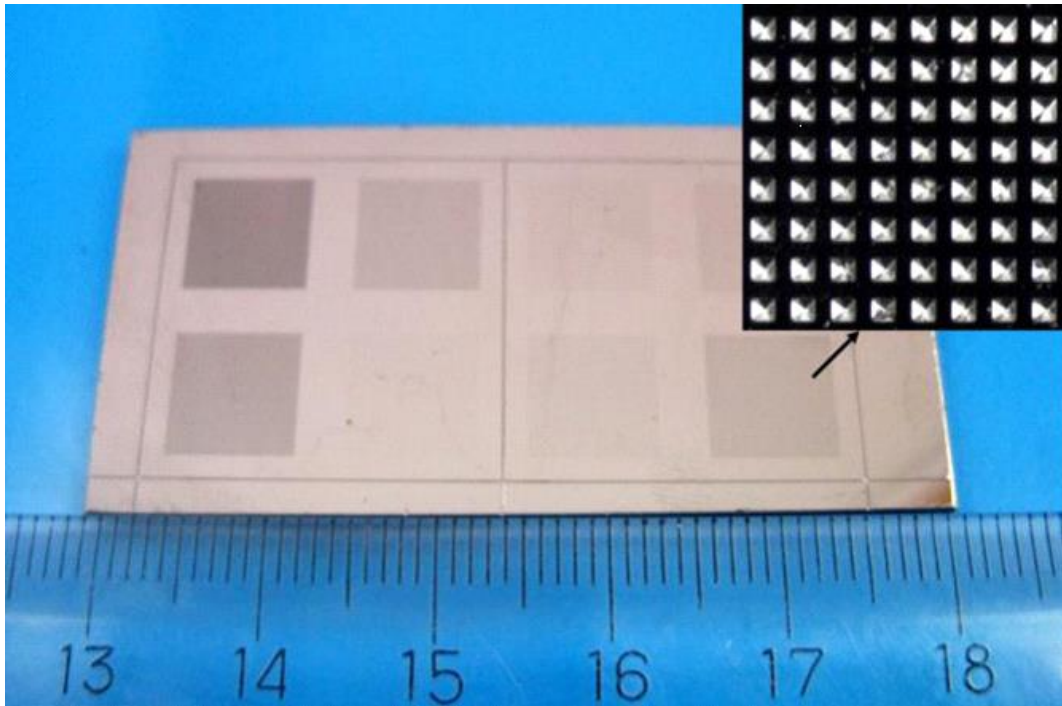




**Εικόνα 26** Συγκολλημένο δοκίμιο (A) ολοκληρωμένη εικόνα του συγκολλημένου δοκιμίου με χρωστική ουσία, (B) μικρογραφία του συγκολλημένου καναλιού και (C) μικρογραφία της τομής του συγκολλημένου καναλιού.

Το 2012, οι Yibo Sun, Yi Luo και Xiaodong Wang (Sun, Luo et al. 2012), πραγματοποίησαν συγκόλληση με υπερήχους με μικρο-ενεργειακούς κατευθυντές (micro energy directors). Το θερμοπλαστικό πολυμερές ήταν το PMMA και οι δύο τετραγωνικές επιφάνειες που συγκολλήθηκαν είχαν πλευρά 3 mm x 3 mm η μία και 1 mm x 1 mm, η άλλη επιφάνεια. Στη μικρή εκ των δύο, είχε μικροενεργειακούς κατευθυντές, οι οποίοι δημιουργήθηκαν από σφράγιση σε θερμική πρέσσα (hot embossing). Η μήτρα εγχάραξης (καλούπι), παρασκευάστηκε από ανισοτροπικό πυρίτιο (Si) με γωνία διάβρωσης  $56.7^\circ$  με τη μέθοδο της ανισοτροπικής υγρής εγχάραξης. Οι micro energy directors έχουν σχήμα τετραγωνικής πυραμίδας, και χαρακτηρίστηκαν σε διάφορα μεγέθη, είτε με διαφορετικό ύψος  $L$  της πυραμίδας, είτε με διαφορετικό μήκος της πλευράς της βάσης του. Η αρχή σχεδίασης τους βασίστηκε σε μελέτη των ενεργειακών κατευθυντών μεγαλύτερων μεγεθών, όπου η γωνία διχοτόμου της γωνίας της κορυφής της πυραμίδας ισούται με  $37,5^\circ$ . Οι διαφορετικές αποτυπώσεις των micro energy directors πάνω στη μήτρα πυριτίου φαίνονται στην εικόνα 27, ενώ οι διαφορετικές διαστάσεις φαίνονται στο πίνακα 2.4.



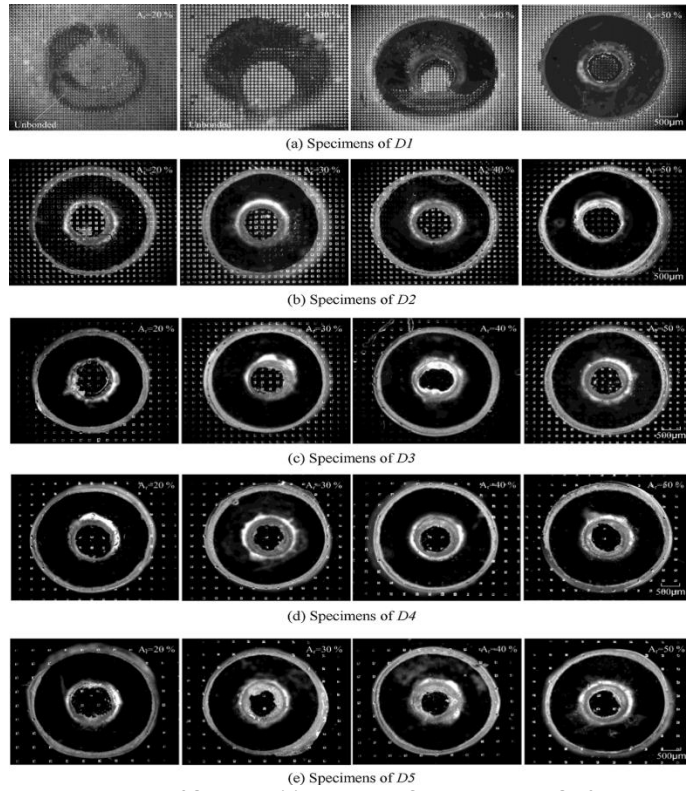


Εικόνα 27 micro energy directors πάνω στη μήτρα

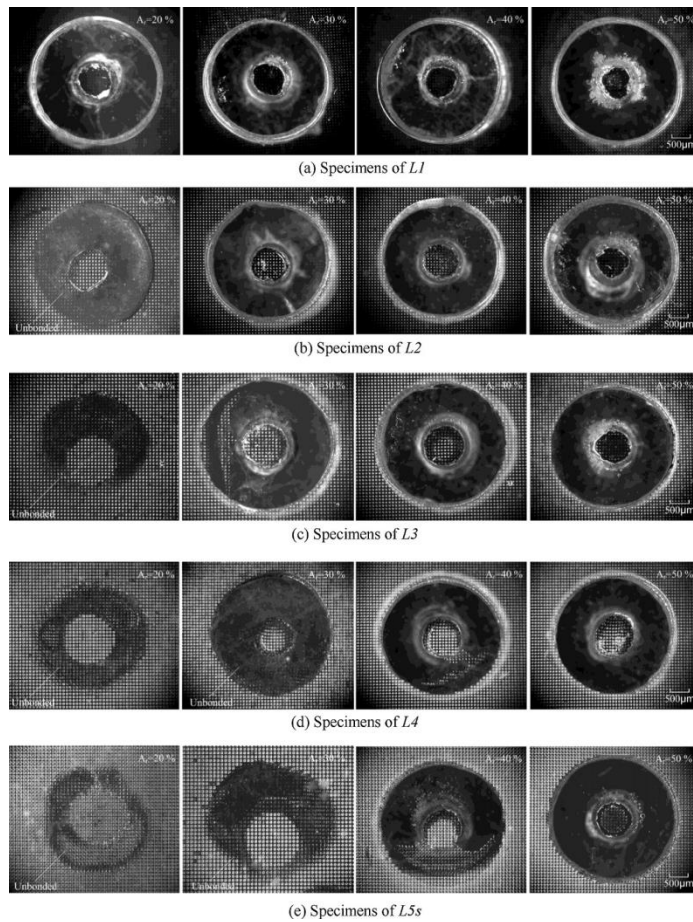
**Πίνακας 2.4**

Specific markers	L (μm)	D (μm)	Specific markers	L (μm)	D (μm)
L1	10	80	D1	50	80
L2	20	80	D2	50	160
L3	30	80	D3	50	240
L4	40	80	D4	50	320
L5	50	80	D5	50	400

Η πίεση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι 15 N και η ισχύς είναι 20 W. Το πλάτος ταλάντωσης έχει εύρος από το 10% έως το 50% του μεγίστου, με βήμα 10%. Τα πειράματα για τα διαφορετικά πλάτη και τις διαφορετικές περιπτώσεις φαίνονται στις εικόνες 28 και 29.



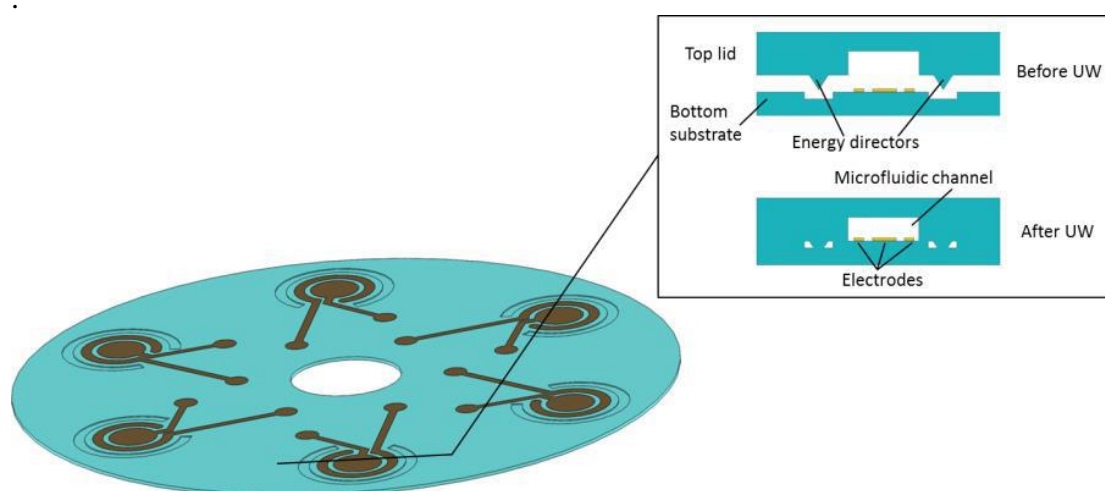
**Εικόνα 28 συγκολλήσεις με διαφορετικά βάθη**



**Εικόνα 29 συγκολλήσεις με διαφορετικά μήκη**

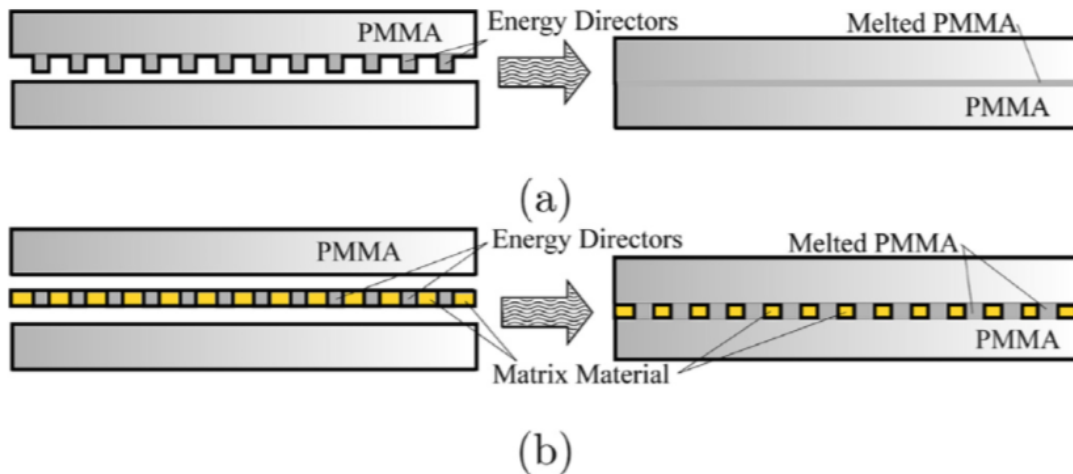
Για πολλές περιπτώσεις, παρατήρησαν ότι το πλάτος ταλάντωσης πρέπει να φτάσει το 50% της ονομαστικής του τιμής, ώστε να επιτευχθεί συγκόλληση σε όλο το τμήμα της διεπιφάνειας. Επίσης, παρατήρησαν ότι για το ίδιο πλάτος ταλάντωσης, όσο αυξάνεται το ύψος του micro energy director, τόσο μειώνεται η επιφανειακή σύντηξη. Γενικότερα, παρατηρήθηκε ότι με τις ίδιες συνθήκες συγκόλλησης, μειώθηκε ο βαθμός της συγκόλλησης, όταν αυξανόταν οι διαστάσεις των δοκιμίων, αλλά ενισχύεται όταν αυξάνεται η κατανομή της ενέργειας σ' όλους τους μικρο-ενεργειακούς κατευθυντές ταυτόχρονα. Επίσης, με τη συγκεκριμένη παράταξη των μικρο-ενεργειακών κατευθυντών, και την σωστή επιλογή τους στο κατάλληλο μέγεθος, μπορεί να επιτευχθεί υψηλής ποιότητα συγκόλληση με υπερήχους στη διεπιφάνεια των δοκιμίων, σε ένα ευρύτερο πλαίσιο παραμέτρων, που κάνει τα αποτελέσματα της συγκόλλησης πιο ελεγχίμα.

Το 2013, οι Marco Matteuccia et al {Marco Matteuccia, 2013 #22}, κατάφεραν να σφραγίσουν πλακέτα με ηλεκτροδία μέσα σε πολυμερικές μικρορευστονικές διατάξεις με τη βοήθεια ενεργειακού κατεύθυντή, ύψους 8  $\mu\text{m}$ . Η ενέργεια συγκόλλησης που χρησιμοποίησαν ήταν 20 και 60 Joule.



Εικόνα 30 σφράγιση πλακέτας ηλεκτροδίων με ενεργειακό κατευθυντή

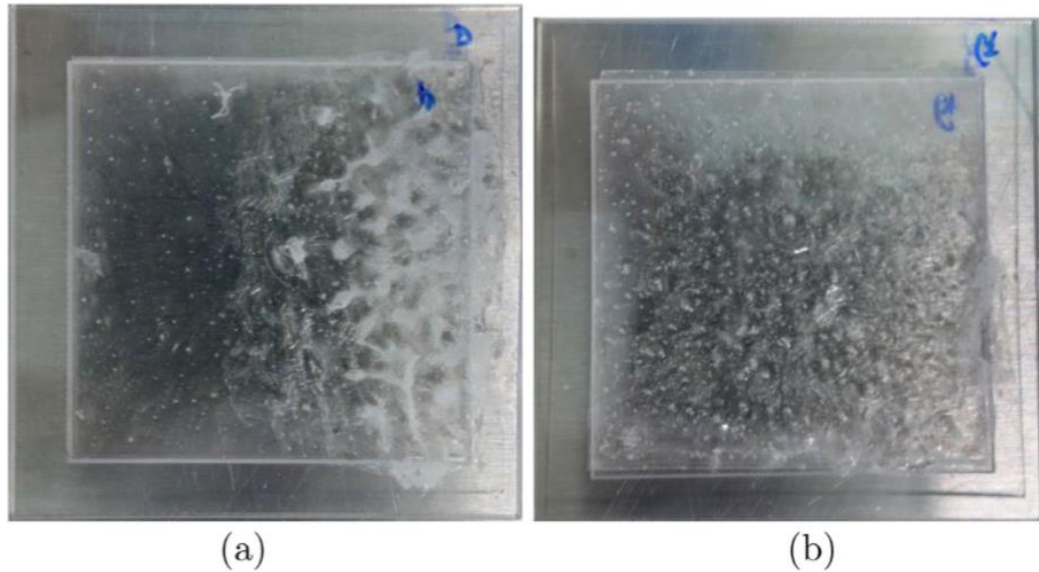
Η τελευταία προσθήκη στην βιβλιογραφία δημοσιεύτηκε φέτος, το 2016 από την ομάδα των Wei Xuan Chan, Sum Huan Ng, King Ho Holden, Woo-Tae Park και Yong-Jin Yoon από τη Σιγκαπούρη (Chan, Ng et al. 2016). Χρησιμοποιούν τη μηχανή συγκόλλησης Hermmann Ultrasonic συχνότητας 35 kHz, με τις εξής συνθήκες συγκόλλησης: ισχύς 1 kW, πλάτος ταλάντωσης 16.25  $\mu\text{m}$  και δύναμη κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (welding force) ίση με 100 N. Οι χρόνοι συγκόλλησης είναι προφανώς μικροί, 1 και 1.5 δευτερόλεπτα, αφού επιτυγχάνουν συγκόλληση στο μέγιστο πλάτος ταλάντωσης της μηχανής (max amplitude = 16.25  $\mu\text{m}$ ). Η πρωτοτυπία τους είναι ότι χρησιμοποιούν ένα λεπτό στρώμα από σύνθετο υλικό, ενδιάμεσα των δοκιμίων προς συγκόλληση, ώστε να περιορίσουν τη ροή του λιωμένου υλικού κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, αλλά και να αποφύγουν την περίπτωση όπου παγιδεύεται αέρας στις νάνο-μίκρο κοιλότητες ανάμεσα στις δύο επιφάνειες. Το σύνθετο υλικό είναι μια μεμβράνη πολυδυσμεθυλοσιλικόνης PDMS (μήτρα) όπου περιέχει μικροσφαιρίδια PMMA. Η σύγκριση με συγκόλληση με ενεργειακούς κατευθυντές φαίνεται στην εικόνα 31.



**Εικόνα 31** Συγκόλληση πολυμερούς χρησιμοποιώντας (a) συμβατικό τρόπο (ενεργειακό κατευθυντή) και (b) χρήση σύνθετου φιλμ

Στον συμβατικό τρόπο υπερηχητικής συγκόλλησης, οι ενεργειακοί κατευθυντές τήκονται και ρέουν ανάμεσα στη διεπιφάνεια των δειγμάτων, δημιουργώντας ένα λεπτό υπόστρωμα ένωσης. Στην υπερηχητική συγκόλληση με χρήση συνθέτου φιλμ οι ενεργειακοί κατευθυντές λιώνουν αλλά μένουν στο ίδιο ύψος αφού παρεμποδίζεται η ροή του λιωμένου υλικού από τη μήτρα του συνθέτου υλικού. Επί του πρακτέου, η συγκεκριμένη ομάδα κινείται στη λογική ότι η συγκόλληση θα επιτευχθεί σε μικρότερη επιφάνεια, δηλαδή μόνο στις κεφαλές των κυλινδρικών μικροσφαιριδίων του PMMA μέσα στο σύνθετο υλικό, που λειτουργούν σαν ενεργειακοί κατευθυντές, χωρίς να τους λιώσουν, αφού κρατάνε το σχηματισμό τους, λόγω του περιορισμού του υλικού της μήτρας του συνθέτου.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούν είναι από θερμοπλαστικό πολυμερές PMMA με διαστάσεις 32 mm x 32 mm, το πάνω δοκίμιο και 40 mm x 40 mm το κάτω. Το σύνθετο υλικό που τοποθετείται ανάμεσα είναι πολυδυσμεθυλοσιλικόνη (PDMS) με μικροσφαιρίδια PMMA, βέλτιστης συγκέντρωσης 0.24 όπως βρέθηκε ύστερα από υπολογισμούς, το οποίο παρασκευάζεται με την τεχνική spin coating. Η παραπάνω συγκέντρωση είναι ικανή να λιώσει όλα τα μικροσφαιρίδια PMMA με τη ενέργεια που δίνει η μηχανή συγκόλλησης με τις προαναφερθείσες συνθήκες. Στην εικόνα 32 φαίνεται η συγκόλληση που επιτεύχθηκε σε χρόνους συγκόλλησης 1.5 και 1 δευτερόλεπτα αντίστοιχα.



Εικόνα 32 Συγκόλληση PMMA με ενδιάμεσο σύνθετο υλικό με χρόνο συγκόλλησης (a) 1,5 sec και (b) 1 sec

## 2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση στη θεωρία της συγκόλλησης με υπερήχους.

### 2.3.1 Δυναμική Φόρτιση

Σ' αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναλυθεί το δυναμικό φαινόμενο που πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με υπερήχους, ώστε να γίνει σε βάθος ανάλυση των συντελεστών αποθήκευσης  $E'$  και απώλειας  $E''$ , που είναι απαραίτητοι για την κατανόηση των θεωριών και εξισώσεων που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Οι δυναμικές δοκιμές (τεστς), στις οποίες η τάση (ή η παραμόρφωση) που προκύπτει από τη μέτρηση μιας ημιτονοειδούς παραμόρφωσης (ή τάσης), ταιριάζουν κατάλληλα στη συμπλήρωση του «μικρής διάρκειας» φάσματος της απόκρισης του πολυμερούς. Μικρής διάρκειας χρόνοι αναφέρονται σε χρόνους δευτερολέπτων ή και ακόμα μικρότερους. Όταν ένα ιξωδοελαστικό υλικό υποβάλλεται σε διάφορες ημιτονοειδείς τάσεις, σταθεροποιούνται τελικά σε μία κατάσταση, όπου η παραμόρφωση είναι επίσης ημιτονοειδής, και έχει την ίδια γωνιακή συχνότητα αλλά μια καθυστέρηση στη φάση που ισούται με μια γωνία  $\delta$ . Αυτή η διαφορά φάσης είναι ανάλογη με καθυστέρηση της παραμόρφωσης που παρατηρείται σε πειράματα ερπυσμού. Η παραμόρφωση καθυστερεί τη τάση κατά γωνία φάσης  $\delta$ , το οποίο αληθεύει και στην περίπτωση που η παραμόρφωση και όχι η τάση είναι η ελεγχόμενη μεταβλητή. (Roylance October 24, 2001)

Αν επιλεγεί το προσδιοριστικό σημείο κατά μήκος του άξονα του χρόνου ώστε να συμπέσει με μια περίοδο κατά την οποία η παραμόρφωση παίρνει τη μέγιστη τιμή της, οι εξισώσεις της παραμόρφωσης και της τάσης μπορούν να γραφτούν ως εξής:

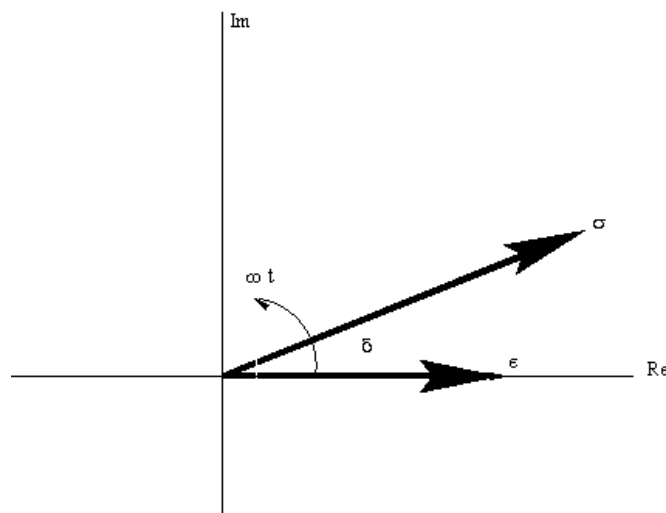
$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 * \cos(\omega t + \delta) \quad (2)$$

Χρησιμοποιώντας ένα ευρέως γνωστό αλγεβρικό ελιγμό στην ανάλυση των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και άλλων αρμονικών συστημάτων, η εξίσωση της τάσης μπορεί να γραφτεί ως μια σύνθετη ποσότητα  $\sigma^*$ , της οποίας το πραγματικό μέρος είναι στην ίδια φάση με την παραμόρφωση και το φανταστικό μέρος είναι  $90^\circ$  εκτός φάσης με τη παραμόρφωση, δηλαδή:

$$\sigma^* = \sigma'_0 \cos(\omega t) + i(\sigma''_0 \sin(\omega t)) \quad (3)$$

Εδώ  $i = \sqrt{-1}$ , και ο αστερίσκος υποδεικνύει μια σύνθετη ποσότητα, όπως συνήθως. Η απεικόνιση της παραπάνω εξίσωσης, για να παρατηρήσουμε την τάση και την παραμόρφωση ως προβολές πάνω στο πραγματικό άξονα των διανυσμάτων που περιστρέφεται στο μιγαδικό επίπεδο με συχνότητα  $\omega$ . Εάν θεωρήσουμε ένα στιγμιότυπο των θέσεων καθώς το διάνυσμα της παραμόρφωσης περνά από το πραγματικό άξονα, τότε το διάνυσμα της τάσης θα προπορεύεται μπροστά του κατά γωνία φάσης  $\delta$  όπως φαίνεται στην εικόνα 33.



**Εικόνα 33 αναπαράσταση του περιστρεφόμενου διανύσματος μια αρμονικής τάσης-παραμόρφωσης**

Με βάση την παραπάνω απεικόνιση παρατίθενται οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων στην αρμονική συσχέτιση:

$$\tan \delta = \sigma''_0 / \sigma'_0 \quad (4)$$

$$|\sigma^*| = \sigma_0 = \sqrt{\sigma'^2_0 + \sigma''^2_0} \quad (5)$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 \cos(\delta) \quad (6)$$

$$\sigma''_0 = \sigma_0 \sin(\delta) \quad (7)$$

Αν λοιπόν χρησιμοποιήσουμε αυτή τη σύνθετη μορφή της συνάρτησης της τάσης, μπορούμε να ορίσουμε δύο διαφορετικούς δυναμικούς συντελεστές, οι οποίοι θα είναι ανάλογοι της τάσης και της παραμόρφωσης ως συνήθως, αλλά θα έχουν πολύ διαφορετικές μοριακές ερμηνείες και μακροσκοπικές συνέπειες. Ο πρώτος από

αυτούς είναι ο «πραγματικός» συντελεστής, ή συντελεστής «αποθήκευσης», που ορίζεται ως ο λόγος της τάσεως που βρίσκεται σε φάση με την παραμόρφωση:

$$E' = \sigma'_0 / \varepsilon_0 \quad (8)$$

Και ο άλλος είναι ο "φανταστικός" συντελεστής, ή συντελεστής "απώλειας", που ορίζεται ως ο λόγος της εκτός φάσης τάσης με τη παραμόρφωση:

$$E'' = \sigma''_0 / \varepsilon_0 \quad (9)$$

Ο συντελεστής αποθηκεύσεως συχνά συνδέεται με την "ακαμψία" του υλικού και είναι που συνδέεται με μέτρο ελαστικότητας (Young Modulus, E) του υλικού. Ο δυναμικός συντελεστής απώλειας συχνά συνδέεται με την «εσωτερική τριβή» και είναι ευαίσθητος για διάφορα είδη όπως μοριακές κινήσεις, διαδικασίες χαλάρωσης, μεταβατικές καταστάσεις, μορφολογίες και άλλες ετερογένειες της εκάστοτε κατασκευής. Έτσι, οι δυναμικές ιδιότητες παρέχουν πληροφορίες σε μοριακό επίπεδο για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πολυμερών. Συνεπώς, έχουμε και μια καλύτερη κατανόηση της συγκόλλησης με υπερήχους σε μοριακό επίπεδο.

### 2.3.2 Απαιτούμενη Θερμότητα Συγκόλλησης με υπερήχους

Σε μελέτη των David και Grewells (D. Grewell) που αφορούσε τις συγκολλήσεις σε πολυμερικές διατάξεις αναφέρεται ο εξής τύπος για τη συγκόλληση με υπερήχους:

$$Q = \frac{\omega * A_0^2 * E''}{2} \quad (10)$$

Όπου το Q είναι η εσωτερική παραγωγή θερμότητας ( $W/m^3$ ),  $\omega$  είναι ταχύτητα ταλάντωσης σε radians/sec,  $A_0$  είναι το πλάτος ταλάντωσης και  $E''$  είναι ο συντελεστής απώλειας (loss modulus) του πολυμερούς (που εξαρτάται από τη συχνότητα  $\omega$  και τη θερμοκρασία), όπως έχει αναλυθεί παραπάνω στην ενότητα 2.3.1.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, αν μειωθεί το πλάτος ταλάντωσης ( $A_0$ ) κατά 50%, η θερμότητα Q θα μειωθεί κατά 4. Στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι η ισχύς P μπορεί να υπολογιστεί να πολλαπλασιαστεί το ποσό της θερμότητας Q με τον όγκο του ενεργειακού κατευθυντή.

Ο συντελεστής αποθήκευσης ( $E'$ ) και ο συντελεστής απώλειας ( $E''$ ) είναι δύο σημαντικές υλικές ιδιότητες που απαιτούνται για τη περιγραφή της ιξώδοελαστικής συμπεριφοράς ενός θερμοπλαστικού, όπως αναφέρεται παραπάνω. Το  $E'$  είναι ένα μέτρο της ενέργειας που αποθηκεύεται και που ανακτάται ανά κύκλο της παραμόρφωσης (C.J. Aliosio 1972) και ο συντελεστής απώλειας είναι ένα μέτρο της ενέργειας της παραμόρφωσης που απελευθερώνεται ως θερμότητα ανά κύκλο. Οι Read και Dean (A.E. Read 1978), πραγματοποίησαν υπερηχητικές μετρήσεις για να προσδιορίσουν τις τιμές του  $E'$  και του  $E''$ . Ηχητικές μετρήσεις ταχύτητας έγιναν για τα εξής θερμοπλαστικά: ABS, PS, PE, PP και PMMA, αλλά παρακάτω παραθέτονται μόνο για το PMMA. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω μετρήσεις αναλύονται παρακάτω.



Για το συντελεστή αποθήκευσης έχουμε:

$$E' = G' (3L' - 4G') / (L' - G') \quad (11)$$

Όπου το  $L'$  είναι το μήκος και τα  $G'$  το μέτρο σκληρότητας της ένωσης, όπου για τη σκληρότητα ισχύει:

$$G' = \rho * V_T^2 \quad (12)$$

Και για το μήκος ισχύει ότι:

$$L' = \rho * V_L^2 \quad (13)$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του πολυμερούς, το  $V_L$  είναι η ταχύτητα επιμήκυνσης και το  $V_T$  είναι η ταχύτητα δημιουργίας της ένωσης.

Για το συντελεστή απώλειας έχουμε:

$$E'' = E' * \tan(\delta_E) \quad (14)$$

Όπου  $\delta_E$  είναι η εφαπτομένη απώλειας και δίνεται από τη σχέση:

$$\tan(\delta_E) = (\tan(\delta_G) - G'_L'(\tan(\delta_G) - \tan(\delta_L))) / (L' - G')(3L' - 4G') \quad (15)$$

Οι παράγοντες απώλειας είναι:

$$\tan(\delta_L) = 2 * V_L * \alpha / \omega \quad (16)$$

και

$$\tan(\delta_G) = 2 * V_T * \alpha / \omega \quad (17)$$

Όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης.

Στους δύο πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται οι μετρήσεις των Read & Dean για τους συντελεστές  $E'$  και  $E''$  από 20 KHz έως 5 MHz. Όπως αναφέρεται από τους συγγραφείς, στις χαμηλές συχνότητες (2 KHz), η θερμοκρασία του πολυμερούς αυξάνεται λόγω του διασκορπισμού της θερμότητας. Γι αυτό το λόγο, οι μετρήσεις σ' αυτές τις χαμηλές συχνότητες γίνονται με τη τεχνική διαμήκης αντήχησης.

**Πίνακας 2.5:** Στοιχεία  $E'$  για το PMMA με την χρήση της υπερηχητικής μεθόδου

FREQUENCY	READ & DEAN
	$E'$ (GN/ m <sup>2</sup> )
20 KHz	5.9 (*)
0.5 MHz	5.95
1.0 MHz	5.99
2.25 MHz	6.03
5.0 MHz	6.06

**Πίνακας 2.6:** Στοιχεία  $E''$  για το PMMA με την χρήση της υπερηχητικής μεθόδου

FREQUENCY	READ & DEAN
	$E''$ (GN/ m <sup>2</sup> )
20 KHz	0.17 (*)
0.5 MHz	0.12
1.0 MHz	0.1



2.25 MHz	0.08
5.0 MHz	0.06

(\*) Στοιχεία από την τεχνική διαμήκη αντήχησης

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι το E' διατηρεί μια αρκετά σταθερή τιμή, παρουσιάζοντας μια μικρή αύξηση, όσο αυξάνεται η συχνότητα, ενώ το E'' μειώνεται.

### 2.3.3 Εφαρμογές ρεολογίας

Εφαρμογή της αρχής λειτουργίας με βάση την υπερ-θέση του χρόνου και θερμοκρασίας με βάση τη θεωρία της ρεολογίας.

Η ποσότητα της μετατόπισης κατά μήκος του οριζόντιου άξονα (x-axis) σε μία τυπική απεικόνιση υπερθέσης χρόνου και θερμοκρασίας TTS (Time-Temperature Superposition) που απαιτείται για την τοποθέτηση των σημείων των επιμέρους πειραματικών δεδομένων στην κύρια καμπύλη (master curve) περιγράφεται γενικά χρησιμοποιώντας ένα από τα δύο θεωρητικά μοντέλα. Το πρώτο γνωστό θεωρητικό μοντέλο είναι η εξίσωση των Williams-Landel-Ferry (WLF) (Williams-Landel-Ferry):

$$\log a_T = \frac{C_1*(T-Tr)}{C_2+(T-Tr)} \quad (18)$$

όπου  $C_1$  και  $C_2$  είναι σταθερές,  $T_r$  είναι η θερμοκρασία αναφοράς (Reference Temperature =  $T_{ref} = T_r$ ) σε K,  $T$  είναι η θερμοκρασία μέτρησης (σε K), ενώ είναι  $a_T$  ο συντελεστής μετατόπισης. Η εξίσωση WLF χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει την συμπεριφορά χρόνου / θερμοκρασίας των πολυμερών στη μεταβατική περιοχή της υαλώδους μετάπτωσης. Η εξίσωση αυτή βασίζεται στην παραδοχή ότι, πάνω από την θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού, ο κλασματικός ελεύθερος όγκος αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την θερμοκρασία. Το μοντέλο υποθέτει επίσης ότι όταν ο ελεύθερος όγκος του υλικού αυξάνεται, το ιξώδες του μειώνεται ραγδαία. Δίνεται γνωρίζουμε ότι οι σταθερές  $C_1$  και  $C_2$ , παίρνουν συγκεκριμένες τιμές όταν η θερμοκρασία αναφοράς επιλεγεί ως η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ , τότε για τα περισσότερα πολυμερή οι οικουμενικές αξίες που δίνονται στις παραπάνω σταθερές είναι:  $C_1 = -17.4$  K και  $C_2 = 51.6$  K. (P.G. Bruce 2008)

Το άλλο μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη παραπάνω συμπεριφορά των πολυμερών είναι η εξίσωση Arrhenius:

$$\log a_T = \frac{-E}{R*(T-Tr)} \quad (19)$$

όπου  $E$  είναι η ενέργεια ενεργοποίησης που σχετίζεται με τη χαλάρωση, το  $R$  είναι η σταθερά των αερίων,  $T$  είναι η θερμοκρασία της μέτρησης,

$T_r$  είναι η θερμοκρασία αναφοράς, ενώ  $a_T$  είναι ο συντελεστής μετατόπισης με βάση το χρόνο. { Application of Time-Temperature Superposition Principles to Rheology, #20 }

Αν συνδυάσουμε τις δύο αυτές εξισώσεις μπορούμε να βρούμε μια θεωρητική προσέγγιση για την ενέργεια, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 4.

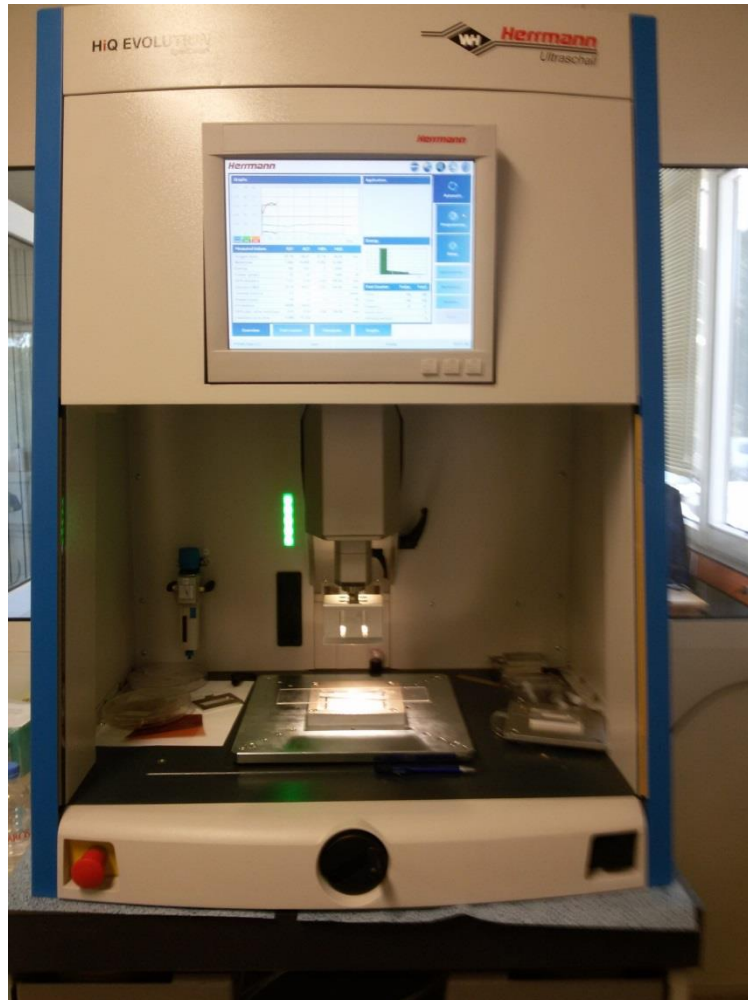
## Κεφάλαιο 3

---

Το κεφάλαιο αναφέρεται στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και απαιτείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων της συγκόλλησης με υπερήχους. Περιλαμβάνει τη μηχανή συγκόλλησης που διεξάγονται τα πειράματα, καθώς και όλες τις βοηθητικές αλλά απαραίτητες συσκευές για την προετοιμασία των δειγμάτων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

### **3.1 Μηχανή συγκόλλησης υπερήχων Herrmann**

Κάθε μηχανή συγκόλλησης υπερήχων αποτελείται από ένα σύστημα μετάδοσης των υπερήχων στο κέρασ συγκόλλησης, από μια βάση συγκράτησης των τεμαχίων (ή αμόνι) όπου τα τμήματα τοποθετούνται, επιτρέποντας την μετάδοση υψηλής δόνησης συχνοτήτων ώστε να κατευθύνονται προς τις διεπαφές και από ένα λογισμικό που θα ελέγχει τις παραμέτρους της συγκόλλησης. Απαραίτητη είναι επίσης η παροχή αέρα υπό συγκεκριμένη πίεση, ώστε να μπορεί να ασκεί το κέρασ συγκόλλησης πίεση στα δοκίμια κατά τη διάρκεια συγκόλλησης και κατά το πέρας αυτής. Η πίεση εφαρμόζεται μέσω πνευματικών εμβόλων που αποτελούν ένα σύστημα συμπίεσης και το μέτρο της εξαρτάται από το προγραμματισμό του λογισμικού. Στην παρακάτω εικόνα 34, φαίνεται η μηχανή συγκόλλησης υπερήχων Herrmann και μοντέλο HiQ Evolution, που υπάρχει στο εργαστήριο μικροηλεκτρονικής και αποτελεί τον κύριο εξοπλισμό για τη συγκόλληση μικρορευστονικών πολυμερικών διατάξεων με υπερήχους. Το μηχανολογικό σχέδιο της μηχανής παρουσιάζεται στο παράρτημα Α.



Εικόνα 34 Μηχανή συγκόλλησης υπερήχων Herrmann HiQ Evolution

### 3.1.1 Σύστημα μετάδοσης υπερήχων

Όλα τα συστήματα συγκόλλησης με υπερήχους αποτελούνται από τα ίδια βασικά στοιχεία:

- Μια στοίβα εξαρτημάτων που αποκαλείται στοίβα εργαλείων υπερήχων αποτελείται και από έναν μετατροπέα (converter) ή πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα, ένα προαιρετικό σύστημα υποβοήθησης (booster) και ένα κέρασ συγκόλλησης (sonotrode, : Horn). Όλα τα τρία στοιχεία της στοίβας εργαλείων υπερήχων είναι ειδικά ρυθμισμένα έτσι ώστε να συντονίζονται στην ίδια ακριβώς συχνότητα υπερήχων (τυπικά 20, 30, 35 ή 40 kHz)

- Μετατροπέας: Μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μηχανικές δονήσεις.
- Booster: Τροποποιεί το πλάτος της ταλάντωσης. Επίσης, χρησιμοποιείται σε τυποποιημένα συστήματα για να σφίγγει τα τεμάχια στο σύστημα συμπίεσης.
- Sonotrode: Εφαρμόζει τη μηχανική δόνηση στα μέρη που πρόκειται να συγκολληθούν.

- Μια ηλεκτρονική γεννήτρια υπερήχων (στις ΗΠΑ: Τροφοδοσία) παρέχοντας ένα σήμα AC υψηλής ισχύος με συχνότητα που ταιριάζουν με τη συχνότητα συντονισμού της στοίβας.

- Ένας ελεγκτής που ελέγχει την κίνηση του συστήματος συμπίεσης και τη εφαρμογή της υπερηχητικής ενέργειας.

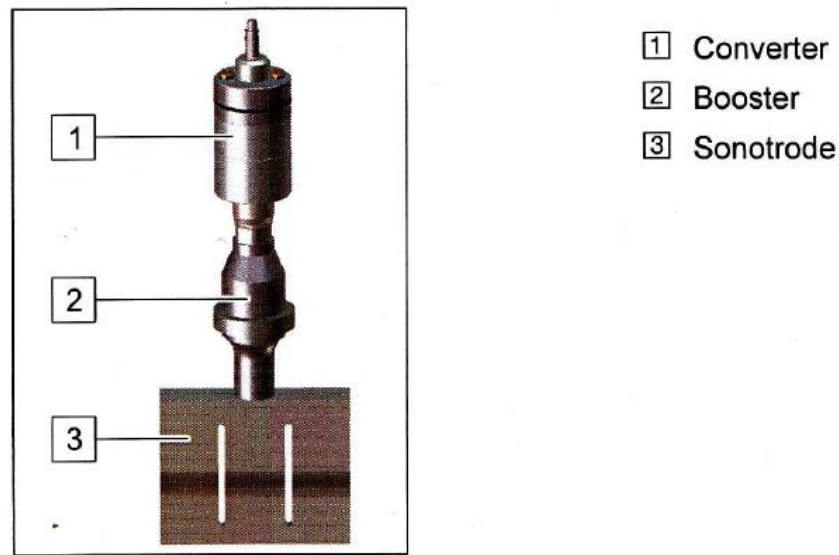


Fig. 4-1 Basic principle of acoustic stacks

**Εικόνα 35 Συστάδα συστήματος μετατροπής συχνότητας για εφαρμογή υπερήχων**

Η ηλεκτρονική γεννήτρια υπερήχων αλλάζει την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου, από συχνότητα 50-60 Hz , σε μια ηλεκτρική παροχή υψηλής συχνότητας που λειτουργεί σε 20, 30 ή 40kHz (20 έως 70 kHz) . Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στο μετατροπέα . Εντός του μετατροπέα, οι δίσκοι ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού βρίσκονται ανάμεσα σε δύο μεταλλικά τμήματα . Ο μετατροπέας αλλάζει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια δόνησης με υπερηχητικές συχνότητες.

**4.1.3 Generation of ultrasonic**

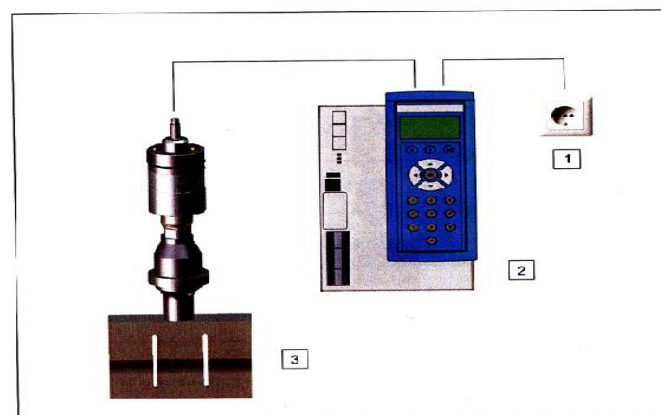


Fig. 4-2 Generation of ultrasonic

- 1 Voltage source
- 2 Ultrasonic generator
- 3 Stack

**Εικόνα 36 Υπόμνημα εικόνας: 1) πηγή ρεύματος, 2) Γεννήτρια υπερήχων και 3) Συστάδα συστήματος μετατροπής συχνότητας**

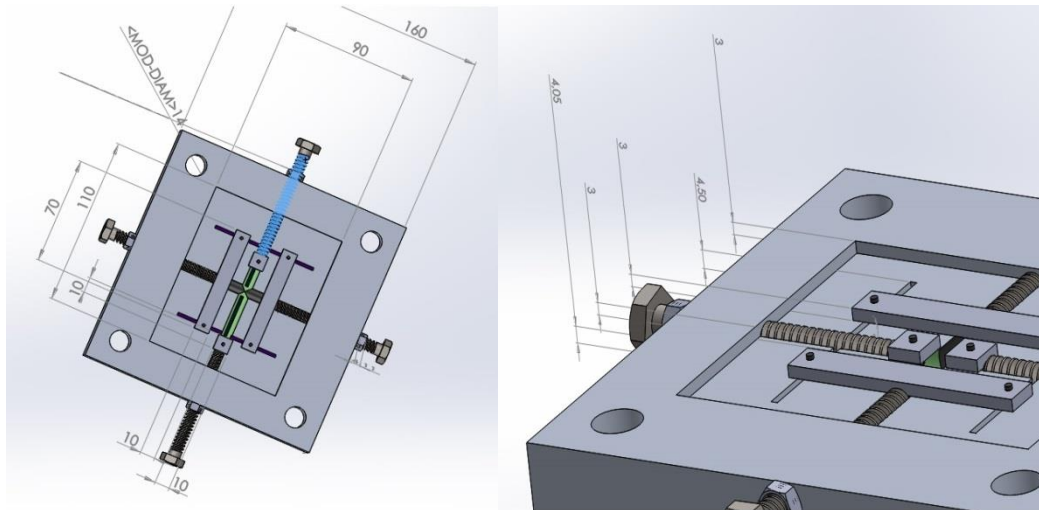
Η υπερηχητική ενέργεια μεταδίδεται στη συνέχεια μέσω του booster, η οποία αυξάνει το πλάτος του υπερηχητικού κύματος . Τα υπερηχητικά κύματα στη συνέχεια μεταφέρονται στο κέρασ συγκόλλησης . Το κέρασ συγκόλλησης είναι ένα ακουστικό εργαλείο που μεταφέρει την υπερηχητική κίνηση και κατ' επέκταση την ενέργεια με άμεσο τρόπο διά της επαφής με τα μέρη που συναρμολογούνται , και επίσης εφαρμόζει μια πίεση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης . Έπειτα, οι ταλαντώσεις μεταδίδονται διά μέσω όλου του όγκου του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με το κέρασ συγκόλλησης, στη διεπιφάνεια. Στην περίπτωση μας, η υπερηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω της τριβής, οπότε τότε το θερμοπλαστικό μαλακώνει ή τήκεται, και τα επιμέρους μέρη συνδέονται μαζί, με σκοπό τη δημιουργία ενός ισχυρού δεσμού.



Εικόνα 37 μετατροπείς συχνότητας και συστάδα εφαρμογής υπερήχων

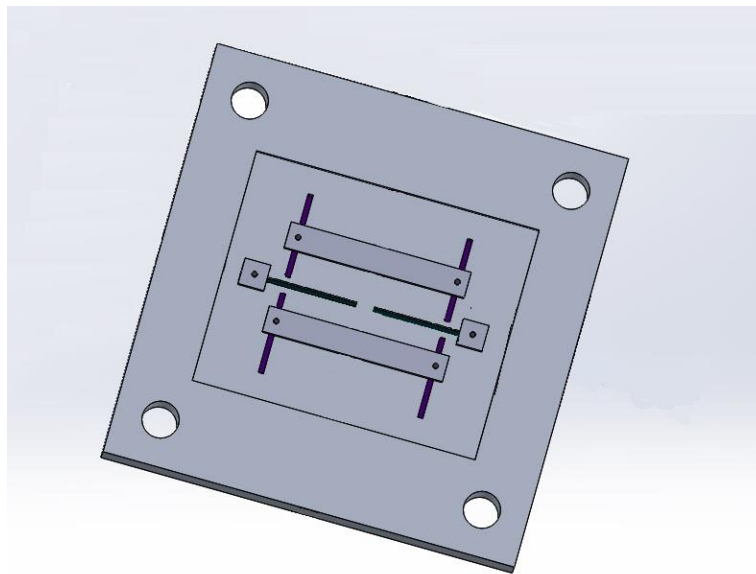
### 3.1.2 Βάση συγκράτησης τεμαχίων.

Η βάση συγκράτησης των τεμαχίων σε μια μηχανή υπερήχων είναι πολύ σημαντική υπόθεση καθώς επιβάλλεται μια σταθερή συγκράτηση των δοκιμίων που υφίστανται χιλιάδες κύκλους φόρτισης μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Στην περίπτωση που κάποιο από τα τεμάχια μετακινηθεί τότε οδηγούμαστε σε αποτυχημένη συγκόλληση. Γι αυτό το λόγο, για τη συγκόλληση μικρορευστονικών πολυμερικών διατάξεων, σχεδιάστηκε καινούργια βάση συγκράτησης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks (εικόνα 38) και έλαβε μορφή στο μηχανουργείο του ιδρύματος «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ». Η κοπή και το φρεζάρισμα έγινε με μηχανή CNC. Η εικόνα 39 και 40 δείχνει το τελικό σχέδιο και το τελικό αποτέλεσμα.

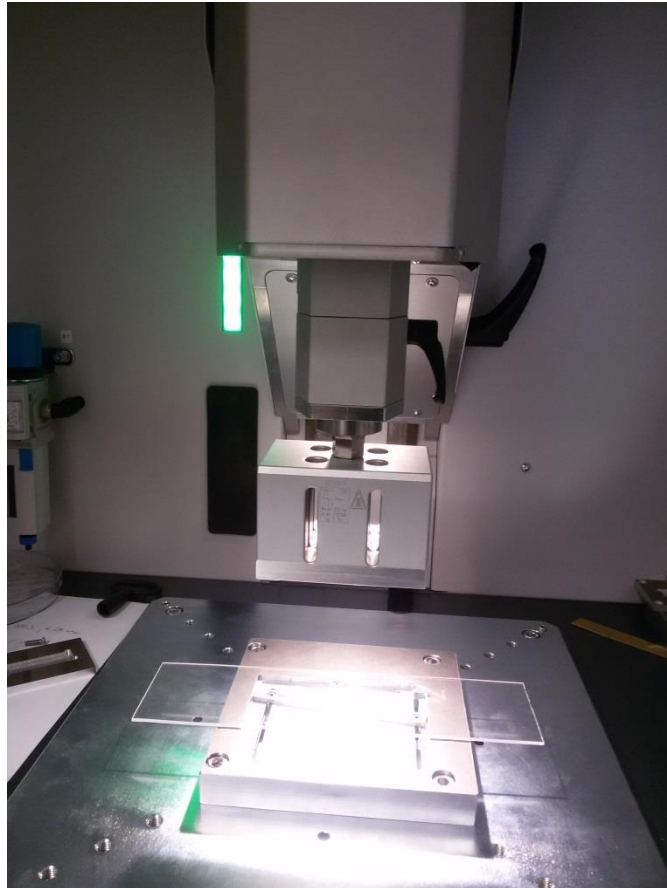


**Εικόνα 38** διαστάσεις βάσης συγκόλλησης για κοπή στο μηχανουργείο

Η χρήση των κοχλίων κρίνεται άωφελη, αφού μπορούν να τοποθετηθούν κοχλίες σύσφιξης στις πλάκες συγκράτησης των τεμαχίων. Επιπλέον, εξοικονομείται υλικό, καθώς μειώνεται και το κόστος και ο χρόνος κατασκευής. Γι αυτό, με τις παραπάνω διαστάσεις το σχέδιο παίρνει την παρακάτω μορφή:



**Εικόνα 39** τελική μορφή βάση συγκράτησης



Εικόνα 40 Βάση συγκράτησης τεμαχίων και κέρας συγκόλλησης

### **3.1.3 Προγραμματισμός του μηχανήματος συγκόλλησης υπερήχων**

Τα μηχανήματα συγκόλλησης με υπερήχους διαθέτουν λογισμικό που επιτρέπει τον ακριβή προγραμματισμό της συγκόλλησης που πρόκειται να επιτευχθεί. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα να δώσουμε τις επιθυμητές παραμέτρους για να επιτύχουμε την συγκόλληση.

#### **3.1.3.1 Προγραμματισμός / Παράμετροι**

Στην παρακάτω εικόνα 41 φαίνονται όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με τη μέθοδο συγκόλλησης. Επίσης φαίνεται η δυνατότητα να ασκήσουμε διαφορετικές πιέσεις κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης (μέχρι τέσσερις διαφορετικές) όπου τοποθετούνται τα μέτρα τους σε ξεχωριστές περιοχές και για διαφορετικούς χρόνους ή βάθη κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.



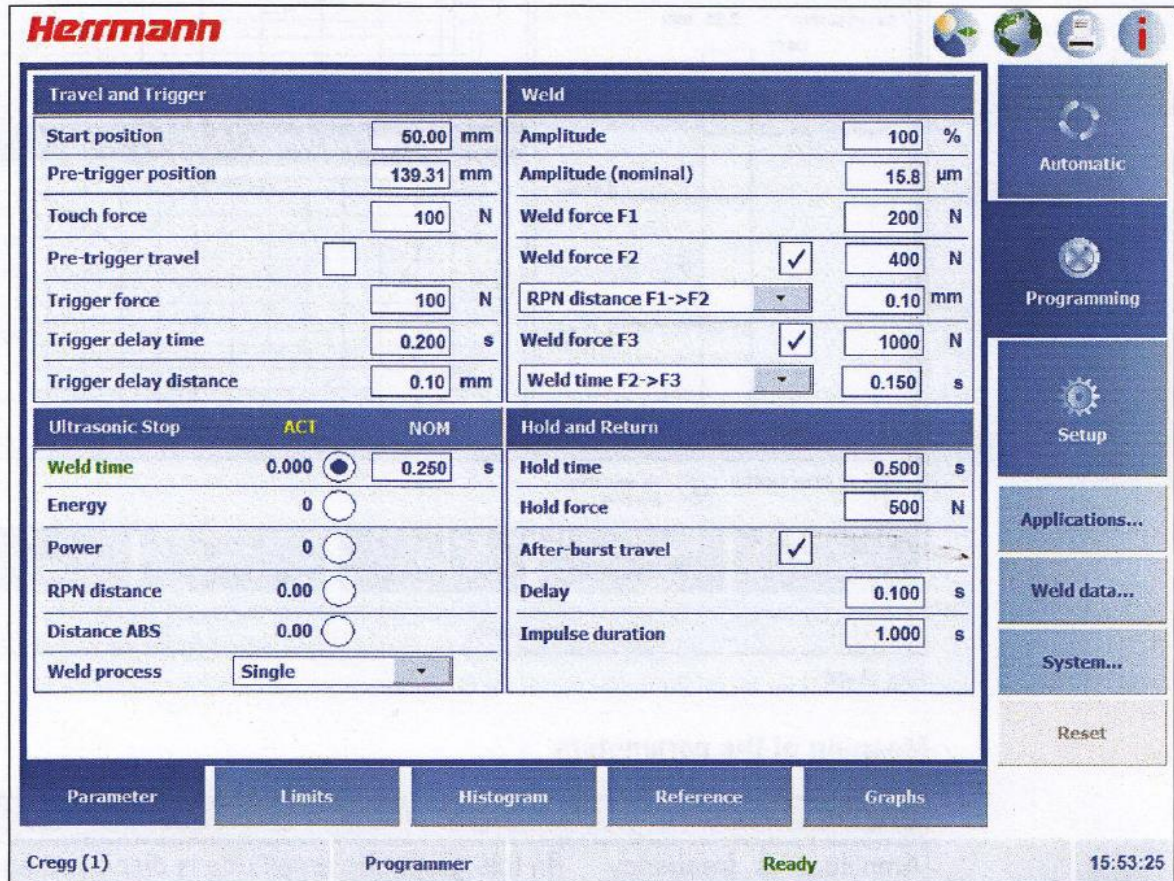


Fig. 9-45

Εικόνα 41 Οθόνη για προγραμματισμό της συγκόλλησης με υπερήχους

### Η σημασία των παραμέτρων

Παρακάτω εξηγείται λεπτομερώς η σημασία των παραμέτρων που λαμβάνουν μέρος στο προγραμματισμό χωρίς όμως ν' αναλύεται το ποσοστό σημαντικότητας της κάθε μιας. Οι όροι χρησιμοποιούνται με αγγλική ορολογία καθώς έτσι ακριβώς αναγράφονται στο μηχάνημα συγκόλλησης Herrmann, αλλά η ερμηνεία τους αποδίδεται στην ελληνική γλώσσα.

Travel down and trigger	
Start position	Η θέση στην οποία ξεκινάει η κίνηση του κέρατος ως τη θέση που ονομάζεται pretrigger position
Pretrigger position	Η θέση στην οποία το σύστημα κάνει διερεύνηση για το επωνομαζόμενο trigger point
Touch force	Η δύναμη που ασκείται για να προσεγγίσει τη θέση pretrigger position μέχρι τη θέση trigger position και ως ότου έρθει σε επαφή με το δοκίμιο προς συγκόλληση



<b>Travel down and trigger</b>	
Pre-trigger travel	<p>Μαρκάρισμα αυτής της επιλογής όταν επιθυμείται να ταλαντώνεται το κέρασ κατά τη διάρκεια που κινείται προς τη θέση κατεργασίας operation position</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ο υπέρηχος τίθεται σε λειτουργία με την ενεργοποίηση του αρχικού σήματος</li> <li>• Το Pre-trigger travel είναι χρήσιμο στις κατεργασίες με τις επόμενες κύριες μεταβλητές: <i>Weld time, energy, power, absolute distance ABS</i></li> <li>• Το Pre-trigger travel δεν χρησιμοποιείται στην περίπτωση κατεργασίας που έχει κύρια μεταβλητή το <i>RPN distance</i></li> </ul>
Trigger force	Η δύναμη όπου καθορίζεται όταν το κέρασ φτάσει στη θέση trigger point
Trigger delay – time	Ελεγχόμενος χρόνος για να καθυστερήσει να ασκηθεί η δύναμη στη θέση trigger point
Trigger delay – distance	Ελεγχόμενη απόσταση για να καθυστερήσει να ασκηθεί η δύναμη στη θέση trigger point

<b>Welding</b>		
Amplitude	Το πλάτος ταλάντωσης με το οποίο ταλαντώνεται το κέρασ συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Εδώ, η τιμή της μεταβλητής εισέρχεται επί τοις εκατό (%).	Αυτές οι δύο μεταβλητές υπολογίζονται σε αντιστοιχία η μία με την άλλη: Αν εισάγουμε μια τιμή για τη μεταβλητή <i>Amplitude (nominal)</i> , τότε το σύστημα θα συμπληρώσει τη μεταβλητή στο πεδίο του Amplitude (και αντιστρόφως)
Amplitude (nominal)	Η ονομαστική τιμή του πλάτους ταλάντωσης σε μm.	
Weld force F1	Η δύναμη με την οποία το κέρασ συγκόλλησης πιέζει το προς κατεργασία τεμάχιο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.	
Weld force F2*	Μαρκάρισμα αυτής της επιλογής όταν επιθυμείται η αλλαγή σε μια διαφορετική δεύτερη δύναμη κατά τη διάρκεια συγκόλλησης και επιλογή του μέτρου (force F2).	
Weld force F3*	Μαρκάρισμα αυτής της επιλογής όταν επιθυμείται η αλλαγή σε μια διαφορετική δεύτερη δύναμη κατά τη διάρκεια συγκόλλησης και επιλογή του μέτρου (force F3).	

RPN distance F1->F2	Το σημείο μετάβασης από τη δύναμη F1 στη δύναμη F2 με βάση την επιθυμητή τιμή. Π.χ. RPN distance (F1->F2) 0.1 mm σημαίνει: Όταν η απόσταση συγκόλλησης (μεταξύ των δύο τεμαχίων) φτάσει τη τιμή 0.1 mm θα γίνει αλλαγή της δύναμης από F1 σε F2.
Weld time F2->F3	Ο χρόνος μετάβασης από τη δύναμη F2 στη δύναμη F3 με βάση την επιθυμητή τιμή. Π.χ. weld time (F2->F3) 0.1 s σημαίνει: Όταν ο χρόνος συγκόλλησης φτάσει τη τιμή 0.1 sec θα γίνει αλλαγή της δύναμης από F2 σε F3.

\*οι συγκεκριμένες παράμετροι λαμβάνονται υπόψη μόνο αν έχει μαρκκαριστεί η επιλογή.

<b>Ultrasonic stop</b>	
Weld time	Ο χρόνος συγκόλλησης. Με την ολοκλήρωση του σταματούν οι υπέρηχοι. Για παραπάνω από μια μεταβλητή μαρκάρουμε περισσότερες μεταβλητές στην επιλογή ADEPT και τοποθετούμε τις επιθυμητές τιμές των μεταβλητών που θέλουμε να σταματήσουν οι υπέρηχοι.
Hold force	Η δύναμη που ασκείται από το κέρασ συγκόλλησης (horn), μετά το πέρας της εφαρμογής υπερήχων. Το κέρασ απλώς ασκεί μια δύναμη στα δοκίμια, χωρίς να ταλαντώνεται.
Hold time	Ο χρόνος που διαρκεί η δύναμη συγκράτησης (Hold Force)
PRN	
Absolute distance ABS	
Weld process	Η διαδικασία κατά την οποία εφαρμόζονται οι υπέρηχοι. Η διαδικασία αυτή σταματάει, όταν σταματάνε και οι υπέρηχοι

Δίνεται στο εγχειρίδιο χρήσης, ότι η θεωρητική δύναμη πίεσης (Welding Force) εξαρτάται από την επιφάνεια του τεμαχίου που έρχεται σε επαφή με το κέρασ συγκόλλησης και δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$\text{Welding Force [N]} = \text{joint length [mm]} \times 3 \text{ [N/mm]}$$

Για τη δύναμη εκκίνησης (trigger force), το εγχειρίδιο χρήσης αναφέρει πως πρέπει να είναι τα 2/3 της δύναμης πίεσης (Welding Force) που έχει υπολογιστεί.

Τέλος, για το χρόνο συγκόλλησης, η ενδεικτική τιμή που δίνεται από το εγχειρίδιο είναι 0.5 δευτερόλεπτα.

### 3.1.3.2 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά

Ο μέγιστος χρόνος που μπορούμε να κάνουμε συγκόλληση με υπερήχους είναι 16 δευτερόλεπτα (weld time less or equal than 16 secs). Ο μέγιστος χρόνος συγκράτησης (Hold time) είναι 120 δευτερόλεπτα.

Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να δοθεί από το μηχάνημα είναι 2500 Joule.

Η μέγιστη δύναμη συγκόλλησης (welding force) είναι 650 Newton. Το ίδιο όριο ισχύει και όλες τις υπόλοιπες δυνάμεις: δύναμη συγκράτησης (Hold Force), δύναμη εκκίνησης (Trigger Force) και δύναμη επαφής (Touch Force).

Το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης (amplitude) είναι 15.8  $\mu\text{m}$ , που η αντίστοιχη ποσοστιαία είναι το 100% (amplitude nominal).

Επίσης, το συγκεκριμένο μηχάνημα της Herrmann δεν διαθέτει καμία επιλογή για αλλαγή του πλάτους ταλάντωσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Εφόσον επιλεγεί ένα συγκεκριμένο πλάτος ταλάντωσης, η συγκόλληση θα πραγματοποιηθεί με το συγκεκριμένο πλάτος.

Στις επιλογές των παραμέτρων εμφανίζονται 4 πεδία, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Τα πεδία αυτά είναι:

➤ Travel and Trigger

Στο πεδίο αυτό γίνεται απλή εισαγωγή των παραμέτρων με τις επιθυμητές τιμές

➤ Weld

Στο πεδίο αυτό γίνεται εισαγωγή των παραμέτρων με τις επιθυμητές τιμές, αλλά παράλληλα υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής περισσότερης από μίας δύναμης συγκόλλησης (welding force) με διαφορετικές τιμές στη κάθε μία. Η μετάβαση από τη μία δύναμη στην άλλη γίνεται με γνώμονα είτε το χρόνο εφαρμογής της εκάστοτε δύναμης, είτε με γνώμονα ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, είτε με συγκεκριμένο σημείο RPN.

➤ Ultrasonic Stop

Στο πεδίο αυτό γίνεται εισαγωγή των παραμέτρων με τις επιθυμητές τιμές που θέλουμε να σταματήσουμε την εφαρμογή υπερήχων. Υπάρχουν 3 διαθέσιμες επιλογές: SINGLE, ADEPT και SEQUENTIAL. Συγκεκριμένα, κάθε επιλογή έχει την εξής επίδραση στο σταμάτημα των υπερήχων:

- SINGLE: οι υπέρηχοι σταματούν με γνώμονα μία και μοναδική παράμετρο που έχει επιλέξει ο χειριστής
- ADEPT: οι υπέρηχοι σταματούν με γνώμονα δύο παραμέτρους που έχει επιλέξει ο χειριστής. Όταν μία από τις δύο παραμέτρους που έχει επιλέξει ο χειριστής, φτάσει στη τιμή που έχει δώσει ο τελευταίος, σταματάει η εφαρμογή υπερήχων, όσο και να απέχει η άλλη από την επιθυμητή τιμή.

➤ SEQUENTIAL: η επιλογή που μας επιτρέπει να διαχωρίσουμε σε διακοπτόμενα στάδια την εφαρμογή υπερήχων. Η λειτουργία όμως των υπερήχων διατηρείται κατά την εναλλαγή των σταδίων, χωρίς όμως να εφαρμόζεται κάποια πίεση.

➤ Hold and Return

Στο πεδίο αυτό γίνεται απλή εισαγωγή των παραμέτρων με τις επιθυμητές τιμές που αφορούν το στάδιο μετά την εφαρμογή υπερήχων.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το ελάχιστο κάτω όριο συχνότητα υπερήχων είναι 34,500 KHz, δηλαδή η κατεργασία σταματάει όταν η συχνότητα πάρει τη συγκεκριμένη ή μικρότερη τιμή.

### 3.2 Κοπή με Laser

Η μηχανή κοπής Laser (εικόνα 42) πρέπει να συνδεθεί με το Η/Υ μέσω θύρας USB, καθώς και να εγκατασταθεί το πρόγραμμα εκτύπωσης VLS 3.50 που μπορεί να “διαβάσει” το μηχάνημα laser. Όλες οι διατάξεις που πρόκειται να κοπούν, σχεδιάζονται πρωτίστως στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks και στην συνέχεια “εκτυπώνονται” στο πρόγραμμα ULS model VLS 3.50, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η κοπή. Με μαύρο χρώμα χρωματίζονται οι διατάξεις που πρόκειται να εγχαραχτούν απλώς, ενώ με κόκκινο αυτές που πρόκειται να κοπούν. Στην περίπτωση μας μόνο η σχεδίαση με κόκκινο χρώμα ήταν απαραίτητη. Η συνολική επιφάνεια που τοποθετείται στη μηχανή laser, πρέπει να έχει μέγιστες διαστάσεις 600 mm x 300 mm , γι αυτό και χρειάζεται να σχεδιαστεί σωστά και στη σωστή κλίμακα τα τεμάχια προς κοπή, καθώς και να γίνει η σωστή μεταφορά τους στο πρόγραμμα εκτύπωσης. Τέλος θα πρέπει να επιλεγεί πάχος γραμμής 0,05 σε κάθε επιλογή των ρυθμίσεων Line Thickness and Print Settings του Solidworks καθώς και υψηλή ποιότητα στο πρόγραμμα εκτύπωσης, ώστε να πραγματοποιήσουμε μια καλή ποιότητα κοπής.

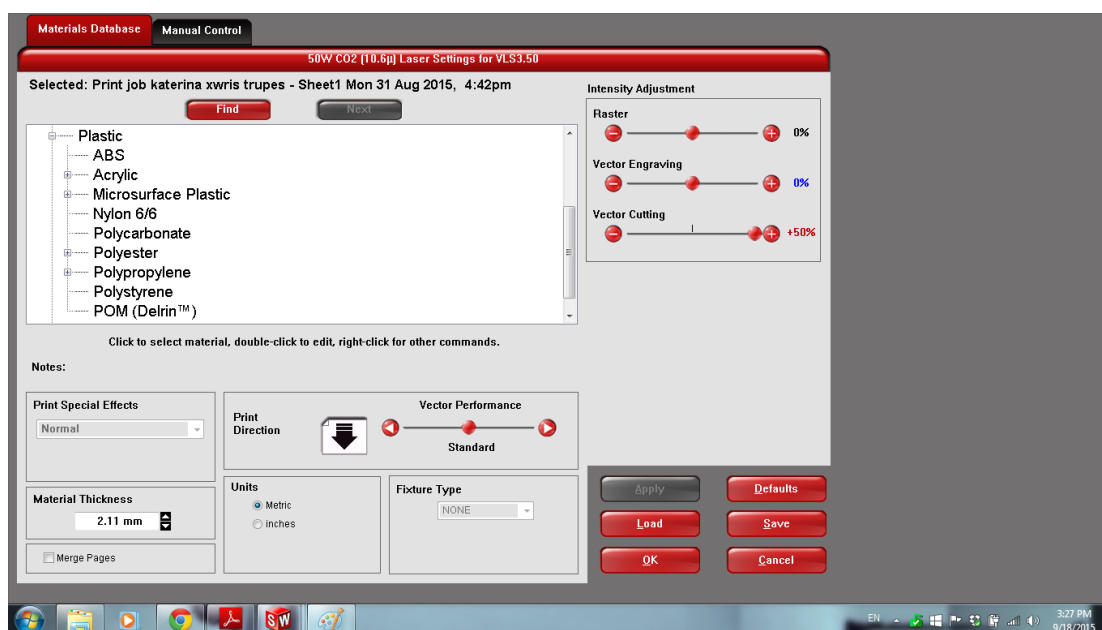


Εικόνα 42 Μηχάνημα κοπής LASER

Μέσω του προγράμματος επιλέγεται υλικό για την κοπή μέσα από μια γκάμα διάφορων υλικών, καθώς και η δύναμη κοπής της δέσμης laser σε βαθμονομημένη επιλογή ακεραίων από την τιμή 0 έως 100. Η ένταση της δέσμης παίρνει τιμές σε ποσοστό επί τοις εκατό (100%) και συγκεκριμένα έχει ελάχιστη τιμή το 0% και μέγιστη το 100%. Το 0% αντιστοιχεί σε δύναμη 50% της ενέργειας της δέσμης, ενώ από 50% και πάνω δίνεται η μέγιστη δύναμη στην ενέργεια της δέσμης, δηλαδή λειτουργεί στο 100%! Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι όταν αυξάνω την ένταση της δέσμης παραπάνω από 50% δεν αυξάνεται η δύναμη της δέσμης αλλά μειώνεται η ταχύτητα κοπής, δηλαδή η κεφαλή του laser εφαρμόζει την 100% ενέργειας δέσμης

του laser, έτσι ώστε η δέσμη να παραμείνει περισσότερη ώρα στο ίδιο σημείο και να λιώσει περισσότερο το υλικό.

Το 0 αντιστοιχεί σε 50% ενέργεια της μέγιστης της δέσμης, ενώ από την τιμή 50 και μετά, όλες οι μεγαλύτερες αντιστοιχούν στο 100% της. Πάνω από την τιμή 50, δεν αυξάνεται η δύναμη της δέσμης, αλλά μειώνεται η ταχύτητα κοπής, Απαιτείται να εισαχθεί το πάχος του υλικού που πρόκειται να κοπεί καθώς και το ύψος της ακίδας laser που εφαρμόζει τη δέσμη ενέργειας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 43).



Εικόνα 43 Προγραμματισμός για την κοπή Laser

Επειδή όμως στη συγκεκριμένη μέθοδο με 100% δύναμη της δέσμης και την επιλογή κοπής του υλικού ως Continuous Cast Acrylic, παρατηρήθηκαν ανομοιομορφίες στα δοκίμια PMMA, όπως καψίματα, ή αποτύπωση των κυβελίδων που βρίσκονται από κάτω ως βάση, αποφασίστηκε να γίνει μια διερεύνηση στις συνθήκες κοπής. Σκοπός της διερεύνησης αποτελούσε η ταχύτητα της κεφαλής σε συνδυασμό με τη δύναμη δέσμης, ώστε να μην προλαβαίνει να λιώνει το υλικό κατά τη διάρκεια της κοπής. Μετά από συγκεκριμένα πειράματα που παρατίθενται στο παράρτημα, καταλήξαμε στο εξής:

Το ύψος της ακίδας laser, μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα κοπής για επιλογή συγκεκριμένου υλικού με τον εξής τρόπο:

- Όσο αυξάνω το Z-axis , μειώνω την ταχύτητα, ενώ,
- Όσο μειώνω το Z-axis , αυξάνω την ταχύτητα κοπής.

Διάφορα υλικά από τις επιλογές του προγράμματος του μηχανήματος laser δοκιμάστηκαν σαν επιλογές για την κοπή PMMA, οι οποίες φαίνονται στο Παράρτημα Α. Οι βέλτιστες συνθήκες κοπής είναι για το υλικό Continuous Cast Acrylic, με δύναμη ενέργειας δέσμης στο 100% (vector cutting στα  $\frac{3}{4}$  της μπάρας, δηλαδή στο 75%), ταχύτητα κοπής 8.2% της μέγιστης, PPI ίσο με 1000 και ύψος στον κάθετο άξονα (z-axis) 1.1 [mm] πάνω από το τεμάχιο. Για το COP δεν συνιστάται η

κοπή με laser, καθώς λιώνει στις ακμές στις συνηθισμένες συνθήκες κοπής, λόγω διαφορετικού Tg.

Στην κοπή με laser είναι πάντα απαραίτητη η σύνδεση με παροχή αέρα, ώστε να υπάρχει συνεχής ψύξη μέσω αερισμού κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της δέσμης. Η παροχή θα πρέπει να συνδέεται πριν το άνοιγμα της μηχανής laser και να αποσυνδέεται μετά το κλείσιμο αυτής.

### **3.3 Πρέσα θερμικής συγκόλλησης**

Η πρέσα θερμικής συγκόλλησης έχει δυνατότητα ελέγχου με ακρίβεια την κίνηση των πλακών, τη θερμοκρασία των επιφανειών θέρμανσης και τη δύναμη που ασκείται στα δοκίμια. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη των δύο πλακών καθώς και τα θερμοστοιχεία τα οποία βρίσκονται από κάτω και προσδίδουν ελεγχόμενα θερμότητα μέσω αντιστάσεων, στις δύο πλάκες. Η πίεση ασκείται με ένα υδραυλικό σύστημα, όπου το ρευστό είναι λάδι. Η μέγιστη θερμοκρασία είναι 200 °C, χρησιμοποιείται όμως μόνο ως τους 135 – 140 °C. Η μέγιστη πίεση που μπορεί να ασκήσει είναι 5000 pounds.



**Εικόνα 44** Θερμική πρέσα εργαστηρίου

### **3.4 Προφιλόμετρο**

Μετά την εγχάραξη καναλιού είναι απαραίτητη η μέτρηση του βάθους της δομής που εγχάραχτηκε. Προτιμάται το προφιλόμετρο σαν μια εύχρηστη και γρήγορη μέθοδος μέτρησης του βάθους. Το προφιλόμετρο είναι της εταιρείας Ambios Technology και είναι το μοντέλο XP-2. Με μια ακίδα που διαθέτει πυραμοειδή ακμή στο τέλος της μετριέται η τραχύτητα και μικροεξοχές/μικροεσοχές, αλλά και το βάθος των καναλιών με ακρίβεια νανομέτρων (ακρίβειας 0.1 μm). Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των καναλιών είναι: Δύναμη ακίδας : 0.20 mg και ταχύτητα σάρωσης 0,5 m/sec.

### **3.5 Μηχανή διάτρησης οπών**

Ένα τρυπάνι με ταχύτητα περιστροφής από 2.000 έως 6.000 rpm περιστρέφεται ώστε να πραγματοποιηθεί η διάνοιξη των οπών. Τα κονδύλια που χρησιμοποιούνται έχουν εύρος από 0,5 mm έως 5 mm. Το κονδύλι που χρησιμοποιείται για τη διάτρηση των οπών εκατέρωθεν του καναλιού είναι διαμέτρου 1 mm.

### **3.6 Μηχανή Plasma**

Ο αντιδραστήρας πλάσματος που βρίσκεται στο εργαστήριο του καθαρού χώρου του ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής, έχει τη ονομασία REACTIVE ION ETCHER και έχει τη δυνατότητα εγχάραξης διαφόρων υλικών όπως το πυρίτιο, αλλά και επιβολής τραχύτητας σε πολυμερικά υλικά όπως το πλεξιγκλας. Χρησιμοποιεί ως λειτουργία για χάραξη την αντίδραση των ιόντων για να δώσει καλή ανισοτροπία, επιλεκτικότητα και ομοιομορφία στα δείγματα που επεξεργάζεται. Προσφέρει το πλεονέκτημα της καλής αναπαραγωγιμότητας και της εξαιρετικής σταθερότητας των διεργασιών χάραξης.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ότι το σύστημα αποτελείται από ένα κύριο θάλαμο και από διάφορες επιμέρους μονάδες που χρησιμεύουν για τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Οι επιμέρους μονάδες είναι οι εξής:

- Η κεντρική μονάδα που διαχειρίζεται τις βασικές λειτουργίες του συστήματος
- Το σύστημα ρύθμισης δυναμικού
- Το σύστημα ελέγχου της πίεσης
- Η μονάδα ισχύος
- Το σύστημα ρύθμισης και ελέγχου της θερμοκρασίας
- Οι ρυθμιστές ροή των αερίων
- Τα όργανα ένδειξης του προθάλαμου και του κυρίου θαλάμου
- Οι μηχανικές αντλίες





Εικόνα 45 μηχανή plasma RIE

### 3.7 Μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων

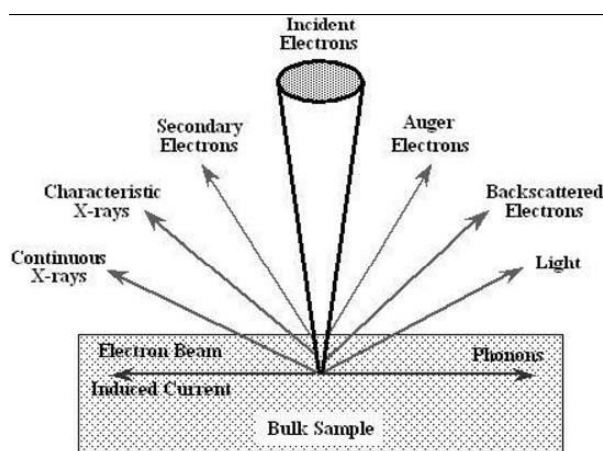
Στην διατριβή αυτή, για την παρατήρηση μιας επιφάνειας αλλά κυρίως μιας δομής χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM, εικόνα 46). Παρ' όλο που διαθέτει εξαιρετικά καλή ανάλυση στην κλίμακα των νανομέτρων (μέχρι και 1 nm), δεν δίνει πληροφορίες ύψους που χρειάζονται για την ανάλυση της τραχύτητας μιας επιφάνειας. Το πλεονέκτημα του SEM είναι ότι είναι ταχύ και μπορεί να αποδώσει την τοπογραφία μιας ολοκληρωμένης δομής.



Εικόνα 46 Μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων JSM-7401-F που βρίσκεται στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής



Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στο θάλαμο του μικροσκοπίου και στη συνέχεια ο θάλαμος πρέπει να βρίσκεται υπό κενό. Για να εμφανιστεί η τοπογραφία μια δέσμη ηλεκτρονίων προσπίπτει και αλληλεπιδρά με το υπόστρωμα δημιουργώντας μια ποικιλία σημάτων ηλεκτρονίων, φωτονίων και άλλων (εικόνα 47).



Εικόνα 47 Σήματα που εκπέμπονται από μια επιφάνεια κατά την πτώση δέσμης ηλεκτρονίων

### 3.8 Γιαλόχαρτα εμπορίου

Χρησιμοποιούνται τα γιαλόχαρτα εμπορίου P240, P800 και P1000 για λείανση των ακμών των δοκιμίων και σε ορισμένες περιπτώσεις για επιβολή τραχύτητας σε μια πλευρά του δοκιμίου προς συγκόλληση.

### 3.9 Λογισμικό (Matlab, ImageJ)

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, είναι το υπολογιστικό πρόγραμμα Matlab και το πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων ImageJ.

Το MATLAB (matrix laboratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρώων. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο είναι πολύ "ισχυρό" και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό καθώς περιέχει εντολές από την C++ , όπως την while, την switch και την if. Στον τομέα των γραφικών όσον αφορά τον μαθηματικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει συναρτήσεις πραγματικές, μιγαδικές, πεπλεγμένες συναρτήσεις δύο μεταβλητών και άλλες. Όσον αφορά τον στατιστικό κλάδο μπορεί να υλοποιήσει ιστογράμματα, τομεογράμματα, ραβδοδιαγράμματα, εμβανογράμματα και άλλα.

Η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος στην παρούσα διπλωματική εργασία μας επιτρέπει την αναπαράσταση πολλαπλών σημείων στο τρισδιάστατο επίπεδο με δυνατότητα υπολογισμού εξισώσεων πολλών μεταβλητών. Λειτουργεί ως χρήσιμο εργαλείο για το στατιστικό σχεδιασμό Box-Benken με αναπαράσταση των κρίσιμων μεταβλητών στις τρεις διαστάσεις. Ο κώδικας που γράφτηκε για κάθε υπολογισμό φαίνεται στο Παράρτημα Β.

Το ImageJ είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας, βασισμένο σε Java, που αναπτύχθηκε στα National Institutes of Health. Με το ImageJ είναι δυνατή η επίλυση πολλών προβλημάτων επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας. Μπορεί να διαβάσει πολλές μορφές αρχείων εικόνας, συμπεριλαμβανομένων TIFF, PNG, GIF, JPEG, BMP, DICOM. Επίσης, μπορεί να υπολογίσει περιοχή και τιμή εμβαδού σε pixel και να εξάγει στατιστικά στοιχεία από τις επιλογές που ορίζονται από το χρήστη. Μπορεί να μετρήσει αποστάσεις και γωνίες. Υποστηρίζει τις βασικές λειτουργίες επεξεργασίας εικόνας, όπως η λογική αριθμητικών πράξεων μεταξύ των εικόνων, επεξεργασία της αντίθεσης, συνέλιξη, ανάλυση Fourier και δυνατότητα ανίχνευσης ακμών. Κάνει γεωμετρικούς μετασχηματισμούς όπως την κλιμάκωση, την περιστροφή, και την αναδίπλωση. Το πρόγραμμα υποστηρίζει οποιοδήποτε αριθμό των εικόνων ταυτόχρονα, περιορίζεται μόνο από τη διαθέσιμη μνήμη. Η χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος στην παρούσα διπλωματική εργασία μας επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της συγκόλλησης σε ποσοστό επί του συνολικού όγκου.

## Κεφάλαιο 4

---

### 4.1 Προετοιμασία διατάξεων για συγκόλληση

Για τη συγκόλληση επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μια τυπική μικρορευστονική διάταξη διαστάσεων 1.45 cm x 4.45 cm, ενώ το δοκίμιο χωρίς μικρορευστονική διάταξη, θα έχει διαστάσεις 1.50 cm x 4.50 cm. Οι αρχικές δοκιμές βέβαια έγιναν σε απλά κομμάτια χωρίς μικροκανάλια. Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε ήταν το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο PMMA (polymethylmethacrylate) και το πολυμερές κυκλοολεφίνης COP (cyclic olefin polymer). Η προετοιμασία των διατάξεων για τη συγκόλληση αποτελεί μια σειρά διαδικασιών που προηγούνται της συγκόλλησης με υπερήχους. Η σειρά διαδικασιών αποτελείται κυρίως από τα εξής βήματα:

Η προετοιμασία των δειγμάτων αποτελεί μια σειρά διαδικασιών που πραγματοποιούνται για να μπορεί να διεξαχθεί η πειραματική διαδικασία για τις συγκολλήσεις με υπερήχους. Η σειρά διαδικασιών αποτελείται κυρίως από τα εξής βήματα:

1. Κοπή θερμοπλαστικών πολυμερικών υλικών στις συγκεκριμένες προαναφερθείσες διαστάσεις.
2. Καθαρισμός της επιφάνειάς τους.
3. Εγχάραξη καναλιών και η διάτρηση οπών.
4. Ευθυγράμμιση-επιπεδοποίηση των δοκιμίων.

Το τελευταίο βήμα είναι επιπρόσθετο στη διαδικασία, αλλά άκρως σημαντικό όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, για πραγματοποιήσουμε μια ποιοτική συγκόλληση με υπερήχους χωρίς ενεργειακό κατευθυντή. Στη συνέχεια θα αναλυθούν εκτενέστερα τα προαναφερθέντα απαραίτητα βήματα.

#### 4.1.1 Κοπή θερμοπλαστικών πολυμερικών υλικών σε συγκεκριμένες διαστάσεις

Η κοπή θερμοπλαστικών πολυμερικών υλικών επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

α) με κοπή με laser, β) με μηχανική κοπή με κορδέλα.

Στη κοπή με laser, σχεδιάζονται τα τεμάχια προς κοπή σε συγκεκριμένες διαστάσεις στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks. Στο μικρότερο δοκίμιο θα χαραχτεί το κανάλι και το μεγαλύτερο θα χρησιμοποιηθεί ως 'καπάκι' κατά τη συγκόλληση των πολυμερικών διατάξεων με υπερήχους. Στο παράρτημα παρατίθενται εικόνες από τη σχεδίαση των δοκιμίων στο Solidworks. Στη συνέχεια, μέσω του προγράμματος UCP συνδέουμε το μοντέλο VLS 3.50 της μηχανής laser, ώστε να πραγματοποιηθεί η κοπή, όπως ακριβώς έχει σχεδιαστεί. Μετά από τοποθέτηση φύλλου PMMA στην ειδική βάση του μηχανήματος κοπής laser, πραγματοποιείται η κοπή των τεμαχίων στις συγκεκριμένες διατάξεις που έχουν σχεδιαστεί από μια δέσμη laser. Οι συνθήκες για το θερμοπλαστικό PMMA που πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα UCP είναι οι εξής:

ενέργεια δέσμης στο 100% (vector cutting στα  $\frac{3}{4}$  της μπάρας, δηλαδή στο 75%), ταχύτητα κοπής 8.2% της μέγιστης, PPI ίσο με 1000 και ύψος στον κάθετο άξονα (z-axis) 1.1 [mm] πάνω από το τεμάχιο.

Continuous Cast Acrylic

<b>0 - 100</b>	<b>Power</b>	<b>Speed</b>	<b>PPI</b>	<b>Z- Axis</b>
75	100%	8.2%	1000	1.10

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3.

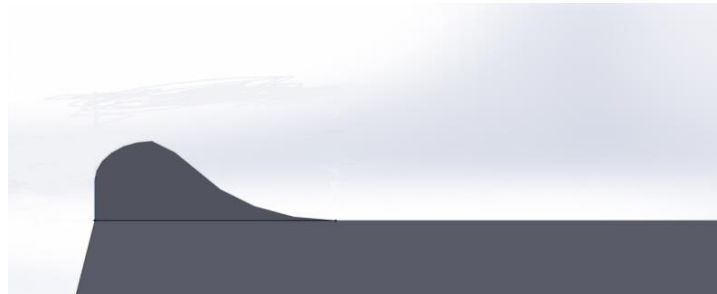
Το θερμοπλαστικό COP αντιθέτως δεν μπορεί να κοπεί ικανοποιητικά με τη χρήση laser, λόγω της μικρής θερμικής του αγωγιμότητας (thermal conductivity), αφού όσο μικρότερη θερμική αγωγιμότητα έχει ένα θερμοπλαστικό, τόσο πιο εύκολα «καίγεται» από ισχυρή δέσμη ενέργειας, όπως αυτή του laser. Για το PMMA είναι 0.23 έως 0.31 W/m °K, ενώ για το COP είναι 0.12 έως 0.15 W/m °K και ας έχει μεγαλύτερο Tg=142 °C. Η κοπή με laser απέτυχε επίσης για το υλικό COC με Tg=134 °C αλλά τον ίδιο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με το COP.

Η κοπή των δειγμάτων με χρήση laser είναι μια γρήγορη και αποτελεσματική διαδικασία, που με ακρίβεια και δυνατότητα ελέγχου, έχουμε δείγματα έτοιμα για πειραματική διαδικασία. Το μειονέκτημα της κατεργασίας αυτής είναι η δημιουργία παραμορφώσεων στις ακμές των άνω πλευρών των τεμαχίων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 48.



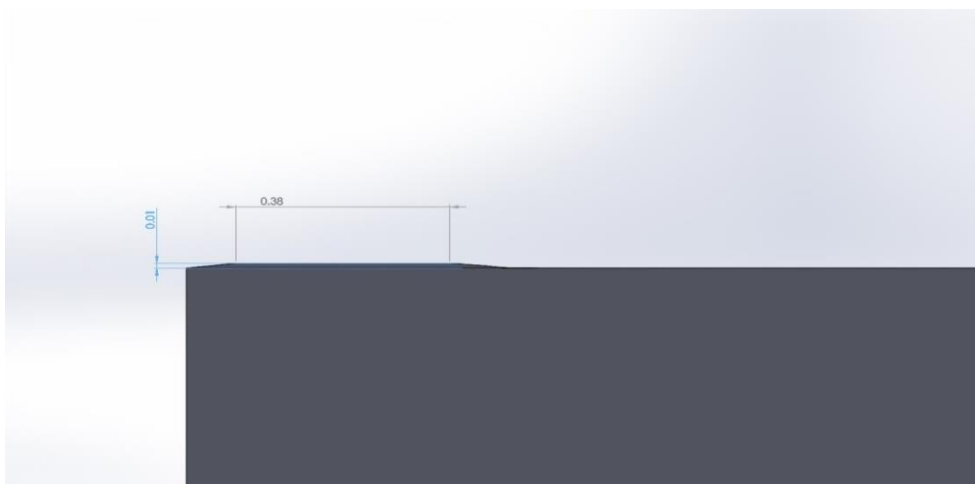
**Εικόνα 48** Κάθετη τομή διάταξης μετά από κοπή με LASER

Η παραμόρφωση αυτή έχει το σχήμα «λοφίσκου» όπως φαίνεται και στο σχήμα της παρακάτω εικόνας 49:



**Εικόνα 49** αποτέλεσμα λοφίσκου αποτέλεσμα της κοπής με LASER

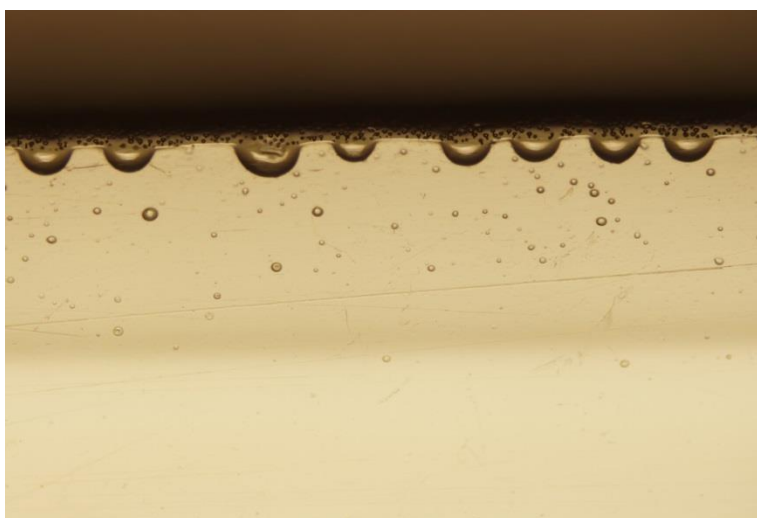
Τα δοκίμια που κόπηκαν με αυτή τη μέθοδο χαρακτηρίστηκαν με το προφιλόμετρο AMBIOS TECHNOLOGY XP-2, ο χαρακτηρισμός αυτός μας έδειξε ότι οι «λοφίσκοι» έχουν εύρος από 8  $\mu\text{m}$  έως 17  $\mu\text{m}$ , ενώ το πλάτος του κυμαίνεται από 150  $\mu\text{m}$  έως 530  $\mu\text{m}$ . Παρακάτω φαίνεται ένα μέσο ύψος 10  $\mu\text{m}$  και ένα μέσο πλάτος 380  $\mu\text{m}$  στην εικόνα 50.



**Εικόνα 50** διαστάσεις λοφίσκου μετά την κοπή με LASER

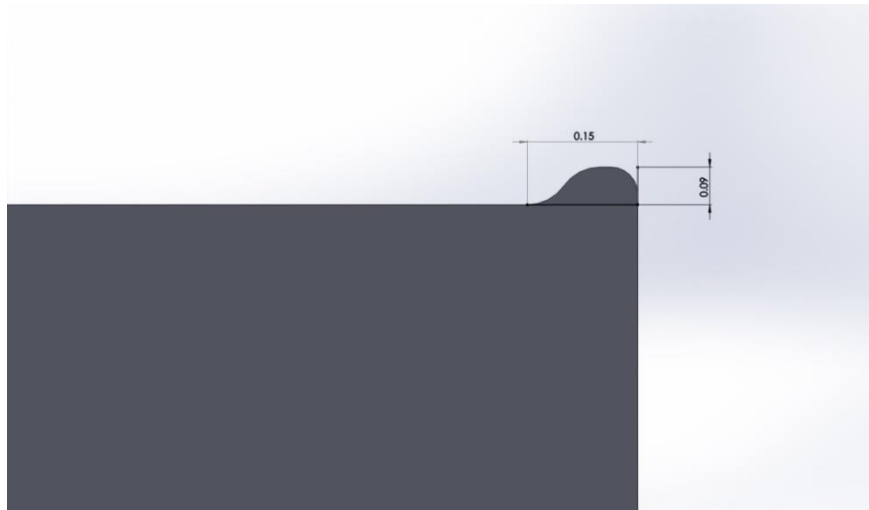
Τέτοιου τύπου παραμορφώσεις παρόλο που φαίνονται μικρές, διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη συγκόλληση με υπερήχους, καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω και όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, οι συγκεκριμένες «προεξοχές» λειτουργούν ως ενεργειακοί κατευθυντές κατά τη διάρκεια τη συγκόλλησης και επιτυγχάνεται

συγκόλληση μόνο στα συγκεκριμένα τμήματα. Έτσι επιτυγχάνεται κόλληση μόνο κοντά στις ακμές των τεμαχίων με αποτέλεσμα το αποτέλεσμα της συγκόλλησης να είναι ανομοιογενές και να μην παρατηρείται συγκόλληση στο κεντρικό τμήμα των δειγμάτων. Για επιβεβαίωση με οπτικό αποτέλεσμα ληφθηκε η παρακάτω εικόνα 51 από το μικροσκόπιο SEM που φαίνεται το πλάτος του «λοφίσκου» με σκούρο χρώμα, στην παρακάτω εικόνα. Το πάνω μέρος όπου περιέχει και οπές σε μορφή φυσαλίδας αποτελεί το εξόγκωμα που δημιουργείται από τη κοπή με laser και έχει τις παραπάνω διαστάσεις.



**Εικόνα 51 Το αποτέλεσμα της κοπής με Laser σε εμφάνιση σε οπτικό μικροσκόπιο**

Στη μηχανική κοπή με κορδέλα, αφού πρωτίστως σχεδιαστούν προσεκτικά οι διαστάσεις πάνω σε φύλλο PMMA ή COP, γίνεται η κοπή με κορδέλα που περιστρέφεται με 5000 rpm. Μετά από παρόμοιο χαρακτηρισμό με το προφιλόμετρο AMBIOS TECHNOLOGY XP-2, βρέθηκε ότι στα δείγματα αυτά παρατηρούνται «γρέζια» με μέγιστο ύψος 85  $\mu\text{m}$  και μέγιστο πλάτος 150  $\mu\text{m}$  (εικόνα 52). Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη λείανση των ακμών των δοκιμίων χρησιμοποιώντας γυαλόχαρτα εμπορίου P240, P800 και P1000, τραχύτητας 50, 20 και 15  $\mu\text{m}$  αντιστοίχως. Λόγω του μικρού μεγέθους του πλάτους, πραγματοποιείται ικανοποιητική απομάκρυνση των όποιων ανωμαλιών και εξογκωμάτων (‘‘γρέζια’’) με αυτή τη μέθοδο κοπής, σε αντίθεση με τη μέθοδο κοπής laser, που έχουμε μεν μικρότερο ύψος λοφίσκου αλλά πολύ μεγαλύτερο πλάτος. Το μεγαλύτερο πλάτος καθιστά σχεδόν αδύνατη την απόλυτη επιπεδοποίηση του δοκιμίου με απλό γυαλόχαρτο εμπορίου, καθώς πρέπει να απομακρυνθεί μάζα της τάξεως των 10 μικρομέτρων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται πως έχει πολύ μικρότερο πλάτος και αρκετά μεγαλύτερο ύψος που μπορεί να απομακρυνθεί ευκολότερα με εκτράχυνση των ακμών.



Εικόνα 52 διαστάσεις λοφίσκου μετά την κοπή με σέγα

#### 4.1.2 Καθαρισμός της επιφάνειας τους

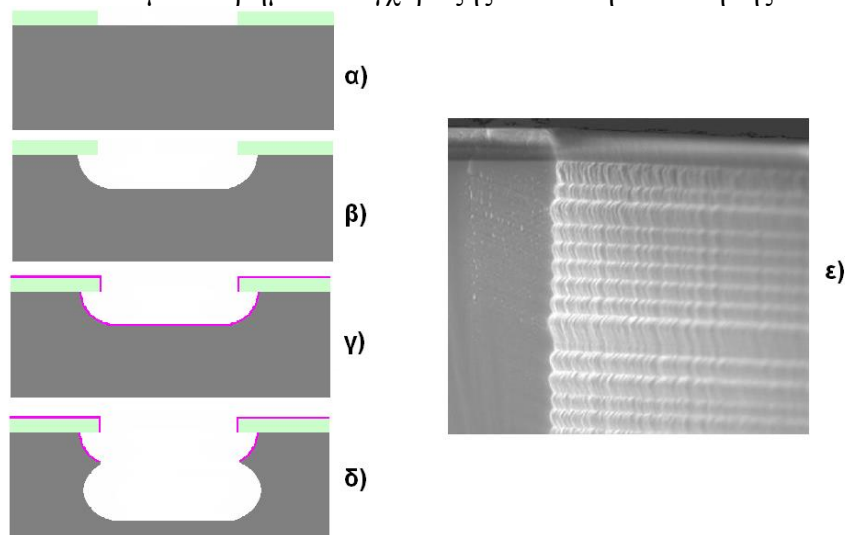
Την κοπή και την λείανση των επιφανειών ακολουθεί ο καθαρισμός της επιφάνειας με προπανόλη. Ο καθαρισμός με προπανόλη κρίνεται απαραίτητος, σε κάθε ενδιάμεσο στάδιο, καθώς και πριν το εκάστοτε πείραμα της συγκόλλησης με υπερήχους, αφενός για απομακρύνουμε τις κόλλες που έχουν τα διαφορετικά εμπορικά πολυμερή και αφετέρου για την απομάκρυνση σκόνης και μικροσωματιδίων που μπορούν να επηρεάσουν τη συγκόλληση. Επίσης, η χρήση προπανόλης συνίσταται για την απομάκρυνση μικροσωματιδίων και πιθανού πολυμερικού υλικού που έχουν κολλήσει στη σφραγίδα (μάστερ) εγχάραξης των καναλιών, μετά την εγχάραξη κάθε μικρορευστονικής διάταξης. Τέλος, η χρήση προπανόλης πραγματοποιείται κάθε φορά πριν την κατεργασία της συγκόλλησης με υπερήχους για απομακρυνθούν λοιπές ουσίες στην επιφάνεια της βάσης συγκράτησης των δοκιμίων και στο κέρασ συγκόλλησης. Στις περιπτώσεις που έχει πραγματοποιηθεί συγκόλληση με τήξη του πολυμερές, ο ίδιος καθαρισμός γίνεται με ακετόνη.

#### 4.1.3 Αποτύπωση μικρορευστονικών διατάξεων με σφραγίδα και διάτρηση οπών

Η αποτύπωση μικρορευστονικών διατάξεων πραγματοποιείται με σφραγίδα αποτύπωσης (master) από πυρίτιο, στη θερμική πρέσσα του εργαστηρίου. Το δοκίμιο που πρόκειται να σχηματοποιηθεί τοποθετείται ανάμεσα στη μήτρα εγχάραξης και σε μια πλάκα πυριτίου (Silicon) και αφού έχουμε τις δύο πλάκες τις πρέσσας στην κατάλληλη θερμοκρασία, εφαρμόζεται πίεση 600 pounds. Η θερμοκρασία της πλάκας που έρχεται σε επαφή με το λεπτό στρώμα πυριτίου είναι 105 °C, ενώ η θερμοκρασία της άλλης πλάκας που έρχεται σε επαφή με τη μάσκα εγχάραξης είναι 128 °C. Μετά από την εφαρμογή της παραπάνω πίεσης, τα τεμάχια υποβάλλονται σε ελεγχόμενη ψύξη μέχρι τους 80 °C.

#### 4.1.3.1 Μέθοδος κατασκευής της σφραγίδας εγχάραξης

Η σφραγίδα αποτύπωσης των μικρορευστομηχανικών διατάξεων (master) φτιάχνεται σε πυρίτιο με την εγχάραξη με πλάσμα χρησιμοποιώντας την διεργασία εγχάραξης γνωστή και ως μέθοδος Bosch. Οι συνθήκες πλάσματος στις οποίες λειτουργεί η συγκεκριμένη διεργασία είναι 1800 W ισχύς της γεννήτριας πλάσματος, 15° C θερμοκρασία δείγματος, -55 Volt δυναμικό πόλωσης δείγματος για επιτάχυνση των ιόντων κάθετα στο δείγμα και 5,25 Pa πίεση. Η διεργασία χρησιμοποιεί δύο αέρια, ένα που εγχάρασσει το πυρίτιο SF<sub>6</sub> και ένα που παθητικοποιεί τα τοιχώματα εναποθέτοντας ένα υμένιο (φιλμ) φθοράνθρακα C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>. Τα αέρια εισέρχονται σε διαδοχικούς κύκλους στον αντιδραστήρα πλάσματος. Ο χρόνος που διεξάγεται ο κάθε κύκλος είναι 7 sec για το βήμα της εγχάραξης με αέριο SF<sub>6</sub> και 3 sec για το βήμα της παθητικοποίησης με αέριο C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>. Στο βήμα παθητικοποίησης, το δυναμικό πόλωσης είναι -100 V. Η διεργασία ξεκινά πρώτα με ένα βήμα εγχάραξης με SF<sub>6</sub> σε λιθογραφημένο πυρίτιο. Μετά το πρώτο βήμα εγχάραξης που διαρκεί κάποια δευτερόλεπτα, εναποτίθεται ένα λεπτό υμένιο φθορανθράκων. Το υμένιο φθορανθράκων παθητικοποιεί την επιφάνεια και εμποδίζει την εγχάραξη. Το οχταφθοροκυκλοβουτάνιο C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> είναι το αέριο που χρησιμοποιείται συνήθως στο βήμα της παθητικοποίησης. Δημιουργούνται ρίζες CF<sub>2</sub> με αποτέλεσμα να εναποτίθεται ένα υμένιο μαλακού πολυμερούς (Teflon). Κατά την έναρξη του επόμενου σύντομου βήματος εγχάραξης, το υμένιο φθορανθράκων αφαιρείται από οριζόντιες επιφάνειες με κάθετο βομβαρδισμό από ιόντα στο μισό περίπου διάστημα του βήματος εγχάραξης και το υπόλοιπο διάστημα εγχάρασσει το πυρίτιο. Η χημική εγχάραξη με το SF<sub>6</sub> δεν είναι ανισότροπη, αλλά το υμένιο από πολυμερές στα τοιχώματα δεν αφαιρείται από την ιονοβολή και έτσι τα κάθετα πλευρικά τοιχώματα εξακολουθούν να προστατεύονται και να μην εγχάρασσονται. Η επανάληψη κύκλων εγχάραξης και παθητικοποίησης δημιουργούν σχεδόν κάθετα τοιχώματα. Το μειονέκτημα της διαδικασίας είναι η κυματοειδής μορφή των τοιχωμάτων (ripples) λόγω των εναλλασσόμενων βημάτων εγχάραξης και παθητικοποίησης



**Εικόνα 53 Η διεργασία Bosch α) λιθογραφημένο πυρίτιο, β) βήμα εγχάραξης με SF<sub>6</sub>, γ) βήμα παθητικοποίησης με C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, δ) επανάληψη βήματος εγχάραξης και ε) εικόνα από SEM από τοίχωμα πυριτίου εγχαραγμένο με τη μέθοδο Bosch**

Η παραπάνω διαδικασία είναι εξίσου σημαντική για τη παρούσα διπλωματική εργασία, αφού συντελεί στη κατασκευή των μικρορευστονικών διατάξεων σε



πολυμερή. Το αποτέλεσμα της σφραγίδας πυριτίου φαίνεται στην επόμενη εικόνα 54. Βέβαια, η συγκεκριμένη μικρορυστονική διάταξη είναι ένα από τα πολλά σχέδια που μπορούν να αποτυπωθούν. Τέλος το βάθος κάθε μικρορυστονικής διάταξης εξαρτάται από την παραπάνω διαδικασία και τη διάρκειά της. Συνήθως, ο χρόνος που απαιτείται για να αποτυπώσουμε ένα κανάλι είναι περίπου 25 με 30 λεπτά.



Εικόνα 54 Master εγχάραξης μικρορυστονικής διάταξης βάθους 50  $\mu\text{m}$

Τέλος, η διάνοιξη οπών πραγματοποιείται με κονδύλι διαμέτρου 1 mm στις άκρες του καναλιού που έχει χαραχτεί με τη παραπάνω διαδικασία (hot embossing). Το τρυπάνι αποτελεί μηχανήμα του εργαστηρίου και η ταχύτητα περιστροφής του είναι 8000 rpm.

#### 4.1.4 Επιπεδοποίηση των δοκιμίων

Η επιπεδότητα είναι πολύ σημαντική ώστε να επιτύχουμε ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας στο προς συγκόλληση δείγμα. Έτσι, αποφασίστηκε να γίνεται επιπεδοποίηση όλων των τεμαχίων πριν από την κατεργασία συγκόλλησης με υπερήχους. Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο λεπτά δισκία πυριτίου που τοποθετούνται πάνω και κάτω από κάθε δοκίμιο και τοποθετούνται στη θερμική πρέσσα. Εκεί, εφαρμόζουμε θερμοκρασία 130 °C, χωρίς να ασκήσουμε καμία πίεση στο δοκίμιο. Εφόσον και οι δύο πλάκες φτάσουν τη συγκεκριμένη θερμοκρασία (ίσως και λίγο μεγαλύτερη, έως 135 °C), θέτουμε τη θερμοκρασία που θέλουμε να βγάλουμε τα δείγματα, δηλαδή 80-85 °C. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει στους 128 °C, εφαρμόζουμε πίεση ίση με 600 rounds και κάνουμε ελεγχόμενη ψύξη μέχρι τους 80 °C για το PMMA. Η πίεση των 600 rounds αφορά ένα δοκίμιο PMMA και υπάρχει δυνατότητα να βάλουμε παραπάνω πολλαπλασιάζοντας την πίεση των 600 rounds με τον αριθμό των δειγμάτων. Στην περίπτωση που βάζουμε παραπάνω από ένα δείγματα, επιτυγχάνουμε αύξηση της παραγωγικότητας. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι 115 °C, ενώ η αντοχή διαρροής του έχει εύρος από 52 ως 71 MPa. Τα δείγματα μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια κάτω από τους 90 °C και αμέσως να τοποθετηθούν κάτω από στρώμα αλουμινίου, ώστε να έχουμε ομοιόμορφη ψύξη σε συνθήκες περιβάλλοντος. Έτσι, επιτυγχάνουμε ταυτόχρονα και καλή επιπεδοποίηση, αλλά και εξομάλυνση τυχόν ανωμαλιών της επιφάνειας ή μικροπροεξοχών αποτέλεσμα της εκάστοτε μεθόδου κοπής. Αν κάποιο από τα τεμάχια έχει



ανομοιομορφίες στην επιφάνεια του, κάτι το οποίο συμβαίνει όταν τοποθετούνται πολλά δείγματα μαζί, επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία για το συγκεκριμένο δείγμα.

Για το COP οι συνθήκες είναι από τη θερμοκρασία των 160 °C, κάνουμε ελεγχόμενη ψύξη μέχρι τους 80 °C και εφαρμόζουμε πίεση των 300 pounds μέσω του υδραυλικού συστήματος της πρέσας. Οι διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, είναι εξαιτίας της διαφορετικής σύστασης του υλικού COP, που έχει θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης 100-163 °C, ενώ η αντοχή σε διαρροή έχει μέτρο 45 – 59 MPa, γι 'αυτό και εφαρμόζουμε και μικρότερη πίεση.

#### **4.1.5 Τελικό στάδιο και τοποθέτηση στη μηχανή συγκόλλησης υπερήχων**

Τα δείγματα μας πλέον είναι έτοιμα για την κατεργασία της συγκόλλησης με υπερήχους μετά και τον τελικό καθαρισμό τους με προπανόλη.

Τα δοκίμια τοποθετούνται προσεκτικά στη βάση συγκράτησης του μηχανήματος, για συγκόλληση με υπερήχους και «συγκρατούνται» στη συγκεκριμένη θέση με ειδικές λάμες που δεν ξεπερνούν σε πάχος, το πάχος και των δύο δοκιμίων. Οι λάμες σφίγγονται εφαπτομενικά με τα δείγματα, ώστε να μην μετακινηθούν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, αλλά ταυτόχρονα να μην είναι υπερβολικά σφιγμένα τα δοκίμια μεταξύ τους, και δεν επιτυγχάνεται καλή επαφή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

#### **4.2 Σχεδιασμός πειραμάτων συγκόλλησης**

Τα πρώτα πειράματα αποσκοπούσαν στο να βρούμε τη περιοχή λειτουργίας της μηχανής, ώστε να έχουμε μια καλή συγκόλληση. Η αποτύπωση των καναλιών πραγματοποιήθηκε με ένα ήδη υπάρχον μάστερ εγχάραξης το οποίο είχε καθαριστεί επαρκώς με ακετόνη. Εφόσον έχει γίνει όλη η απαραίτητη διαδικασία για την προετοιμασία των δειγμάτων, αποφασίζεται να πραγματοποιηθεί ένας στατιστικός σχεδιασμός με τη μέθοδο Box-Benken, ώστε να ανευρεθεί ποια μεταβλητή διαδραματίζει το μεγαλύτερο ρόλο στη συγκόλληση με υπερήχους: το πλάτος ταλάντωσης, η δύναμη συγκόλλησης ή αποδιδόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Επίσης, αν ληφθούν υπόψη οι εξισώσεις (18) και (19) από τη θεωρία της ρεολογίας, προκύπτει ότι η απαιτούμενη ενέργεια είναι 460.2 Joule από συνθήκες περιβάλλοντος (25 °C) μέχρι τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T<sub>g</sub> (115 °C). Οι πράξεις παρατίθενται στο παράρτημα. Συνεπώς, απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για να επιτύχουμε μια «καλή» συγκόλληση.

#### 4.2.1 Στατιστικός σχεδιασμός Box-Benken

Ο σχεδιασμός Box-Benken (Box-Benken Design –BBD) είναι μια στατιστική προσέγγιση, η οποία μοντελοποιεί κάποια διεργασία μ' ένα εμπειρικό μαθηματικό μοντέλο, συνήθως μια πολυωνυμική εξίσωση στο οποίο προσαρμόζονται τα αποτελέσματα (απόκριση) της διεργασίας σαν συνάρτηση ανεξάρτητων μεταβλητών της διεργασίας. Τα μοντέλα των παραμέτρων θα πρέπει να επαληθεύουν την κάθε απόκριση και χρησιμεύουν για την αριθμητική διερεύνηση και τη βελτιστοποίηση της διεργασίας. Την προσαρμογή πραγματοποιήσαμε με λογισμικό που αναπτύξαμε σε περιβάλλον Matlab. Όλοι οι κώδικες παρατίθενται στο παράρτημα Β.

Οι συγκεκριμένοι σχεδιασμοί αποκαλούνται κλασματικοί παραγοντικοί σχεδιασμοί και απαιτούν τρία ή περισσότερα διακριτά επίπεδα τιμών για κάθε μεταβλητή της διεργασίας (παράγοντας). Ο αριθμός των πειραμάτων (δοκιμών) σε ένα πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό είναι  $k^f$ , όπου  $k$  είναι ο αριθμός των επιπέδων που θέτουμε και  $f$  είναι ο αριθμός των παραγόντων. Αναλυτικότερα, ένας σχεδιασμός που αποτελείται από δύο επίπεδα και τρεις παράγοντες, θα απαιτεί οκτώ (8) δοκιμές, ενώ, ένας σχεδιασμός που αποτελείται από τρία επίπεδα και τρεις παράγοντες, θα απαιτεί είκοσι επτά (27) δοκιμές, με σημεία στις γωνίες των ακμών, στα κέντρα των ακμών, στα κέντρα κάθε πλευράς του κύβου, καθώς και στο κέντρο του κύβου.

Γενικά, οι σχεδιασμοί πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να υποστηρίζουν ένα πλήρες τετραεδρικό μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει γραμμικό, αλληλεπίδραση δύο παραγόντων και τετραεδρικούς κανόνες για καμπυλοποίηση. Η γενική μορφή ενός τετραεδρικού μοντέλου είναι η εξής:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^f b_i * X_i + \sum_{i=1}^{f-1} \sum_{j=2}^f b_{ij} * X_i * X_j + \sum_{i=1}^f b_{ij} * (X_i)^2 \quad (20)$$

Όπου το  $Y$  είναι η απόκριση της διεργασίας και  $X_i$  είναι οι μεταβλητές της διεργασίας. Συγκεκριμένα, για τρεις παράγοντες, με δέκα συντελεστές, δηλαδή ο ελάχιστος αριθμός που απαιτείται είναι δέκα (10) σημεία δεδομένων για να επαληθεύσουν το μοντέλο, χωρίς βαθμούς ελευθερίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι:

$$Y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_{12} * x_1 * x_2 + b_{13} * x_1 * x_3 + b_{23} * x_2 * x_3 + b_{11} * x_1^2 + b_{22} * x_2^2 + b_{33} * x_3^2 \quad (21)$$

Οι πιο συνηθισμένοι σχεδιασμοί για περιπτώσεις τριών μεταβλητών είναι το Box-Benken Design με 15 δοκιμές και το Face-Centered Cube (FFC) Design με 17 δοκιμές, το οποίο όμως δεν θα μας απασχολήσει στη παρούσα εργασία. Οι αναπαράσταση των σημείων στο κύβο φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.

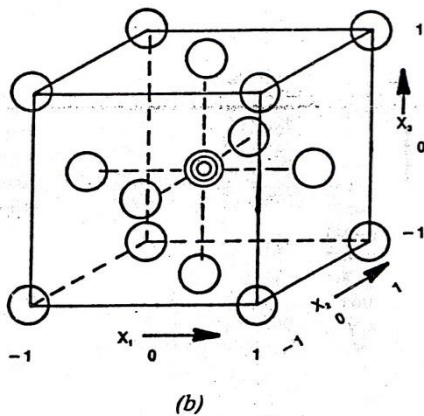
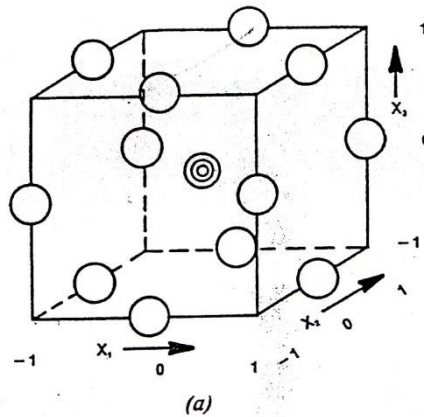


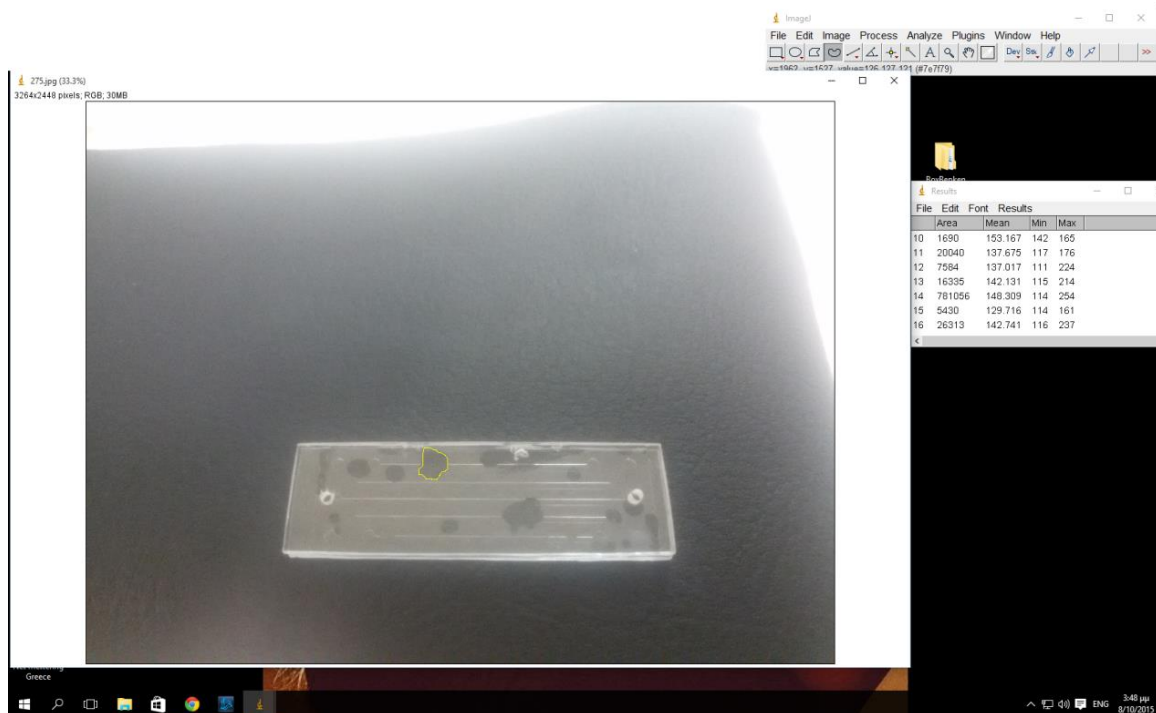
Fig. 3—Geometric representation of experimental designs. (a) Box-Behnken with center point replication and (b) Face centered cube with center point replication.

Εικόνα 55 γεωμετρική αναπαράσταση του στατιστικού σχεδιασμού

Η κωδικοποίηση των παραγόντων των επιπέδων είναι -1, 0 και +1 και ορίζουν το χαμηλότερο, το μεσαίο και το υψηλότερο επίπεδο των μεταβλητών, αντίστοιχα.

#### 4.2.2 Εύρεση του ποσοστού συγκόλλησης με χρήση του προγράμματος ImageJ

Η ποιότητα της συγκόλλησης μελετάται με τη χρήση του λογισμικού ImageJ. Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα καταγράφεται ποσοστιαία το μέγεθος της συγκόλλησης στο δείγμα. Τα σημεία που έχει επιτευχθεί συγκόλληση φαίνονται σαν κηλίδες στο τεμάχιο με πιο σκούρο χρώμα. Προσεκτικά διαγράφουμε το περίγραμμα της κηλίδας και το πρόγραμμα καταγράφει το εμβαδόν της (εικόνα 56). Προσθέτουμε τα επιμέρους εμβαδά και τα διαιρούμε με το συνολικό εμβαδό του δοκιμίου για να εξάγουμε το ποσοστό της συγκόλλησης. Για να βρούμε το συνολικό εμβαδό, προσεκτικά διαγράφουμε το περίγραμμα της επιφάνειας και το πρόγραμμα μας δίνει το αποτέλεσμα.



Εικόνα 56 πρόγραμμα ImageJ και εμβαδό περιοχής

Στη συνέχεια, σε όσες περιπτώσεις αναφέρεται ότι έχουμε υψηλά ποσοστά συγκόλλησης, έχουν εξαχθεί τα αποτελέσματα από το παραπάνω πρόγραμμα και αφορούν ποσοστά πάνω από 70% της επιφάνειας.

## 5. Διάφορες μέθοδοι για βελτίωση της συγκόλλησης.

Τα πρώτα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν δεν είχαν το αναμενόμενο αποτέλεσμα στην ποιότητα της συγκόλλησης, και δεν μπορούσαμε να ανιχνεύσουμε την περιοχή λειτουργίας. Γι' αυτό το λόγο, δοκιμάστηκαν και άλλοι μέθοδοι για τη βελτίωση της συγκόλλησης, όπως αυτοί παρατίθενται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5. Οι μέθοδοι ήταν:

1. Συγκόλληση με προθέρμανση
2. Συγκόλληση με μικρο-ενεργειακούς κατευθυντές, με την πρόσδοση τραχύτητας σε μία επιφάνεια
3. Χρήση διαλύτη
4. Χρήση ελαστικού υποστρώματος βελτίωσης της επιπεδότητας και της κατανομής ενέργειας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

# Κεφάλαιο 5

---

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται και σχολιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Αναφέρονται τα προβλήματα της συγκόλλησης με υπερήχους, οι διάφοροι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν και η βελτίωση της ποιότητας της συγκόλλησης.

## **5.1. Προκαταρκτικά πειράματα εύρεσης περιοχής λειτουργίας**

Τα πρώτα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε μικρορευστονική πολυμερική διάταξη υλικού PMMA, είχαν διάφορες τιμές παραμέτρων, ώστε να ανευρεθεί η περιοχή λειτουργίας μιας ποιοτικής συγκόλλησης και να εξεταστούν τα τυχόν προβλήματα που θα προκύψουν.

Αρχικά, η πρώτη σειρά πειραμάτων περιελάμβανε μεμονωμένα πλάτη ταλάντωσης (amplitude): 3.5 , 4 και 4.5  $\mu\text{m}$  και δύναμη συγκόλλησης (welding force) : 100 , 175 και 250 Newton. Η λογική σε αυτή τη πρώτη σειρά ήταν να χρησιμοποιήσουμε τις σημαντικότερες παραμέτρους της συγκόλλησης, έτσι ώστε να μην ξεπερνούν το μέσο της δυνατότητας ρύθμισης των παραμέτρων που μας επιτρέπει η μηχανή συγκόλλησης (Κεφάλαιο 3).

Στη 2η σειρά πειραμάτων κρατήθηκε σταθερό το πλάτος ταλάντωσης στα 3  $\mu\text{m}$  και εφαρμόστηκαν διάφορες δυνάμεις συγκόλλησης (από 150 έως 500 Newton), αλλά και διάφορες δυνάμεις συγκράτησης μετά την κατεργασία (Hold Force) από 250 έως 500 Newton. Οι πρώτες ενδείξεις είναι ότι δεν έχουμε μια ομοιόμορφη συγκόλληση μεταξύ των τεμαχίων και γίνεται μια πρώτη εμφάνιση προβλημάτων της συγκόλλησης που θα αναλυθούν παρακάτω.

Με παρόμοια λογική με προηγουμένως, για να εξεταστεί και η επίδραση του πλάτους ταλάντωσης, τα επόμενα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με πλάτη ταλάντωσης με μεγάλο εύρος, από 2.8 έως 6.2  $\mu\text{m}$ , ενώ η δύναμη συγκόλλησης κυμαινόταν από τις τιμές 100 έως 300 Netwon. Οι αντίστοιχες ενέργειες ήταν από 122 έως 800 Joule, με χρόνους συγκόλλησης μέχρι και 14 δευτερόλεπτα. Τέλος, δοκιμάσαμε σε μικρότερο εύρος πλάτους ταλάντωσης, από 3.6 έως 5  $\mu\text{m}$ , αλλά χρησιμοποιήσαμε μεγαλύτερες δυνάμεις συγκόλλησης (250 έως 500 Netwon) κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.

### **5.1.1. Προβλήματα της συγκόλλησης με υπερήχους χωρίς ενεργειακό κατευθυντή**

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναλύσουμε τα προβλήματα που εμφανίζουν άσχημα αποτελέσματα συγκόλλησης. Τα άσχημα αποτελέσματα αναφέρονται σε μια μη ποιοτική συγκόλληση, αφού είτε τα δοκίμια παρουσιάζουν «λιωσίματα» σε κάποια σημεία της επιφάνειάς τους, είτε είναι ανοιχτά, είτε δεν έχουν κολλήσει καθόλου. Ανοιχτά δοκίμια ονομάζουμε αυτά που έχουν έντονο το φαινόμενο της διαρροής, δηλαδή έχουν κολλήσει σε ορισμένα μόνο σημεία με αποτέλεσμα παρατηρείται διαρροή μετά από δοκιμή με χρωστική. Τα δοκίμια που αναφέρουμε ως αυτά που δεν έχουν κολλήσει καθόλου, δεν απαιτείται παραμικρή δύναμη ώστε να ξεκολλήσουν μεταξύ τους. Σε κάποια άλλα πειράματα είχαμε βουλωμένες τρύπες, όπου καθιστούσε αδύνατη την είσοδο της χρωστικής ουσίας, καθώς και τοπικό λιώσιμο σε κάποια

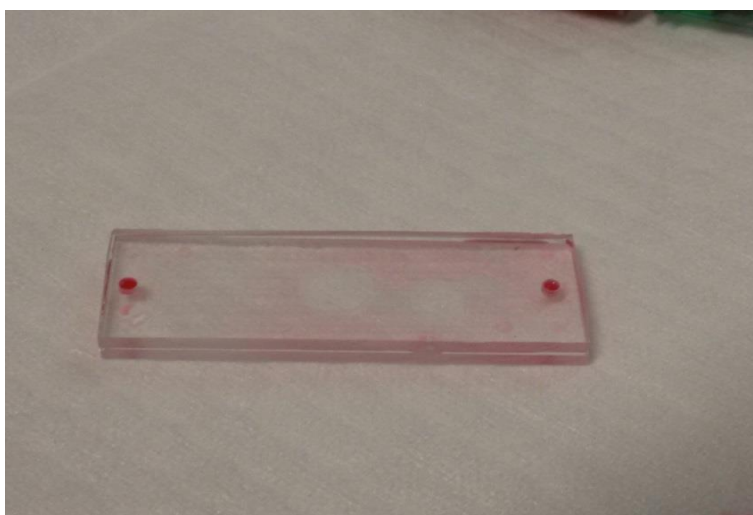
σημεία, λόγω τη συσσώρευση της ενέργειας και τη ροή λιωμένου πολυμερές μέσα στη διεπιφάνεια.

Στη παρακάτω εικόνα 57 φαίνεται η υπερβολική απόδοση ενέργειας σε υψηλό πλάτος ταλάντωσης με αποτέλεσμα την καταστροφή της επιφάνειας του πολυμερούς, που εμφανίζεται με έντονο λευκό χρώμα, σαν «κάψιμο». Το συγκεκριμένο «κάψιμο», αποτελεί καταστροφή του υλικού τόσο δομική/ μορφολογική (π.χ. δημιουργία τραχύτητας, φυσαλίδων κλπ), όσο και χημική.



**Εικόνα 57 υπερβολική ροή υλικού μέσα στη διεπιφάνεια (κάψιμο)**

Στην παρακάτω εικόνα 58 φαίνεται πως η κόκκινη χρωστική ουσία εμφανίζεται στη μεγαλύτερη έκταση του συγκολλημένου δοκιμίου εκτός από τις περιοχές όπου έχουμε τοπικές συγκολλήσεις, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό φαινόμενο διαρροής. Οι τοπικές συγκολλήσεις φαίνονται ως λευκές κηλίδες ανάμεσα στην κοκκινισμένη επιφάνεια. Έχουν μεγάλη έκταση και η ροή υλικού έχει εισβάλλει μέσα στη μικρορευστονική διάταξη, κλασσικό παράδειγμα βουλωμένου καναλιού.

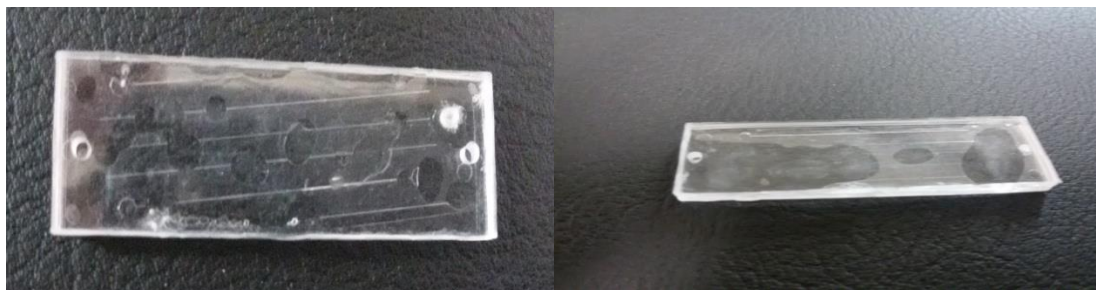


**Εικόνα 58 Πείραμα 186 με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 3  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 150 N, Hold force 250 N, Touch force 300 N, Trigger force 100 N και ενέργεια συγκόλλησης 400 Joule**

Στην εικόνα 59 παρατηρούμε ότι και στα δύο πειράματα έχουμε τοπικές συγκολλήσεις, που εμφανίζονται με τη μορφή πιο σκουρόχρωμων κηλίδων. Επίσης και στις δύο περιπτώσεις έχουμε μια μικρή συγκόλληση στα άκρα των δοκιμίων. Στο πείραμα 246 όπου και εφαρμόστηκαν οι υπέρηχοι για περισσότερο χρόνο, έχουμε και καψίματα. Στο πείραμα 249 που είχε τις εξής συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4.2  $\mu\text{m}$ , δύναμη ταλάντωσης 250 N, δύναμη συγκράτησης 600 N και χρόνο συγκόλλησης 12



δευτερόλεπτα, φαίνεται να έχουμε μεγαλύτερο ποσοστό κόλλησης, αλλά έλιωσαν τα κανάλια και επίσης βούλωσε η μία από τις δύο τρύπες εισαγωγής του ρευστού (εικόνα 58). Επίσης, πάλι παρατηρείται μια μικρή συγκόλληση στα άκρα. Touch και Trigger force ήταν 150 N, ενώ το Hold force έχει προγραμματιστεί στα 600 N για όλα τα παρακάτω πειράματα.



**Εικόνα 59 Πειράματα 246 και 249**

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της συγκόλλησης στα άκρα είναι το πείραμα 255 με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$ , δύναμη ταλάντωσης 150 N, δύναμη συγκράτησης 150 N, ενέργεια 200 J και χρόνο συγκόλλησης 2.307 δευτερόλεπτα. Εκτός από δύο σημειακές συγκολλήσεις κοντά στα άκρα, η ενδιάμεση επιφάνεια δεν έχει κολλήσει καθόλου.



**Εικόνα 6 Πείραμα 255**

Τέλος, για τη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων, παρατίθεται το πείραμα 260 με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, δύναμη συγκράτησης 600 N, ενέργεια 350 J και χρόνο 5.89 δευτερόλεπτα. Σε καμία περίπτωση δεν έχουμε ομοιόμορφη συγκόλληση, έχουμε τοπικές συγκολλήσεις κυρίως στα άκρα της διάταξης και περαιτέρω λιώσιμο στα σημεία αυτά. Το συγκεκριμένο δοκίμιο ανοίχτηκε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 71 και παρατηρούμε τα λιώσιμα στις περιοχές συγκόλλησης, καθώς και το λιώσιμο του καναλιού σ' αυτές τις περιοχές.



**Εικόνα 60 Πείραμα 260**

Μια τελευταία περίπτωση προβλήματος που δεν ανήκει όμως στη παραπάνω κατηγορία ποιοτικών προβλημάτων αποτελεί το σφάλμα μηχανής. Στο εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής υπερήχων, αναφέρεται ότι υπάρχει περίπτωση εμφάνιση σφάλματος. Σ' όλες όμως τις σειρές πειραμάτων, παρουσιάστηκε μονάχα ένα σφάλμα, το «Frequency below Limit». Οι παρακάτω εικόνες μας δείχνουν τα αποτελέσματα για συνθήκες: 3.8 μm πλάτος ταλάντωσης, δύναμη συγκόλλησης 300 και 200 N αντίστοιχα, δύναμη συγκράτησης 600 N και χρόνους συγκόλλησης 8.5 και 2.29 δευτερόλεπτα αντίστοιχα. Και οι δύο χρόνοι ήταν μικρότεροι από τα 10 δευτερόλεπτα που είχε προγραμματιστεί η συγκόλληση γιατί το σύστημα έριξε τη συχνότητα ταλάντωσης κάτω από τα επιτρεπτά επίπεδα (ελάχιστο κάτω όριο 34,500 KHz). Όταν συμβαίνει το παραπάνω, σταματάει η συγκόλληση, το κέρασ συγκόλλησης επιστρέφει στην αρχική του θέση και στην οθόνη εμφανίζεται το εξής μήνυμα: «Frequency below Limit». Το παραπάνω έχει παρατηρηθεί ότι συμβαίνει όταν το κέρασ δεν κάνει καλή επαφή με την επιφάνεια του πάνω δοκιμίου, ή όταν το πλάτος ταλάντωσης είναι μεγάλο (πάνω από 6-7 μm) και ταυτόχρονα η δύναμη συγκόλλησης είναι μικρή (κάτω από 300 N).



**Εικόνα 4 Πείραμα 246 και πείραμα 250**

Για να εξεταστούν τα παραπάνω προβλήματα, αποφασίστηκε να μην γίνουν κανάλια σε πολλές από τις επόμενες σειρές πειραμάτων, παρά μόνο εφόσον έχουμε προσδιορίσει τις συνθήκες συγκόλλησης για το κάθε υλικό, ώστε να εξοικονομήσουμε χρόνο. Θυμίζουμε ότι ο χρόνος που απαιτείται για να αποτυπώσουμε ένα κανάλι είναι περίπου 25 με 30 λεπτά.



### 5.1.2 Αποτελέσματα στατιστικού σχεδιασμού Box-Benken

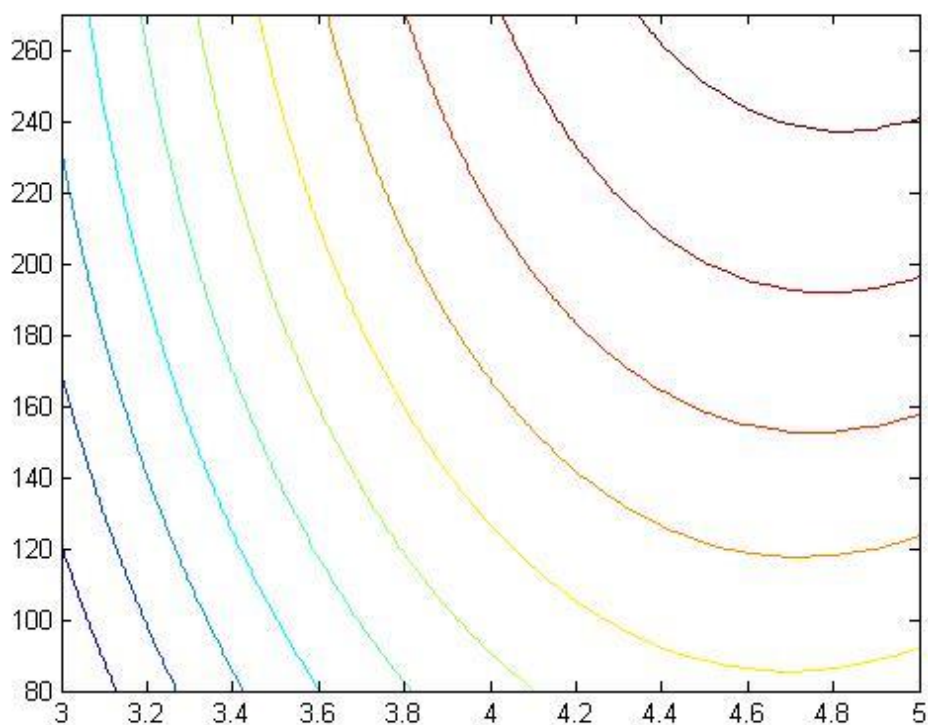
Σ' αυτή την εργασία ο στατιστικός σχεδιασμός Box-Benken (Box-Benken Design – BBD) χρησιμοποιείται για τη εύρεση της σημαντικότερης μεταβλητής που επηρεάζει τη συγκόλληση με υπερήχους. Οι μεταβλητές που εξετάζονται είναι το πλάτος ταλάντωσης, η δύναμη συγκόλλησης και η ενέργεια συγκόλλησης. Η παρακάτω εξίσωση αντιπροσωπεύει τη καμπύλη που επαληθεύσουν τα πειραματικά δεδομένα, με αγνώστους  $x_1$  και  $x_2$  τις εξεταζόμενες παραμέτρους και  $Y$  την απόκριση του συστήματος.

$$Y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_{12} * x_1 * x_2 + b_{11} * x_1^2 + b_{22} * x_2^2 \quad (22)$$

Ο πρώτος στατιστικός σχεδιασμός Box-Benken με εξαρτημένες μεταβλητές το πλάτος ταλάντωσης για τις τιμές: 3.5 , 4 και 4.5  $\mu\text{m}$  , και για δύναμη συγκόλλησης με τιμές: 100, 175 και 250 Netwon, και με ανεξάρτητη μεταβλητή την απόκριση  $Y$ , ως το αποτέλεσμα του κάθε πειράματος: ισχύς (ενέργεια ανά μονάδα του χρόνου). Στον άξονα της τετμημένης (X-axis) εμφανίζεται το πλάτος ταλάντωσης και στον άξονα της τεταγμένης (Y-axis) η δύναμη συγκόλλησης. Οι ισουψείς καμπύλες είναι με βάση την ισχύ (ενέργεια συγκόλλησης ανά δευτερόλεπτο) που έχει λάβει το εκάστοτε δείγμα προς συγκόλληση. Ο παρακάτω πίνακας αναφέρει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικά.

**Πίνακας 5.1**

Trial Number	Amplitude (X1) ( $\mu\text{m}$ )	Welding force (X2) (Newton)	Power (Y) (Joule/sec)
1	3.5	100	16.69
2	3.5	175	40.68
3	3.5	250	49.70
4	4	100	41.96
5	4	175	65.84
6	4	250	69.54
7	4.5	100	57.39
8	4.5	175	62.28
9	4.5	250	97.24
10	4	175	58.93
11	4	175	67.15
12	4	175	54.26



**Εικόνα 56** άξονας X1: πλάτος ταλάντωσης (X-axis) και άξονας X2: δύναμη συγκόλλησης (Y-axis), με ισουψείς (Y) την αποδιδόμενη ισχύ (ενέργεια ανά δευτερόλεπτο) στο δοκίμιο (Z-axis)

Θα πρέπει να αναλυθεί πόσο καλά επαληθεύουν τα δεδομένα τη καμπύλη απόκρισης της αποδιδόμενης ισχύος. Συγκεκριμένα για το πλάτος ταλάντωσης έχουμε:

Number of observations: 12, Error degrees of freedom: 9

Root Mean Squared Error: 15.5

R-squared: 0.483, Adjusted R-Squared 0.426

F-statistic vs. constant model: 8.42, p-value = 0.0175

$R^2 = 0.4834$

Ενώ για τη δύναμη συγκόλλησης έχουμε:

Number of observations: 12, Error degrees of freedom: 9

Root Mean Squared Error: 16.6

R-squared: 0.404, Adjusted R-Squared 0.338

F-statistic vs. constant model: 6.1, p-value = 0.0355

$R^2 = 0.4041$

Το μοντέλο εξηγεί ότι έχουμε περίπου 50 % (0.4883 και 0.4041) διακύμανση στη μεταβλητή απόκρισης. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν έχουμε αρκετούς βαθμούς ελευθερίας. Όταν ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  (Coefficient of determination) παίρνει την τιμή 1, δείχνει ότι η γραμμή παλινδρόμησης ταιριάζει απόλυτα με τα δεδομένα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα λέγαμε ότι η αποδιδόμενη ισχύς μεταβάλλεται περισσότερο για πλάτος ταλάντωσης σε χαμηλή δύναμη συγκόλλησης από ότι σε υψηλή δύναμη συγκόλλησης, το οποίο υποδεικνύει μια ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ του πλάτους ταλάντωσης και της δύναμης συγκόλλησης. Ο συντελεστής όμως 0.50 δεν μας αφήνει να είμαστε σίγουροι γι' αυτό. Επιπρόσθετα, το πρώτο Box-Benken τίθεται υπό αμφισβήτηση λόγω του μάστερ εγχάραξης.

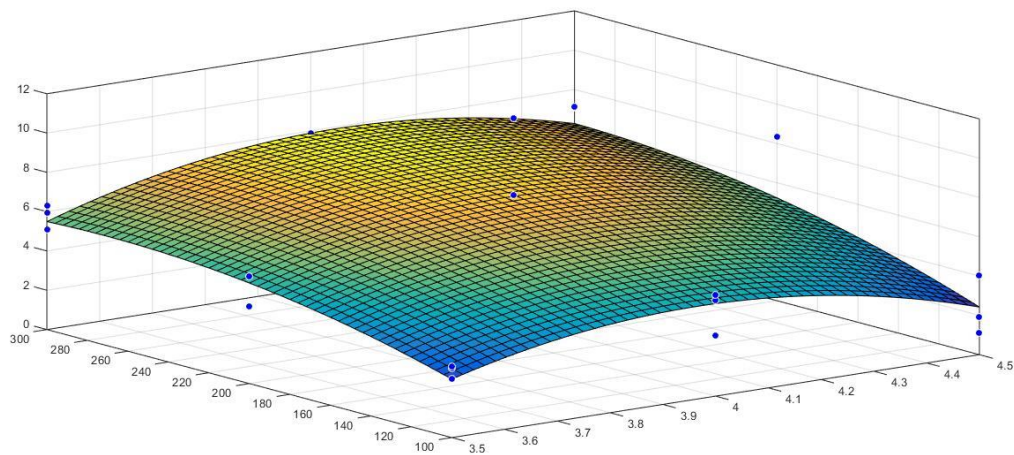
Έτσι καθίσταται απαραίτητος ο καθαρισμός του μάστερ και επανάληψη του στατιστικού σχεδιασμού Box-Benken.

Από τα πρώτα πειράματα, είναι εμφανές ότι απαιτείται διαρκώς ένας καλός καθαρισμός του μάστερ της εγχάραξης καναλιών, για να έχουμε καλή επιφάνεια στα δοκίμια και για να αποτυπώνεται ακριβώς το κανάλι, και να γίνεται ένας ποιοτικός έλεγχος στα δοκίμια ως προς την επιπεδότητα της επιφάνειάς τους.

Επαναλαμβάνουμε το στατιστικό σχεδιασμό Box-Benken με τρεις εξαρτημένες μεταβλητές: το πλάτος ταλάντωσης, τη δύναμη συγκόλλησης και την αποδιδόμενη ενέργεια στο δοκίμιο. Οι τιμές των παραμέτρων είναι: για το πλάτος ταλάντωσης 3.5, 4 και 4.5 μm, για τη δύναμη συγκόλλησης 200, 250 και 350 Netwon, και για την ενέργεια ενέργεια συγκόλλησης 100, 200 και 300 Joule. Ως απόκριση Y λαμβάνουμε την ανεξάρτητη μεταβλητή το χρόνο συγκόλλησης κάθε πειράματος. Η εξίσωση που θα πρέπει να επαληθευτεί έχει τέσσερις επιπλέον όρους σε σχέση με την προηγούμενη και έχει τη μορφή:

$$Y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3 + b_{12} * x_1 * x_2 + b_{13} * x_1 * x_3 + b_{23} * x_2 * x_3 + b_{11} * x_1^2 + b_{22} * x_2^2 + b_{33} * x_3^2 \quad (23)$$

Έτσι, στην παρακάτω εικόνα αναπαριστάται η καμπύλη που επαληθεύει τα σημεία κατά το δυνατόν, με τα σημεία να αναπαρίστανται ως μπλε κουκίδες, πάνω, κάτω και μέσα στην καμπύλη.



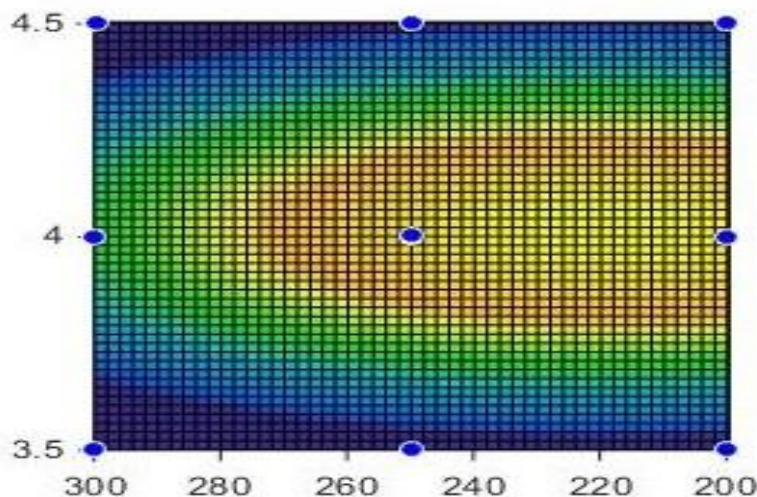
**Εικόνα 61 Τρισδιάστατη απεικόνιση της καμπύλης επαλήθευσης των πειραματικών δεδομένων**

Με το συγκεκριμένο στατιστικό σχεδιασμό, θέλουμε να εξετάσουμε πόσο επηρεάζεται ο χρόνος συγκόλλησης από το πλάτος ταλάντωσης, τη δύναμη συγκόλλησης και την ενέργεια.

Μελετώντας λοιπόν ξεχωριστά ανά δύο τις μεταβλητές που επηρεάζουν το χρόνο συγκόλλησης λαμβάνουμε τα εξής διαγράμματα:

### 1. Πλάτος ταλάντωσης με δύναμη συγκόλλησης

Στον οριζόντιο άξονα (X-axis) εμφανίζεται η δύναμη συγκόλλησης, ενώ στο κάθετο άξονα (Y-axis) εμφανίζεται το πλάτος ταλάντωσης. Οι ισουυείς καμπύλες είναι σχεδιασμένες με βάση το χρόνο συγκόλλησης. Το έντονο ανοιχτό χρώμα αφορά τους υψηλούς χρόνους συγκόλλησης, ενώ το σκούρο μπλε τους χαμηλούς.



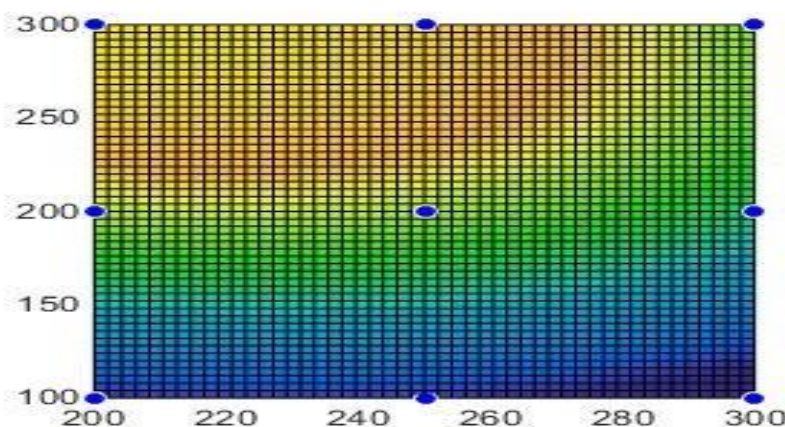
Εικόνα 62 Οριζόντιος άξονας δύναμη συγκόλλησης (X-axis), Κάθετος άξονας πλάτος ταλάντωσης (Y-axis), ισουψείς χρόνος συγκόλλησης (Z-axis)

sse: 107.5112, rsquare: 0.2076, dfe: 21, adjrsquare: 0.0189, rmse: 2.2626  
 $R^2 = 0.2076$

Από τη παραπάνω αναπαράσταση συμπεραίνουμε ότι για χαμηλή δύναμη συγκόλλησης (200 N), το πλάτος ταλάντωσης επηρεάζει περισσότερο το χρόνο συγκόλλησης από ότι η δύναμη συγκόλλησης, ενώ για μεγαλύτερες δυνάμεις (300 N), υπάρχει μια ισχυρή αλληλεπίδραση του πλάτους ταλάντωσης με τη δύναμη συγκόλλησης. Δυστυχώς, εξαιτίας του πολύ χαμηλού συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για το παραπάνω συμπέρασμα.

## 2. Πλάτος ταλάντωσης με ενέργεια συγκόλλησης

Στον οριζόντιο άξονα (X-axis) εμφανίζεται η δύναμη συγκόλλησης, ενώ στο κάθετο άξονα (Y-axis) εμφανίζεται η ενέργεια ταλάντωσης. Οι ισουψείς καμπύλες είναι σχεδιασμένες με βάση το χρόνο συγκόλλησης. Το έντονο ανοιχτό χρώμα αφορά τους υψηλούς χρόνους συγκόλλησης, ενώ το σκούρο μπλε τους χαμηλούς.



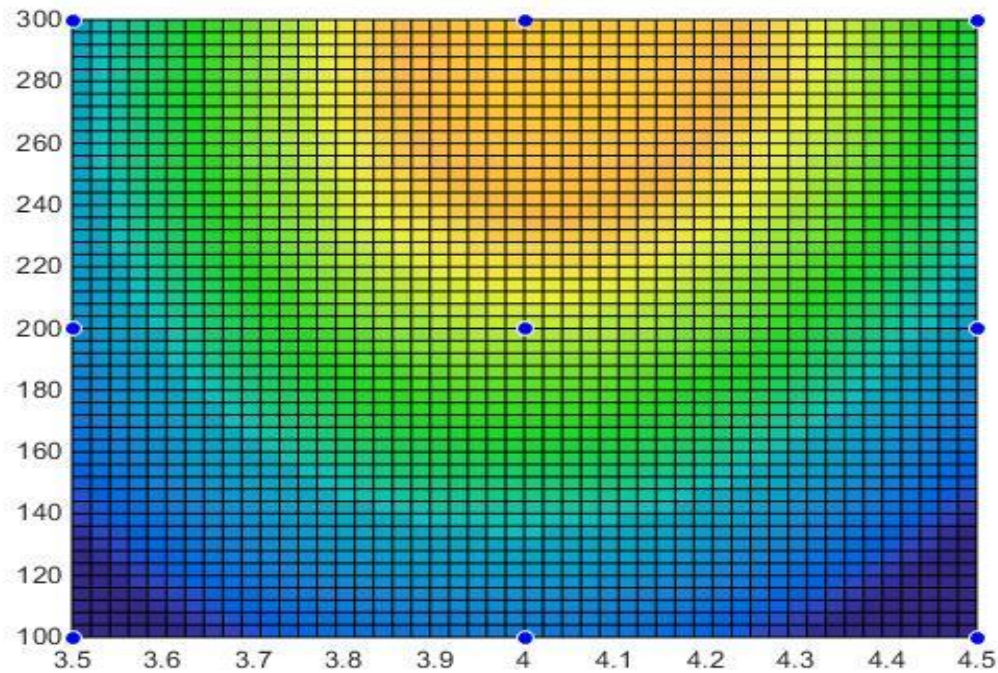
Εικόνα 63 Οριζόντιος άξονας δύναμη συγκόλλησης (X-axis), Κάθετος άξονας ενέργεια συγκόλλησης (Y-axis), ισουψείς χρόνος συγκόλλησης (Z-axis)



sse: 59.8665, rsquare: 0.5588, dfe: 21, adjrsquare: 0.4537, rmse: 1.6884  
 $R^2 = 0.5588$

### 3. Δύναμη συγκόλλησης με ενέργεια συγκόλλησης

Στον οριζόντιο άξονα (X-axis) εμφανίζεται το πλάτος ταλάντωσης, ενώ στο κάθετο άξονα (Y-axis) εμφανίζεται η ενέργεια συγκόλλησης. Οι ισουψείς καμπύλες είναι σχεδιασμένες με βάση το χρόνο συγκόλλησης. Το έντονο ανοιχτό χρώμα αφορά τους υψηλούς χρόνους συγκόλλησης, ενώ το σκούρο μπλε τους χαμηλούς.



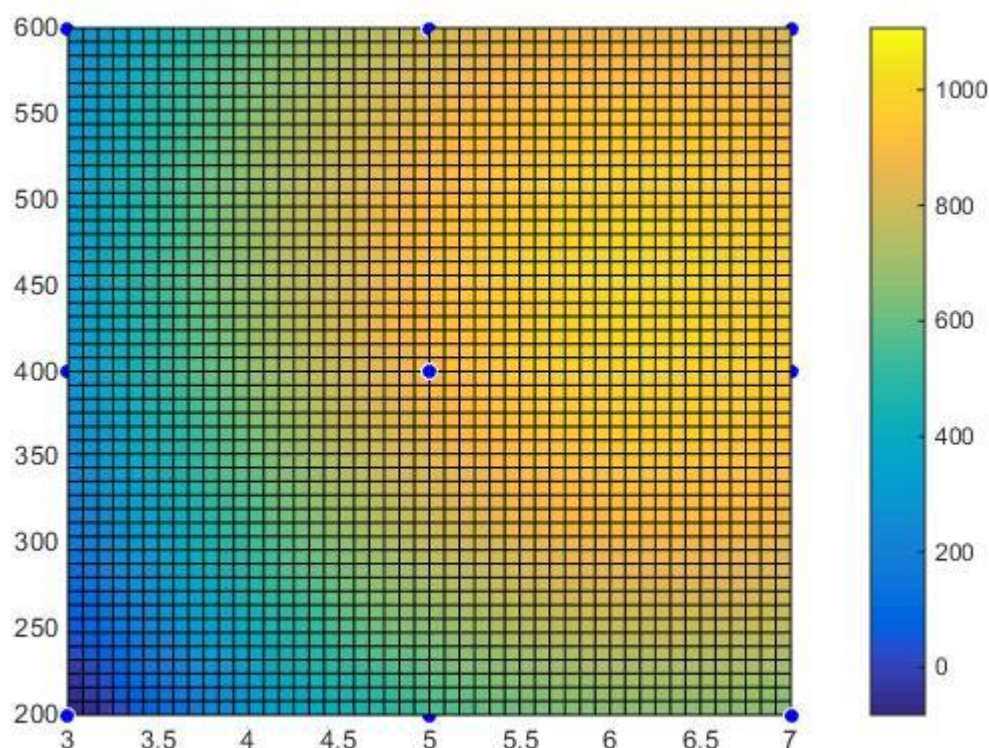
Εικόνα 64 Οριζόντιος άξονας πλάτος ταλάντωσης (X-axis), Κάθετος άξονας ενέργεια συγκόλλησης (Y-axis), ισουψείς χρόνος συγκόλλησης (Z-axis)

sse: 81.3446, rsquare: 0.4005, dfe: 21, adjrsquare: 0.2577, rmse: 1.9681  
 $R^2 = 0.4005$

Από τις εικόνες 2 και 3 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο χρόνος συγκόλλησης αυξάνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια συγκόλλησης. Επίσης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο αυξάνουμε τη δύναμη ταλάντωσης, τόσο μειώνουμε το χρόνο συγκόλλησης. Τέλος, φαίνεται να υπάρχει μια ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ ενέργειας συγκόλλησης και πλάτους ταλάντωσης, όσον αφορά το χρόνο συγκόλλησης. Βέβαια, θα ήμασταν αρκετά πιο σίγουροι για τα παραπάνω συμπεράσματα, αν λαμβάναμε μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ . Για να εξετάσουμε ποια τελικά είναι η μεταβλητή που διαδραματίζει το μεγαλύτερο ρόλο στο ποσό της ενέργειας που λαμβάνει το δείγμα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, πραγματοποιείται στατιστικός σχεδιασμός Box-Benken με τις εξής συνθήκες:

Amplitude 3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$   
Welding force 200, 400 και 600 Newton

Συνολικός χρόνος συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα για όλα τα δείγματα. Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό έχω ανεξάρτητες μεταβλητές το πλάτος ταλάντωσης και τη δύναμη συγκόλλησης ενώ η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η ενέργεια συγκόλλησης.



**Εικόνα 65** X1 πλάτος ταλάντωσης (X-axis), X2 δύναμη συγκόλλησης (Y-axis), υσουψείς καμπύλες ενέργεια συγκόλλησης (Z-axis)

sse: 5.8213e+05 , rsquare: 0.6452, dfe: 4 , adjrsquare: 0.2017, rmse: 381.4861,  $R^2 = 0.6452$

Η παραπάνω αναπαράσταση μας θέτει σαφές πως και οι δύο μεταβλητές (πλάτος ταλάντωσης και δύναμη συγκόλλησης) επηρεάζουν εξίσου σημαντικά την ενέργεια συγκόλλησης. Παρατηρούμε επίσης ότι και οι δύο μεταβλητές έχουν μια σχέση αναλογίας με την ενέργεια συγκόλλησης, δηλαδή όσο αυξάνεται κάποια από τις δύο μεταβλητές, ανάλογα αυξάνεται και ενέργεια συγκόλλησης.

### 5.1.3 Ο ρόλος της επιπεδότητας

Τα πειράματα που αναλύθηκαν μέχρι τώρα, υποδηλώνουν ότι ο ρόλος της επιπεδότητας της επιφάνειας, διαδραματίζει τεράστιο ρόλο στη συγκόλληση με υπερήχους. Τα τεμάχια που δεν έχουν υποστεί κάποια επεξεργασία, έχουν παραμορφώσεις από την κοπή, που εμφανίζονται με μορφή λοφίσκων. Αυτοί οι συγκεκριμένοι λοφίσκοι λειτουργούν ως ενεργειακοί κατευθυντές και απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας με αποτέλεσμα να έχουν κυρίως κόλληση σε αυτά τα σημεία. Ο σχεδιασμός Box-Benken δεν συνεχίστηκε γιατί έπρεπε να λυθεί πρώτα το πρόβλημα της επιπεδότητας.

Αναλυτικότερα, παρατηρήθηκε συγκόλληση στα άκρα των πλευρών ή κόλληση μόνο σε κάποια σημεία (ανομοιομορφία δείγματος). Για να αποφευχθεί το συγκεκριμένο

πρόβλημα όλα τα τεμάχια τοποθετούνται στη θερμική πρέσσα (κεφάλαιο 4.1), όπου και αποκτούν μια επίπεδη επιφάνεια.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει καλή επιπεδότητα ή καλή ευθυγράμμιση με το κέρασ συγκόλλησης (horn), αφού σε ορισμένα σημεία υπήρξε συγκόλληση και λιώσιμο, ενώ σε άλλα δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο. Πέρα λοιπόν από την επιπεδότητα των δειγμάτων, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής συμπεράσματα:

1. Δεν υπάρχει επαναληψιμότητα στο χρόνο συγκόλλησης για μια συγκεκριμένη ενέργεια συγκόλλησης, στις ίδιες συνθήκες, αν δεν υπάρχει καλή ευθυγράμμιση του κέρατος με το δοκίμιο ή δεν είναι ομοιόμορφη η επιφάνεια του δείγματος. Γι' αυτό, θα πρέπει να ελέγξουμε την επιπεδότητα της βάσης. Η βάση θα πρέπει να είναι ευθυγραμμίζεται με την ίδια δύναμη που θα προγραμματίσουμε ως δύναμη συγκόλλησης. Η βάση μπορεί να ευθυγραμμιστεί όταν το κέρασ συγκόλλησης 'πατάει' το δοκίμιο, και στη συνέχεια να πατήσουν οι κοχλίες-οδηγοί και να βιδωθούν οι κοχλίες συγκράτησης της βάσης.
2. Θα πρέπει να είμαστε πάρα πολύ προσεκτικοί κατά τη διάρκεια που τοποθετούμε τα δοκίμια και τα σφίγγουμε στη βάση συγκράτησης, καθώς μπορεί να επηρεαστεί η ευθυγράμμιση του κέρατος με το δοκίμιο.
3. Θα πρέπει να εξετάζεται ο προσανατολισμός πριν και μετά την ευθυγράμμιση της βάσης. Αν υπάρχει κάποια κλίση στη βάση συγκράτησης, τότε θα έχουμε μεγαλύτερο ποσοστό κόλλησης μόνο από τη μια μεριά.
4. Θα πρέπει να καθαριστεί το κέρασ συγκόλλησης (horn) πρώτα με MIBK ή ακετόνη (acetone). Τυχόν πολυμερές υλικό που έχει κολλήσει πάνω στο κέρασ συγκόλλησης είναι πιθανόν να ευθύνεται για την ανομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Στη συγκόλληση με υπερήχους χωρίς ενεργειακό κατευθυντή, η επιπεδότητα των δειγμάτων και η σωστή ευθυγράμμιση με τη μηχανή συγκόλλησης είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες για την ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας, ώστε να έχουμε μια ποιοτική συγκόλληση.

## **5.2 Πειράματα συγκόλλησης χωρίς τη χρήση ελαστικού υποστρώματος βελτίωσης της επιπεδότητας για το PMMA με χοντρό καπάκι**

Τα παραπάνω αρχικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν χωρίς τη χρήση ελαστικού υποστρώματος βελτίωσης της επιπεδότητας, όπως και τα επόμενα που θα αναφερθούν. Από τα πειράματα μέχρι στιγμής, παρατηρήθηκε ότι τα μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης (πάνω από 4  $\mu\text{m}$ ) και οι μεγάλες δυνάμεις συγκόλλησης (πάνω από 200 N), δίνουν καλύτερα ποσοστά κόλλησης των επιφανειών. Επίσης, όταν στα δοκίμια προσδίδονται μεγάλες ενέργειες, σε μεγάλο χρόνο (10 δευτερόλεπτα), φαίνεται να έχουμε αρκετά μεγαλύτερα ποσοστά κόλλησης, όπως φαίνεται στις



παρακάτω εικόνες. Το Trigger και το Touch force ήταν 100 N, ενώ το Hold Force ήταν 400 N για 5 δευτερόλεπτα για όλα τα παρακάτω πειράματα. Οι λοιπές συνθήκες αναγράφονται κάτω από τα πειράματα.



Εικόνα 66 Πειράματα 311 & 312 amplitude: 5  $\mu\text{m}$ , welding force: 400 & 600 N, Energy: 230 & 656 Joule



Εικόνα 67 Πειράματα 313, 314 & 315 με amplitude: 7, Energy: 800 Joule και αντίστοιχα welding force: 200, 400 & 600 N

Το καλύτερο βέβαια από τη συγκεκριμένη σειρά είναι το πείραμα 316 με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 400 N, Ενέργεια 1465 Joule και χρόνο συγκόλλησης 15.365 δευτερόλεπτα. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα έχουμε από τα μεγαλύτερα ποσοστά κόλλησης μέχρι τώρα. Το συγκεκριμένο πείραμα είναι αντιπροσωπευτικό για τη σχέση ποσοστού συγκόλλησης με την ομαλή διασπορά της ενέργειας. Στο μεγαλύτερο χρόνο συγκόλλησης στα πειράματα μέχρι τώρα, δηλαδή 15.365 δευτερόλεπτα, αποδόθηκαν συνολικά 1465 Joule, που αποτελεί και την μεγαλύτερη ενέργεια μέχρι στιγμής.



Εικόνα 68 Πείραμα 316 amplitude 5  $\mu\text{m}$ , welding force 400 N, Energy 1465 Joule



Τα παραπάνω πειράματα έχουν κοπεί με μηχανή laser και δεν έχουν υποστεί καμία άλλη περαιτέρω επεξεργασία. Γι' αυτό, παίρνουμε αποτελέσματα συγκόλλησης αυτής της μορφής.

Τα συμπεράσματα που πηγάζουν από τα παραπάνω είναι τα εξής:

- Το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από αυτή τη σειρά πειραμάτων είναι δεν επηρεάζει μόνο η θερμοκρασία, αλλά και ο χρόνος που διατηρείται η συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας.
- Δεν πρέπει να γίνεται γρήγορα η συγκόλληση. Όσο πιο ομαλά αποδίδεται η ενέργεια τόσο πιο ομοιόμορφη συγκόλληση γίνεται.
- Παρατηρήθηκε ότι για πλάτος ταλάντωσης 7  $\mu\text{m}$  και ταυτόχρονα για δύναμη συγκόλλησης 600 Newton, τα δείγματα υπόκεινται σε θερμική καταστροφή ('καίγονται') ενώ δεν έχουμε πλήρη συγκόλληση σ' όλη την επιφάνεια. Συνεπώς, δεν χρειάζεται η μέγιστη δύναμη συγκόλλησης (600 Newtons). Απαιτείται μικρότερη δύναμη συγκόλλησης με εύρος τιμών από 100 έως 300 Newtons. Επίσης, δεν χρειάζεται μεγάλο πλάτος ταλάντωσης (μεγαλύτερο των 7  $\mu\text{m}$ ), αλλά ούτε πολύ μικρό (μικρότερο των 2  $\mu\text{m}$ ).

Επειδή στα συγκεκριμένα πειράματα για ενέργεια πάνω από 1000 Joule και σε μεγάλους χρόνους συγκόλλησης, είχαμε αρκετά μεγάλο ποσοστό κόλλησης, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν πειράματα με ενέργεια συγκόλλησης 1000 Joule ή και μεγαλύτερη και για μεγάλους χρόνους συγκόλλησης. Τα συγκεκριμένα πειράματα, είχαν κοπεί με κορδέλα, και αφού εξομαλύνθηκαν οι ακμές με γυαλόχαρτο, τοποθετήθηκαν στη θερμική πρέσσα για επιπεδοποίηση. Ενδεικτικά, στο επόμενο πείραμα 1632 που παρουσιάζεται είχαμε τις εξής συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 5.0  $\mu\text{m}$ , και αυξανόμενη δύναμη συγκόλλησης που αρχικά ήταν 150 N, μετά από 5 δευτερόλεπτα αυξανόταν σε 200 N και τα τελευταία 6 δευτερόλεπτα είχε τη τιμή 240 N. Συνολικός χρόνος συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα. Το trigger force είχε τιμή 120 N, το Touch force 200 N, ενώ το Hold force 500 N για 30 δευτερόλεπτα. Η ενέργεια συγκόλλησης ήταν 1534 Joule.

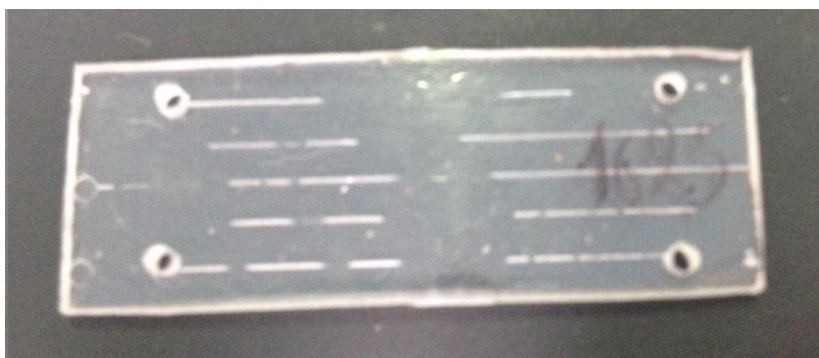


Εικόνα 69 Πείραμα 1632

Παρατηρούμε ότι έχουμε μια καλή κατανομή της ενέργειας, αφού έχει κολλήσει όλη η επιφάνεια, αλλά παρουσιάζονται τοπικά λωσίσματα με έντονο άσπρο χρώμα.

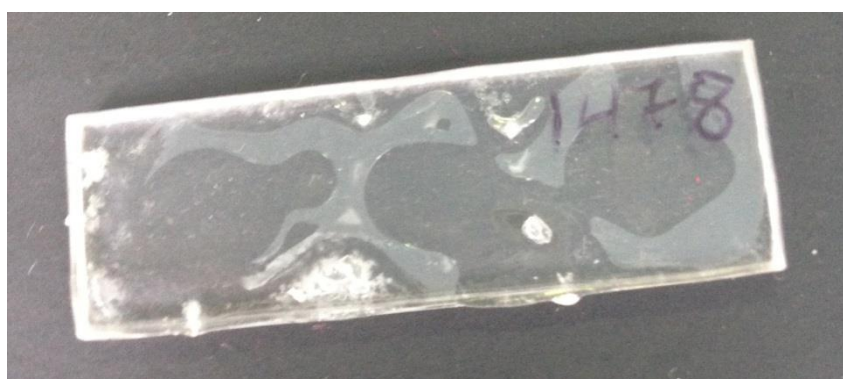
Στο επόμενο πείραμα 1625, εφαρμόσαμε πλάτος ταλάντωσης 3.5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, Touch force 200 N και Trigger Force 120 N. Συνολικός χρόνος συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα και η συνολική ενέργεια που έλαβε ήταν

**739 Joule. Φαίνεται ότι οι επιφάνειες έχουν έρθει πάρα πολύ κοντά, αλλά έχει λιώσει η μικρορευστονική διάταξη σε πολλά σημεία.**



**Εικόνα 70 Πείραμα 1625**

Τέλος το πείραμα 1478 χωρίς μικρορευστονική διάταξη σε συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, ενέργεια 978 Joule και με χρόνο συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα, είχε αρκετά μεγάλο ποσοστό κολλησης, με καψίματα όμως σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας του.



**Εικόνα 71 Πείραμα 1478**

### **5.2.1. Με προθέρμανση για το PMMA με χοντρό καπάκι**

Σε αντιστοιχία με τη βιβλιογραφία και τη δημοσίευση των Zhang (Luo, Zhang et al. 2010) γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της διαδικασίας προθέρμανσης, για να βρεθεί το ελάχιστο βήμα όπου τα δοκίμια θα λάβουν τόση ενέργεια πριν τη συγκόλληση ώστε να μην κολλήσουν αλλά να είναι έτοιμα για μια στιβαρή συγκόλληση με τη κυρίως κατεργασία. Στην ουσία, θέλουμε να αναπαράγουμε τη διαδικασία με δύο ξεχωριστά στάδια, ένα της προθέρμανσης και ένα της κυρίως συγκόλλησης.

Το σημείο που υστερούμε είναι ότι δεν διαθέτουμε στάδιο προθέρμανσης, ούτε μπορούμε να κρατήσουμε σταθερή τη θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτό αυξάνει το συντελεστή δυσκολίας στη δικιά μας περίπτωση, καθώς οι προαναφερθέντες ερευνητές πραγματοποίησαν συγκόλληση με υπερήχους στην οποία προθέρμαναν τα δοκίμια στους 70 °C, και η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του πειράματος, ξεπερνάει οριακά τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ), χωρίς

όμως να λιώσει το πολυμερές, που σημαίνει ότι δεν ξεπερνά τη θερμοκρασία τήξεως του ( $T_m$ ). Η συγκεκριμένη περιοχή είναι πολύ μικρή και για αυτό χρειάστηκαν επιπρόσθετα όργανα (θερμοστοιχεία, θερμοκρασιακούς μετρητές) για την επιτύχουν. Όργανα που εμείς δεν διαθέτουμε.

Αντ' αυτού, αποφασίσαμε να προσθέσουμε ένα στάδιο προθέρμανσης στη συγκόλληση, όπου τα δείγματα θα λάμβαναν τόση ενέργεια ώστε να ανεβάσουν τη θερμοκρασία τους κάτω από τη θερμοκρασία τήξεως, για να μην υπάρξει ροή λιωμένου υλικού, αλλά να κολλήσουν οι επιφάνειες μεταξύ τους. Απαιτείται να βρεθούν οι συνθήκες, ώστε να προσδίδεται η ελάχιστη ενέργεια στο δείγμα προς συγκόλλησης, ώστε τα επιμέρους τεμάχια να έρθουν σε επαφή χωρίς να κολλήσουν. Η ενέργεια που θα πρέπει να δοθεί, θα πρέπει να είναι τόση όσο να κολλήσουν επιτυχώς και σ' όλη την επιφάνεια τους, τα δείγματα στην κυρίως κατεργασία συγκόλλησης υπερήχων.

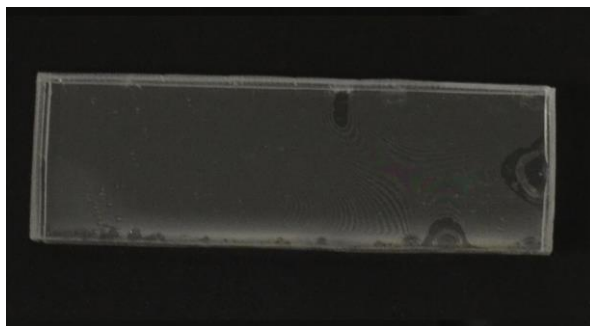
Με βάση λοιπόν τη δημοσίευση του Wang το 2010 (Zhang, Wang et al. 2010), συγκρίναμε τις τιμές που χρησιμοποίησαν στα πειράματα τους. Οι τιμές αυτές είναι 8-24 N/cm<sup>2</sup> δηλαδή για περίπου 6,75 cm που είναι η δικιά μας επιφάνεια, απαιτείται δύναμη 50-170 Newton. Το πλάτος ταλάντωσης που χρησιμοποίησαν ήταν 6-12  $\mu\text{m}$ , αλλά το μηχάνημα τους μετράει από κορυφή σε κορυφή το πλάτος της ταλάντωσης (peak to peak), ενώ το δικό μας από το σημείο ισορροπίας μέχρι την κορυφή (peak to zero). Αυτό συνεπάγεται ότι στο δικό μας μηχάνημα, αντιστοιχίζεται σε πλάτη ταλάντωσης με εύρος 3-6  $\mu\text{m}$ . Επειδή όμως το μηχάνημα μας χρησιμοποιεί μεγαλύτερη συχνότητα (35 KHz) από το δικό τους (30 KHz), υποθέτουμε ότι αναλογικά με τη συχνότητα θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μικρότερο εύρος πλάτους ταλάντωσης: 2.5 – 5.5  $\mu\text{m}$ .

Για το στάδιο της προθέρμανσης αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε δύναμη ταλάντωσης 50, 100 και 200 Newton, για συγκεκριμένο πλάτος ταλάντωσης: 2.5 και 3  $\mu\text{m}$ , για μέγιστο χρόνο συγκόλλησης 15 δευτερόλεπτα, που συμπίπτει κοντά στο μέγιστο χρόνο συγκόλλησης από το μηχάνημα που διαθέτουμε, για να επιτύχουμε ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας. Η μέγιστη ενέργεια που θα δίνεται, θα πρέπει να είναι 100 ή 200 joules, για να μην ξεπερνάει το δείγμα τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ), ώστε να μην υπάρχει συγκόλληση παρά μόνο θέρμανση. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το πείραμα υπ' αριθμόν 321 με ενέργεια 76 Joule σε διάρκεια συγκόλλησης 10 δευτερολέπτων, το οποίο κόλλησε ελάχιστα με μία μόνο τοπική συγκόλληση. Το αντίστοιχο στον ίδιο χρόνο (πείραμα υπ' αριθμόν 322) δεν κόλλησε καθόλου.



**Εικόνα 72 Πείραμα 321 πλάτος ταλάντωση 2.5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 50 N, χρόνος συγκόλλησης 15 δευτερόλεπτα και ενέργεια 233 Joule**

Επειδή όμως εμείς θέλουμε να μην έχουμε καμία συγκόλληση στο στάδιο της προθέρμανσης, αποφασίσαμε να θέσουμε ως σημείο αναφοράς τα 100 Joule στα 2.5 μm πλάτους ταλάντωσης και για δύναμη συγκόλλησης 50 N, όπου δεν υπάρχει καμία συγκόλληση. Όσο αυξάνεται όμως το πλάτος ταλάντωσης ή η δύναμη συγκόλλησης, αυξάνεται και η ενέργεια που προσδίδεται στο δοκίμιο. Γι αυτό το λόγο, σε μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης θα απαιτείται λιγότερος χρόνος για να επιτύχουμε το ίδιο ποιοτικό αποτέλεσμα. Το επιθυμητό αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, που δεν έχουμε συγκόλληση ως λιώσιμο υλικού, αλλά οι δύο επιφάνειες έχουν έρθει πάρα πολύ κοντά, με την εμφάνιση ιριδισμών ως απόδειξη αυτού.



**Εικόνα 73 Συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 3.5 μm, δύναμη ταλάντωσης 120 N, Ενέργεια 64 J και χρόνος 5 sec**

Μελετήθηκε λοιπόν η επίδραση που έχει το πλάτος ταλάντωσης στον χρόνο συγκόλλησης για να δούμε πότε φτάνουμε τα αντίστοιχα 100 Joule στα 2.5 μm πλάτους ταλάντωσης και για δύναμη συγκόλλησης 50 N, ώστε να μην έχουμε καμία τοπική συγκόλληση στα δείγματα μας. Έτσι, για αυξανόμενο πλάτος ταλάντωσης από 2.5 έως 4.5 μm και για δυνάμεις συγκόλλησης 50, 120 και 180 Newton, λαμβάνουμε τους παρακάτω χρόνους του πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2**

Δύναμη συγκόλλησης (Newton)	Πλάτος ταλάντωσης (μm)	Ενέργεια προθέρμανσης (Joule)	Χρόνος Συγκόλλησης (sec)
50	2.5	100	15
50	3	85	11.8
50	3.5	50	2.5
50	4	40	9.6
50	4.5	25	0.7
120	2.5	70	4.7/8.9
120	3	45	1.4
120	3.5	30	1.5
120	4	20	1.1
120	4.5	10	0.2
180	2.5	65	3.8
180	3	25	0.8
180	3.5	15	0.5
180	4	10	0.2
180	4.5	5	0.1

Για ενέργειες από 25 έως 150 Joule και με βήμα 25 joule, με σταθερή δύναμη 120 N σ' όλα τα πειράματα, δοκιμάσαμε στα 3, 3.5 και 4 μm πλάτη ταλάντωσης. Στα 3 και στα 3.5 ο χρόνος και η ενέργεια συγκόλλησης δείχνουν να έχουν μια σχέση αναλογίας αλλά στο πλάτος ταλάντωσης 4 μm δεν φαίνεται να συμβαίνει αυτό. Η αιτία είναι το υψηλότερο πλάτος ταλάντωσης, είτε η ανομοιομορφία των συγκεκριμένων δοκιμίων. Αυτό αφορά τα πειράματα στις 5/11/2015 που βρίσκονται στο αρχείο excel που βρίσκεται στο παράρτημα Δ, μπορούμε να δούμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των συγκολλήσεων. Τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν δεν υπάρχει μια επαναληψιμότητα σε σχέση με το χρόνο, αφού σε επανάληψη του ίδιου ακριβώς πειράματος λαμβάνουμε διαφορετικούς χρόνους συγκόλλησης. Για παράδειγμα για πλάτος ταλάντωσης 3 μm και ενέργεια 25 Joule, λάβαμε τους εξής χρόνους: 3.722, 0.848, 2.953, 3.392 και 5.660 δευτερόλεπτα. Με ποιοτικό έλεγχο της επιφάνειας των δειγμάτων και έλεγχο της επιπεδότητάς τους, φαίνεται ότι επιτυγχάνουμε μια καλή επαναληψιμότητα στο χρόνο συγκόλλησης, όπως φαίνεται στο αρχείο excel που παρατίθεται στο παράρτημα. Συγκεκριμένα στα πειράματα που αναγράφεται η χαρακτηριστική ημερομηνία από 6/11/2015 και 11/11/2015 βλέπουμε ότι υπάρχει μεγάλη συνέπεια στο χρόνο συγκόλλησης και για πλάτη ταλάντωσης με 3.5 μm.

**Πίνακας 5.3**


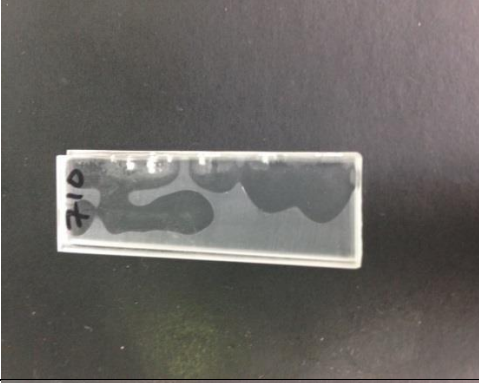


Πλάτος ταλάντωσης 3.5 μm					
11-11-2015			11-6-2015		
# πειράματος	Ενέργεια (J)	Χρόνος (sec)	# πειράματος	Ενέργεια (J)	Χρόνος (sec)
492	25	1,565	493	25	1,440
471	50	3,484	478	50	3,714
472	75	7,787	479	75	3,959
473	100	10,515	480	100	6,352
474	125	12,695	481	125	12,368
475	150	10,418	482	150	12,542
476	175	10,232	483	175	13,309
477	200	12,890	484	200	12,140

Η επόμενη μας κίνηση είναι να δούμε αν λειτουργούν τα δύο στάδια, είναι να αποδώσουμε το ίδιο ποσό ενέργειας σε κάθε στάδιο. Στο παρακάτω πίνακα φαίνεται το πόσο της ενέργειας που δίνεται καθώς και ο χρόνος συγκόλλησης.

**Πίνακας 5.4**

Αριθμός Πειράματος	Ενέργεια ανά βήμα (2 βήματα)	Συνολική αποδομένη ενέργεια	Χρόνος συγκόλλησης ανά βήμα	Εικόνα πειράματος
704	100	200	2.936	Δεν παρατίθεται εικόνα
705	150	300	3.740	Δεν παρατίθεται εικόνα
706	200	400	4.581	Δεν παρατίθεται εικόνα



707	250	500	3.615	
708	300	600	7.464	Δεν παρατίθεται εικόνα
709	350	700	5.427	Δεν παρατίθεται εικόνα
710	400	800	6.027	
711	450	900	3.053	
712	500	1000	8.541	

Δυστυχώς, οι χρόνοι δεν ακολουθούν το αναμενόμενο μοτίβο, καθώς οι χρόνοι για τα πειράματα 707, 709 και 711 θα έπρεπε να ήταν μεγαλύτεροι. Αυτό πιθανόν οφείλεται σε κάποια ανομοιομορφία της επιφάνειας, που λειτουργεί σαν ενεργειακός κατευθυντής και συσσωρεύει την αποδιδόμενη ενέργεια. Έτσι, αντί να καταναμηθεί η ενέργεια σ' όλη την επιφάνεια, συγκεντρώνεται μόνο στο συγκεκριμένο σημείο.

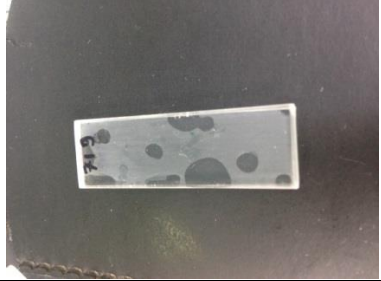


Διαφορετική περίπτωση είναι να προκύψει το προαναφερθέν σφάλμα της μηχανής: «Frequency Below Limit» όπως συνέβη με το πείραμα 711 και 712. Παρατηρείται ότι όποτε εμφανίζεται σφάλμα μηχανής, το ποσοστό της συγκόλλησης είναι αρκετά μικρότερο, αφού δεν εφαρμόζεται η επιθυμητή ενέργεια στο δοκίμιο, ούτε ο αναμενόμενος χρόνος συγκόλλησης.

Στα επόμενα πειράματα επαναλάβαμε το κάθε πείραμα τρεις φορές στις ακριβώς ίδιες συνθήκες για να εξακριβώσουμε κατά πόσο είναι επαναλήψιμο κάθε πείραμα. Επιλέξαμε 3.5 και 4 μm πλάτος ταλάντωσης και δύναμη 120 N για όλα τα πειράματα. Επιλέξαμε να δώσουμε την ενέργεια σε δύο στάδια χωρίς όμως να σηκωθεί το κέρας συγκόλλησης.

Παρακάτω φαίνονται τα πειράματα που έχουν τις ίδιες συνθήκες, αλλά φαίνεται να εμφανίζουν ποιοτικές διαφορές στη συγκόλληση.

Πειράματα σε συνθήκες 3.5 μm πλάτος ταλάντωσης, 120 N δύναμη ταλάντωσης και ενέργεια 100 Joule σε κάθε βήμα. Οι χρόνοι συγκόλλησης φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.4**


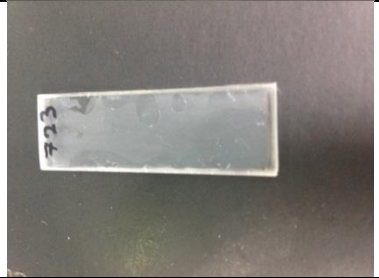
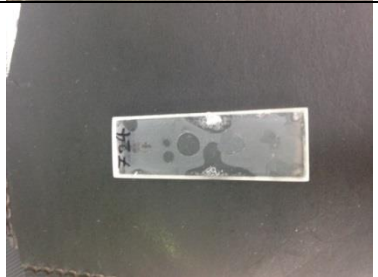
Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)	Εικόνα πειράματος
719	100 + 100	3.420	
720	100 + 100	5.939	
721	100 + 100	3.139	

Τα πειράματα 719 και 721 έχουν πολύ κοντινό χρόνο συγκόλλησης και παρόμοιο ποσοστό συγκόλλησης. Το πείραμα 720, ενώ έχει αρκετά μεγαλύτερο χρόνο συγκόλλησης (σχεδόν διπλάσιο) και αναμένεται να έχει και μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης, εμφανίζει μικρότερο ποσοστό συγκόλλησης σε σχέση με άλλα δύο

πειράματα.

Πειράματα σε συνθήκες 4 μm πλάτος ταλάντωσης, 120 N δύναμη ταλάντωσης και ενέργεια 100 Joule σε κάθε βήμα. Οι χρόνοι συγκόλλησης φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.5**




Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)	Εικόνα πειράματος
722	100 + 100	2.915	
723	100 + 100	2.915	
724	100 + 100	2.202	

Τα πειράματα 722 και 723 ενώ έχουν το ίδιο χρόνο συγκόλλησης, έχουν διαφορετικό ποσοστό συγκόλλησης και παραμόρφωσης της επιφάνειάς τους (καψίματα), ενώ στο πείραμα 724 φαίνεται να έχουμε μια μεγάλη συγκέντρωση ενέργειας στο κεντρικό άκρο της πάνω πλευράς, που εμφανίζεται με τη μορφή καψίματος.

Πειράματα σε συνθήκες 3.5 μm πλάτος ταλάντωσης, 120 N δύναμη ταλάντωσης και ενέργεια 75 Joule σε κάθε βήμα. Οι χρόνοι συγκόλλησης φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:




**Πίνακας 5.6**

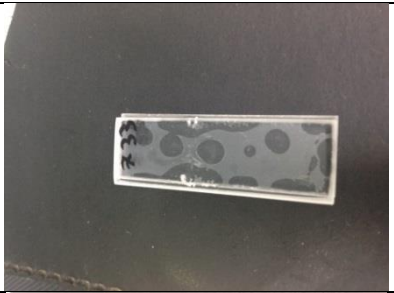

Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)	Εικόνα πειράματος
728	75 + 75	1.951	
730	75 + 75	3.830	
731	75 + 75	1.928	

Στη συγκεκριμένη σειρά τα πειράματα 728 και 731 έχουν σχεδόν ίδιους χρόνους συγκόλλησης, με το 728 να έχει λίγο παραπάνω ποσοστό συγκόλλησης. Το πείραμα 730 που έχει σχεδόν το διπλάσιο χρόνο έχει και αρκετά μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης, όπως και αναμενόταν.

Πειράματα σε συνθήκες 4 μm πλάτος ταλάντωσης, 120 N δύναμη ταλάντωσης και ενέργεια 75 Joule σε κάθε βήμα. Οι χρόνοι συγκόλλησης φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.7**

Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)	Εικόνα πειράματος
732	75 + 75	1.532	

733	75 + 75	1.435	
734	75 + 75	1.576	

Τα συγκεκριμένα πειράματα έχουν μια αρκετά καλή επαναληψιμότητα στο χρόνο συγκόλλησης, και παρόμοια ποσοστά συγκόλλησης.

Στη συνέχεια στην ίδια λογική, με δοκίμια που έχουν τραχύτητα από κατεργασία πλάσματος, εκτελούμε πειράματα με πλάτος ταλάντωσης 3.5  $\mu\text{m}$  και 4  $\mu\text{m}$  και δύναμη ταλάντωσης 120 N και 180 N, δίνοντας ενέργεια 150 Joule σε τρία βήματα των 50 Joule, χωρίς να σηκωθεί το κέρασ συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, Πειράματα σε συνθήκες 3.5  $\mu\text{m}$  πλάτος ταλάντωσης, 120 N δύναμη ταλάντωσης και ενέργεια 50 Joule σε κάθε βήμα. Οι χρόνοι συγκόλλησης φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.8**

Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)
802	50 + 50 + 50	1.463
804	50 + 50 + 50	1.379
807	50 + 50 + 50	0.977

Στα παρακάτω πειράματα εμφανίζονται πολλές σημειακές συγκολλήσεις που εμφανίζονται με τη μορφή κηλίδων. Στο πείραμα υπ' αριθμόν 807, παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης από τα άλλα δύο, και ας έχει πραγματοποιηθεί σε μικρότερο χρόνο. Αυτό σημαίνει πως η επιφάνεια του ήταν αρκετά πιο επίπεδη και οι επιφάνειες προς συγκόλληση πιο παράλληλες μεταξύ τους.

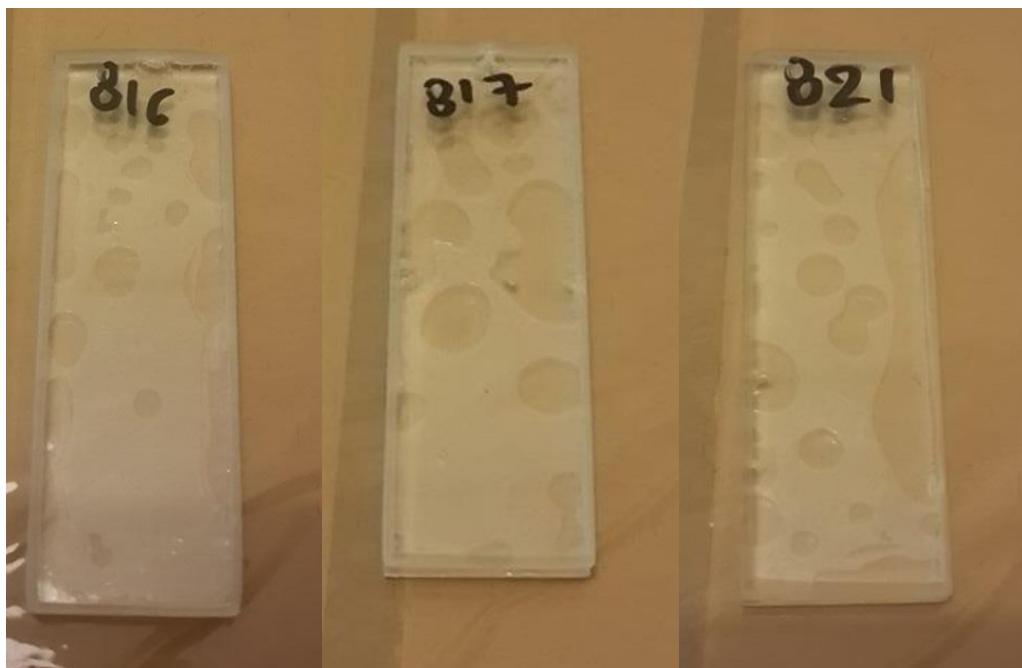


Εικόνα 74 Πειράματα πολλαπλών βημάτων 802, 804 και 807

Πειράματα σε συνθήκες 3.5 μm πλάτος ταλάντωσης, 180 N δύναμη ταλάντωσης και ενέργεια 50 Joule σε κάθε βήμα. Οι χρόνοι συγκόλλησης φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.9**

Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)
816	50 + 50 + 50	0.403
817	50 + 50 + 50	0.869
821	50 + 50 + 50	0.256



Εικόνα 75 Πειράματα πολλαπλών βημάτων 816, 817 και 821

Πάλι, στο πείραμα υπ' αριθμόν 821, παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης από τα άλλα δύο, με μικρότερο χρόνο συγκόλλησης γιατί η επιφάνεια του ήταν αρκετά πιο επίπεδη και οι επιφάνειες προς συγκόλληση πιο παράλληλες μεταξύ τους.

Στη συνέχεια αυξάνουμε τη δύναμη συγκόλλησης και εξετάζουμε τις περιπτώσεις για 180 N και κυρίως για 240 N. Η αποδιδόμενη ενέργεια είναι 200 Joule σε τέσσερα βήματα των 50 Joule. Το πλάτος ταλάντωσης είναι 3.5 μm αρχικά και το αυξάνουμε έως τα 5 μm με βήμα 0.5 κάθε φορά.

Από τη συγκεκριμένη σειρά αξίζουν να παρατηρηθούν τα πειράματα στις συνθήκες των 4.5 μm πλάτους ταλάντωσης και δύναμης συγκόλλησης 240 N. Στο πείραμα 895 λειτουργούμε με μεμονωμένα πειράματα, δηλαδή το κέρασ συγκόλλησης σηκώνεται και ξανακατεβαίνει για να επαναλάβει το επόμενο πείραμα. Έτσι έχουμε το παρακάτω πίνακα από τέσσερα διαφορετικά πειράματα, όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.10**

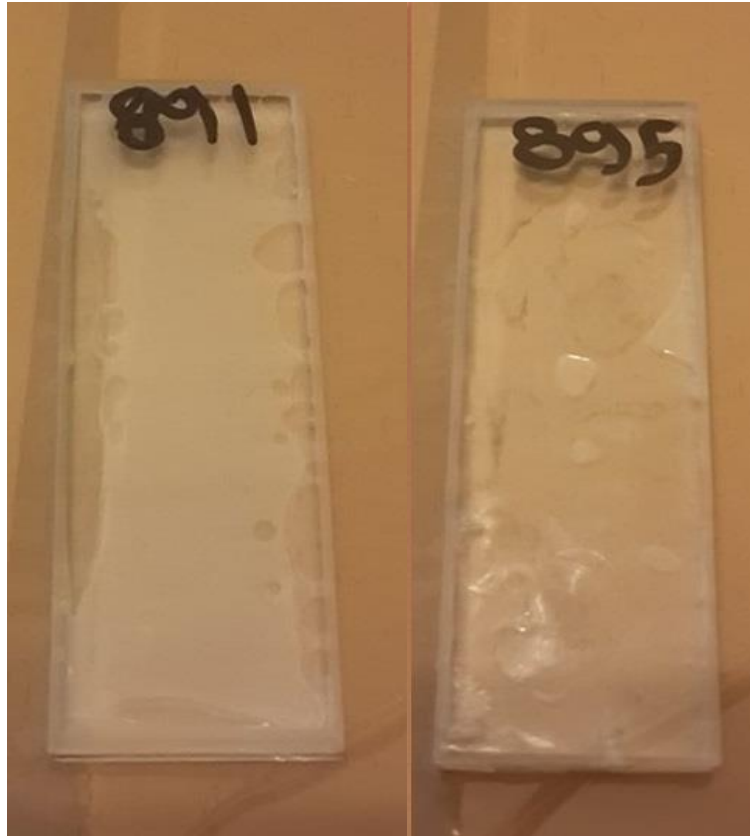
Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)
888	50	0.999
889	50	0.899
890	50	0.600
891	50	0.599

Στο πείραμα 895 στις ίδιες συνθήκες πλάτους ταλάντωσης και δύναμης συγκόλλησης προσδίδεται ενέργεια 50 και 50 Joule χωρίς να σηκωθεί το κέρασ συγκόλλησης, τελειώνει το πείραμα 894 και επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία, δηλαδή προσδίδεται και πάλι ενέργεια 50 και 50 Joule χωρίς να σηκωθεί το κέρασ συγκόλλησης στο πείραμα 895.

**Πίνακας 5.11**

Αριθμός Πειράματος	Αποδιδόμενη ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (Sec)
894	(50) 50	0.653
895	(50) 50	0.487

Επαναλαμβάνουμε ότι στο συγκεκριμένο σύστημα SEQUENTIAL του μηχανήματος, οι υπέρηχοι συνεχίζουν να εφαρμόζονται στο δοκίμιο, αλλά χωρίς πίεση. Αυτό σημαίνει όμως ότι η κίνηση του κέρατος ταλάντωσης μεταδίδει μια ενέργεια στο δοκίμιο, και γι' αυτό παρατηρείται και μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης, όπως στο πείραμα 895.

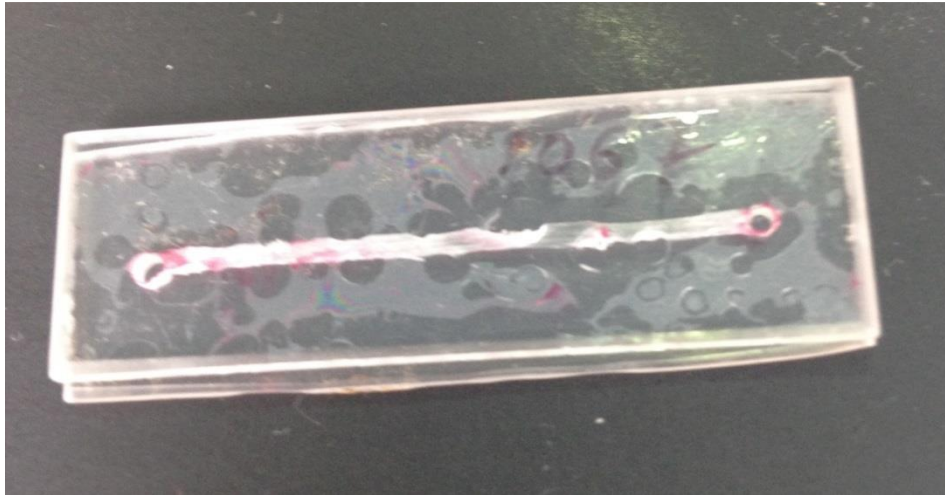


Εικόνα 76 Πειράματα πολλαπλών βημάτων 891 και 895

**Συνεπώς, όταν πραγματοποιείται συγκόλληση δύο βημάτων και δεν σηκώνεται το κέρας συγκόλλησης είναι τελείως διαφορετική περίπτωση από τα να προσδώσουμε το ίδιο ποσό ενέργειας στις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Η αιτία του παραπάνω είναι ότι το κέρας συνεχίζει να ταλαντώνεται σε συχνότητα υπερήχων χωρίς να εφαρμόζει όμως τη δύναμη συγκόλλησης, όπως εξηγείται και προηγουμένως.**

Τα επόμενα πειράματα πραγματοποιούνται σε μικρορευστονική διάταξη όπου τα κανάλια έχουν χαρακτηί σε εργαλειομηχανή CNC και έχουν κοπεί με κορδέλα (μέχρι και την εικόνα 89). Η δύναμη συγκόλλησης στα επόμενα πειράματα είναι 240 N και η δύναμη συγκράτησης 500 N. Ο χρόνος συγκράτησης είναι 5 δευτερόλεπτα. Τα καπάκια έχουν πατηθεί στη θερμική πρέσσα για γίνουν επίπεδα, αφού πρώτα έχουν λειανθεί οι ακμές τους με γυαλόχαρτο. Θεωρητικά λοιπόν έχουμε επιτύχει τη μέγιστη επιπεδότητα στα δείγματα μας. Σε όσα πειράματα δεν έχει γίνει η παραπάνω επεξεργασία, αναφέρεται, για να παρατηρήσουμε την επίδραση που έχει η επιπεδότητα.

Εκτελούμε πειράματα με πλάτος ταλάντωσης 4  $\mu\text{m}$  με συνολική ενέργεια 400 Joule, δίνοντας 100 Joule σε κάθε βήμα. Το πείραμα 1067 που είναι στις παραπάνω συνθήκες, είναι καλά σφραγισμένο και επιτρέπεται η ομαλή ροή του ρευστού από τη μια είσοδο στην άλλη. Παρατηρούμε όμως ότι δεν έχει κολλήσει όλη η επιφάνεια, παρά μόνο κοντά στις άκρες και γύρω από το κανάλι.



**Εικόνα 77 Πείραμα 1067 πλάτος ταλάντωσης 4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 4 x 100 J**

Το πείραμα 1071 έχει πλάτος ταλάντωσης 7  $\mu\text{m}$  και ακριβώς τις προηγούμενες συνθήκες. Η ροή του ρευστού ήταν ομαλή και δεν υπήρχαν διαρροές. Επίσης το ποσοστό της συγκόλλησης είναι αρκετά μεγαλύτερο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το φαινόμενο αυτό πιθανότατα παρατηρείται εξαιτίας των “γρεζιών” γύρω από το κανάλι, αποτέλεσμα της κοπής με CNC. Γι’ αυτό φαίνεται ότι η ανωμαλία της επιφάνειας δρα ως ενεργειακός κατευθυντής και έχουμε καλή συγκόλληση γύρω από το κανάλι, σε όλα τα πειράματα αυτής της σειράς.



**Εικόνα 78 Πείραμα 1071 πλάτος ταλάντωσης 7  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 4 x 100 J**

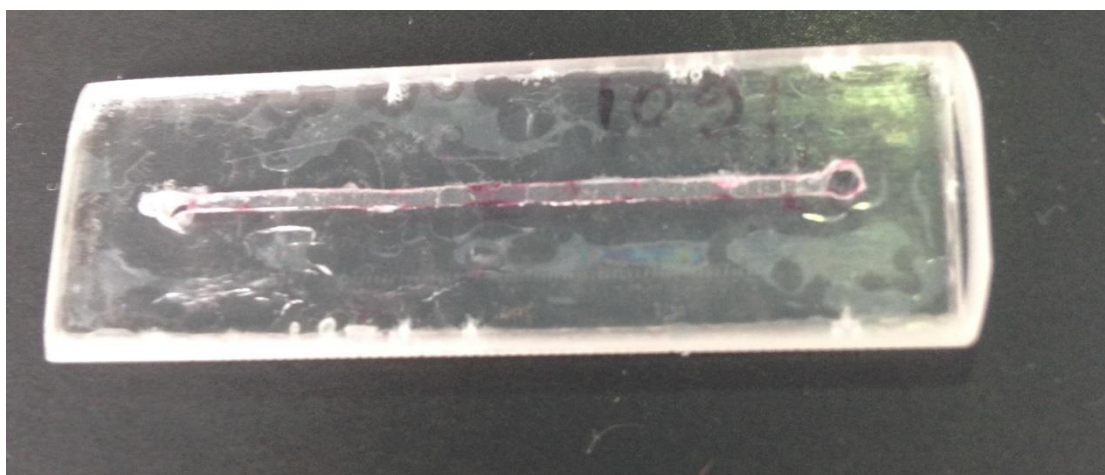
Στη συνέχεια, εκτελούμε πειράματα με πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$  με συνολική ενέργεια 600 Joule, δίνοντας 150 Joule σε κάθε βήμα. Το πείραμα 1087 που είναι στις παραπάνω συνθήκες, είναι καλά σφραγισμένο και επιτρέπεται η ομαλή ροή του ρευστού από τη μια είσοδο στην άλλη. Παρατηρούμε όμως ότι έχει κολλήσει σχεδόν όλη η επιφάνεια, και τα σημεία που δεν έχουν κολλήσει δεν επηρεάζουν τη μικρορευστονική διάταξη. Σημειώνεται ότι δεν έχει πατηθεί στη θερμική πρέσσα, αλλά έχουν λειανθεί οι ακμές του με γυαλόχαρτο.





**Εικόνα 79 Πείραμα 1087 πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 4 x 150 J**

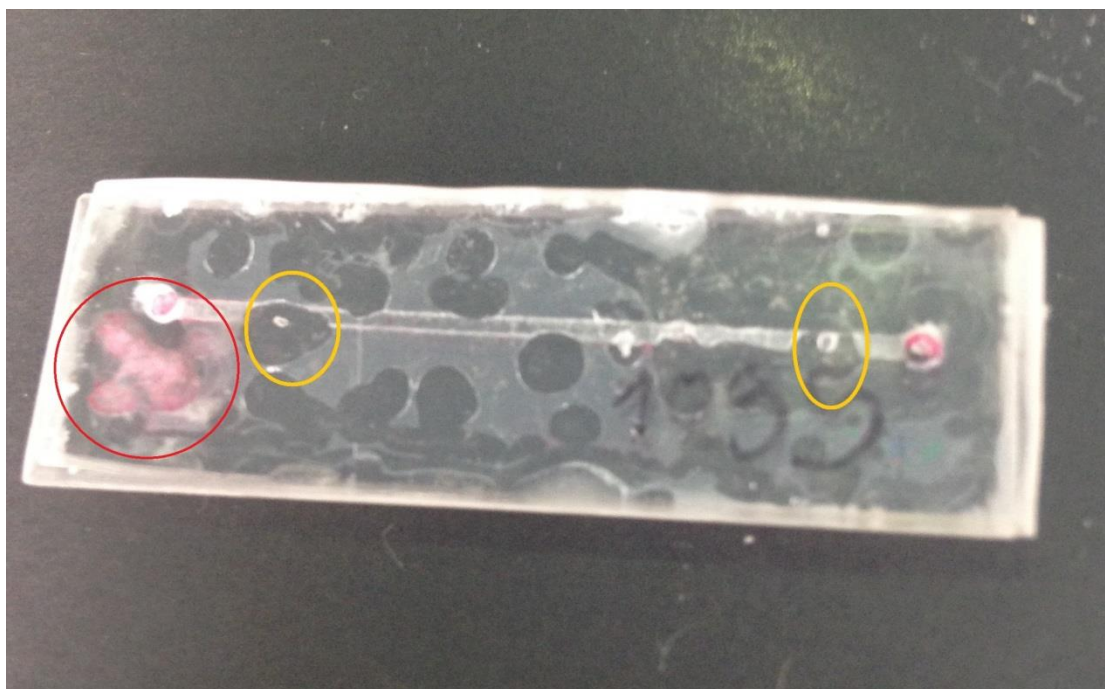
Το πείραμα 1091 έχει πλάτος ταλάντωσης 5.5  $\mu\text{m}$  και ακριβώς τις προηγούμενες συνθήκες. Η ροή του ρευστού ήταν ομαλή και δεν υπήρχαν διαρροές. Επίσης το ποσοστό της συγκόλλησης είναι ισάξιο με το πείραμα 1087, με την εμφάνιση όμως καψιμάτων στις άκρες των πλευρών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όπως και το προηγούμενο, δεν έχει πατηθεί στη θερμική πρέσσα, αλλά έχουν λειανθεί οι ακμές του με γυαλόχαρτο.



**Εικόνα 80 Πείραμα 1091 πλάτος ταλάντωσης 5.5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 4 x 150 J**

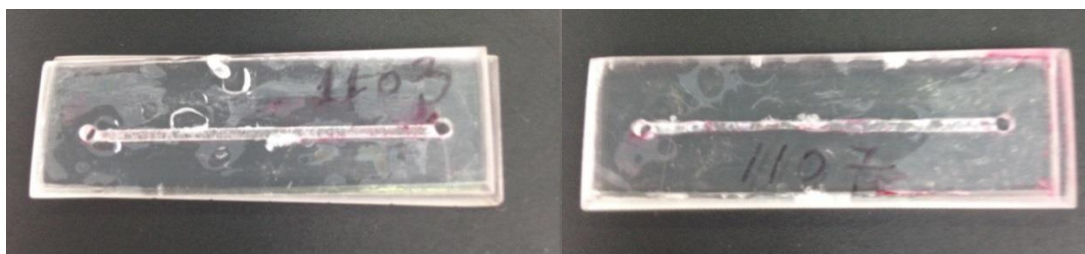
Τέλος, παρατίθεται το πείραμα 1095 που είναι ακριβώς με τις προηγούμενες συνθήκες αλλά έχει πατηθεί στη θερμική πρέσσα. Παρατηρούμε ότι είναι βουλωμένο (δεν περνάει ρευστό μέσα στο κανάλι). Με κίτρινο χρώμα σημειώνονται τα σημεία όπου έχουν κλείσει το κανάλι και ευθύνονται για το βούλωμα. Το πείραμα 1095 είναι ακριβώς στις ίδιες συνθήκες με το πείραμα 1091, αλλά φαίνεται να έχει μικρότερο ποσοστό κόλλησης και περισσότερα καψίματα από το αντίστοιχο 1091. Τέλος, φαίνεται να υπάρχει διαρροή (στα αριστερά της εικόνας με κόκκινο χρώμα.).





**Εικόνα 81 Πείραμα 1095 πλάτος ταλάντωσης 5.5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 4 x 150 J**

Τα πειράματα με βήμα 100 Joule φαίνεται να λειτουργούν, και για να επιτύχουμε μεγαλύτερο ποσοστό συγκόλλησης, εκτελούμε τα επόμενα πειράματα σε πλάτη ταλάντωσης 3.5 και 4.5  $\mu\text{m}$ , με την ίδια δύναμη συγκόλλησης, αλλά δίνουμε 200 Joule ενέργεια σε κάθε βήμα. Συνολική αποδιδόμενη ενέργεια 800 Joule. Δυστυχώς, δεν φαίνεται να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα, όπως θα αναμενόταν.

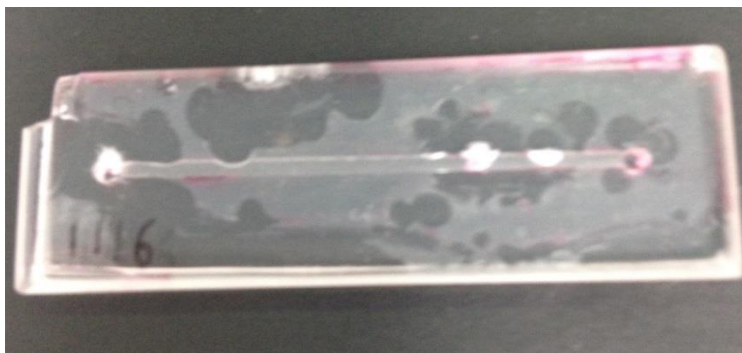


**Εικόνα 82 Πειράματα 1103 και 1107 πλάτη ταλάντωσης 3.5 και 4.5  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα, δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 4 x 200 J**

Συγκεκριμένα στο πείραμα 1107, ενώ έχει κολλήσει αρκετά καλά η αριστερή πλευρά όπως φαίνεται στην παραπάνω φωτογραφία, η δεξιά πλευρά δεν κολλήσει καθόλου, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαρροή. Στην εικόνα η διαρροή παρουσιάζεται στην άκρη των ακμών των πλευρών που έχουν χρωματιστεί με το κόκκινο χρώμα του ρευστού που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές. Στο πείραμα 1103 έχουμε μικρότερο ποσοστό συγκόλλησης από το 1107 και μεγάλες κηλίδες που είναι αποτέλεσμα συσσώρευσης της ενέργειας στα συγκεκριμένα σημεία.

Πραγματοποιούνται πειράματα με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N και παίρνουμε τα αποτελέσματα από το πείραμα 1114 όπου

προσδίδουμε 300 Joule, από το πείραμα 1116 όπου προσδίδουμε 300 Joule σε δύο στάδια των 150 και 150 Joule και το πείραμα 1120 όπου προσδίδουμε 600 Joule σε τέσσερα στάδια των 150 Joule. Στο πείραμα 1114 έχει κολλήσει ένα μέρος της επιφάνειας, ενώ στα δύο επόμενα έχουμε διαρροή. Χαρακτηριστικά στο 1116 φαίνεται η πάνω μεριά που είναι χρωματισμένη με τη κόκκινη χρωστική ουσία, αποτέλεσμα διαρροής.



Εικόνα 83 Πείραμα 1116 πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 240 N, Ενέργεια 300 + 150 + 150 J

### 5.2.2. Εισαγωγή κατευθυντών ενέργειας (μετά από εγχάραξη με πλάσμα οξυγόνου, γυαλόχαρτο κλπ) με χοντρό καπάκι


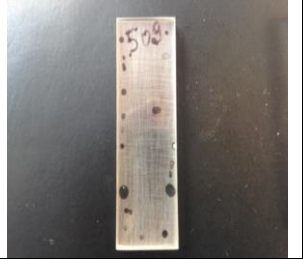


Ο σχεδιασμός επίσης περιλαμβάνει την εξέταση της περιπτώσεως που προσδίδεται τραχύτητα στην επιφάνεια, με σκοπό οι ανομοιομορφίες που θα προκύψουν να λειτουργήσουν ως μικρο-ενεργειακοί κατευθυντές. Η τραχύτητα επιτυγχάνεται είτε με γυαλόχαρτο εμπορίου, είτε με εγχάραξη σε μηχανή plasma.

Στην πρώτη περίπτωση, πραγματοποιείται τριβή ολόκληρης της επιφάνειας με γυαλόχαρτο, ώστε να δοθεί τραχύτητα σ' αυτήν. Μ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνουμε επίτευξη τραχύτητας στην επιφάνεια, με μια εύκολη και γρήγορη μέθοδο, που ιδανικά θα λειτουργήσει σαν μικρο-ενεργειακοί κατευθυντές κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η τραχύτητα επιτυγχάνεται με γυαλόχαρτο εξωτερικής τραχύτητας 15  $\mu\text{m}$ .

Οι συνθήκες συγκόλλησης που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια είναι για πλάτος ταλάντωσης 3.5 και 4  $\mu\text{m}$  και δύναμη συγκόλλησης 120 Newton, όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5.12**

Αριθμός Πειράματος (#)	Πλάτος Ταλάντωσης ( $\mu\text{m}$ )	Δύναμη συγκόλλησης (Newton)	Χρόνος Συγκόλλησης (sec)	Ενέργεια Συγκόλλησης (Joule)	Εικόνα πειράματος
------------------------	-------------------------------------	-----------------------------	--------------------------	------------------------------	-------------------

508	3.5	120	1.579	50	
509	3.5	120	2.213	75	
510	3.5	120	2.769	100	
513	3.5	120	6.389	150	

Στην λογική λοιπόν της ελάχιστης δυνατής προσδιδόμενης ενέργειας, ώστε να μην υπάρξει λιώσιμο και ροή υλικού, δοκιμάζουμε σε δοκίμια με τραχύτητα και παρατηρούμε ότι για την ίδια ενέργεια έχουμε μεγαλύτερο ποσοστό κόλλησης από ότι προηγουμένως (χωρίς τραχύτητα), αλλά πάλι με τοπικές συγκολλήσεις. Από τις παρακάτω εικόνες επιβεβαιώνεται ότι το ποσοστό της κόλλησης αυξάνεται με τη μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας, και στην περίπτωση δοκιμίων με τραχύτητα. Π.χ για τα 25 και 50 Joule, που διαφέρουν τα παραπάνω πειράματα και είναι πολύ μικρό ποσό ενέργειας, φαίνεται να πολλαπλασιάζουν τον αριθμό των κηλίδων, άρα και το ποσοστό συγκόλλησης.

Αν και έχουμε λειάνει τις ακμές των πλευρών με γυαλόχαρτο, συνεχίζεται η συγκόλληση να λαμβάνει χώρα στα άκρα, διότι τα συγκεκριμένα δοκίμια έχουν κοπεί με laser και το πλάτος του λοφίσκου της κορυφής λόγω της κοπής, είναι αρκετά μεγάλο για να ‘φαγωθεί’ με το γυαλόχαρτο. Τα συγκεκριμένα δοκίμια δεν έχουν πατηθεί στη μηχανική πρέσσα.

Στη δεύτερη περίπτωση, δίνονται δοκίμια στο εργαστήριο πλάσματος για επιτύχουμε ομοιόμορφη τραχύτητα στις επιφάνειες. Αναλυτικότερα, τα δείγματα αποκτούν τραχύτητα βάθους 18-25 μm, με κατεργασία σε αντιδραστήρα πλάσμα με τις εξής





συνθήκες: RIE 10mTorr, 400W, 50sccm, για συνολικό χρόνο 12 λεπτά με βήμα των 2 λεπτών και με άνοιγμα του αντιδραστήρα στο ενδιάμεσο των βημάτων.



Επειδή η τραχύτητα φαίνεται να λειτουργεί σαν μέθοδος και ακολουθείται μια επαναληψιμότητα στο χρόνο, εξετάσαμε δύο περιπτώσεις:

1. Να έχουμε τραχύτητα σε μια επιφάνεια, δηλαδή σε ένα από τα δύο δοκίμια και
2. Να έχουμε τραχύτητα σε δύο επιφάνειες, δηλαδή και στα δύο δοκίμια και αυτές να έρχονται σε επαφή.

Συγκεντρωτικά, τα δεδομένα σε ένα πίνακα για τα πειράματα που έχουν **τραχύτητα μόνο στη μία πλευρά** της επιφάνειάς τους.

**Πίνακας 5.13**



Αριθμός Πειράματος (#)	Πλάτος Ταλάντωσης (μm)	Δύναμη συγκόλλησης (Newton)	Χρόνος Συγκόλλησης (sec)	Ενέργεια Συγκόλλησης (Joule)	Εικόνα πειράματος
520	3.5	120	1.157	50	
521	3.5	120	3.308	100	
522	3.5	120	6.552	150	
523	3.5	120	5.272	200	

524	3.5	120	8.896	250	
525	3.5	120	8.333	300	





Όπως φαίνεται και παραπάνω τα πειράματα 520, 521 και 522 φαίνονται να έχουν αρκετά καλά αποτελέσματα, παρά τη μικρή ενέργεια συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι τα αντίστοιχα πειράματα με τις ίδιες συνθήκες (τα οποία δεν παρατίθενται σε εικόνες) χωρίς τραχύτητα δεν εμφανίζουν τα ίδια ποσοστά συγκόλλησης. Άρα, η απόδοση τραχύτητας, όντως αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα συγκόλλησης.

Τα αντίστοιχα με τραχύτητα **και στις δύο πλευρές** είναι τα πειράματα υπ' αριθμόν 534 έως 539 στον αντίστοιχο πίνακα 5.14.

**Πίνακας 5.14**

Αριθμός Πειράματος (#)	Πλάτος Ταλάντωσης (μm)	Δύναμη συγκόλλησης (Newton)	Χρόνος Συγκόλλησης (sec)	Ενέργεια Συγκόλλησης (Joule)	
534	3.5	120	2.248	100	
535	3.5	120	3.917	150	



536	3.5	120	5.331	200	
537	3.5	120	5.332	200	
538	3.5	120	7.726	250	
539	3.5	120	7.262	300	

Σ' αυτή την περίπτωση, είτε δηλαδή έχουμε τραχύτητα στη μία μόνο πλευρά, είτε έχουμε τραχύτητα και στις δύο πλευρές, παρατηρείται ότι έχουμε αρκετά μεγάλο ποσοστό συγκόλλησης, με το μειονέκτημα να παραμένει η ανομοιομορφία της κατανομής της ενέργειας, με άμεσο αποτέλεσμα της, τη συγκόλληση σε τυχαία σημεία και τη παρουσία καψιμάτων και φυσαλίδων.



Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι δεν βοηθάει σημαντικά η τραχύτητα και στις δύο πλευρές αφού έχουμε μικρότερο (σε ορισμένες περιπτώσεις), είτε ίδιο ποσοστό συγκόλλησης στις ίδιες συνθήκες.

Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση που έχουμε προσδώσει τραχύτητα με γυαλόχαρτο και δοκιμάζουμε στη λογική των πολλαπλών βημάτων. Προσδίδουμε ενέργεια 100 Joule σε κάθε βήμα, και συνολικά 400 Joule, σε τέσσερα ξεχωριστά πειράματα, όπου το κέρασ συγκόλλησης ανεβαίνει και ξανακατεβαίνει για να εκτελέσει το επόμενο πείραμα. Ο χρόνος μεταξύ των πειραμάτων είναι ένα δευτερόλεπτο. Η δύναμη συγκόλλησης είναι 240 N και η δύναμη συγκράτησης είναι 500 N. Το πλάτος

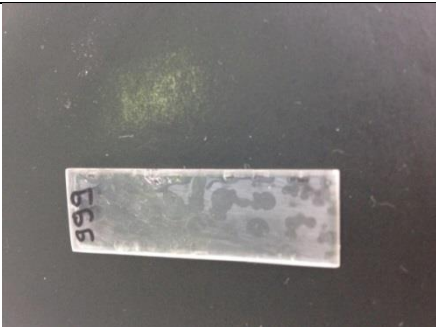

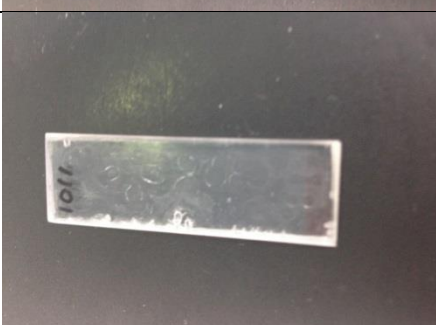


ταλάντωσης αυξάνεται με βήμα 0.5, από αρχικό 3.5  $\mu\text{m}$  και φτάνουμε ως τα 7  $\mu\text{m}$ .

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα πειράματα 936 και 967 σε αντίστοιχα πλάτη ταλάντωσης 6.5 και 7  $\mu\text{m}$ . Στα συγκεκριμένα παρατηρούμε ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό συγκόλλησης, αλλά με ανομοιομορφίες και τοπικές συγκολλήσεις υπό μορφή κηλίδων. Συνεχίζουμε στην ίδια λογική με προδιδόμενη ενέργεια 150 Joule σε κάθε βήμα αντί για 100. Συνολική ενέργεια 600 Joule. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα πειράματα 999 και τα 1007,1011 σε αντίστοιχα πλάτη ταλάντωσης 5 και 5.5  $\mu\text{m}$ . Τέλος, αυξάνουμε την ενέργεια κάθε βήματος από 150 Joule σε 200 Joule. Συνολική ενέργεια 800 Joule. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα πειράματα 1027 και τα 1038 σε αντίστοιχα πλάτη ταλάντωσης 3.5 και 4.5  $\mu\text{m}$ . Όλα τα παραπάνω βρίσκονται στο παρακάτω πίνακα 5.15.

**Πίνακας 5.15**

Αριθμός Πειράματος	Πλάτος ταλάντωσης ( $\mu\text{m}$ )	Δύναμη Συγκόλλησης (Newton)	Ενέργεια (Joule)	Χρόνος συγκόλλησης (sec)	Εικόνα πειράματος
963	6.5	240	100 + 100 + 100 + 100 (400)	0.541 + 0.511 + 0.596 + 0.596	
967	7	240	100 + 100 + 100 + 100 (400)	0.525 + 0.452 + 0.563 + 0.509	



999	5	240	150 + 150 + 150 + 150 (600)	2.519 + 2.114 + 2.979 + 2.998	
1007	5.5	240	150 + 150 + 150 + 150 (600)	0.525 + 0.452 + 0.563 + 0.509	
1011	5.5	240	150 + 150 + 150 (450)	2.305 + 2.196 + 3.092	
1027	3.5	240	200 + 200 + 200 + 200 (800)	5.053 + 5.428 + 4.749 + 5.475	
1038	4.5	240	200 + 200 + 200 + 200 (800)	2.751 + 2.334 + 3.518 + 3.605	

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνουμε την ενέργεια, λαμβάνουμε καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, η τραχύτητα με γυαλόχαρτο φαίνεται να λειτουργεί σαν γρήγορη μέθοδος επιβολή ενεργειακών μικροκατευθυντών και απαιτείται μια καλύτερη διερεύνηση στις συνθήκες συγκόλλησης.

### 5.2.3 με διαλύτη για το PMMA με χοντρό καπάκι

Σε προσπάθεια αναπαραγωγής των πειραμάτων των Wang το 2010 (Zhang, Wang et al. 2010), χρησιμοποιήσαμε διαλύτη για να επιτύχουμε μια καλύτερη συγκόλληση. Μιμούμαστε τους κινέζους ευρενητές στις συνθήκες, με ίδια ποσότητα διαλύτη: ισοπροπανόλη. Οι αντίστοιχες συνθήκες είναι στα 4  $\mu\text{m}$  πλάτος ταλάντωσης, με 200 N δύναμη ταλάντωσης και χρόνος συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα. Οι διαστάσεις που χρησιμοποίησαν οι κινέζοι είναι 27 mm \* 55 mm = 1377 mm<sup>2</sup> και τοποθέτησαν 150  $\mu\text{L}$  ισοπροπανόλης. Σε αντιστοιχία με τα δικά μας τεμάχια που είναι 14.5 mm \* 44.5 mm θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε περίπου 70.28  $\mu\text{L}$ . Χρησιμοποιούμε 80  $\mu\text{L}$  με προσεκτική εναπόθεση με χρήση πιπέτας.

Επίσης, εξετάζεται η χρήση ακετόνης σαν διαλύτη, όπου έχουμε πολύ καλό ποσοστό συγκόλλησης, αν και η ακετόνη προσβάλλει το PMMA. Επίσης, δοκιμάζεται μίγμα ακετόνης και προπανόλης σε ποσοστά 25% και 75% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά, αν και τελικά προτιμάται η χρήση μόνο της προπανόλης.

Στα παρακάτω δείγματα που παρουσιάζονται γίνεται χρήση ακετόνης σαν διαλύτη σε πλάτος ταλάντωσης 4.4  $\mu\text{m}$  και δύναμη συγκόλλησης 200N. Το Trigger force ήταν 120 N, το Touch force 200 N και το Hold force 550 N για 30 δευτερόλεπτα. Στο πείραμα 1596 και στο 1597 είχαμε χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα και ενέργειες συγκόλλησης 313 και 397 αντίστοιχα.



Εικόνα 84 Πείραμα 1596 με διαλύτη ακετόνη

Η θαμπάδα μας δείχνει ότι ο συγκεκριμένος διαλύτης προσβάλλει το συγκεκριμένο υλικό. Βέβαια, φαίνεται να έχουμε μια πολύ ισχυρή κόλληση και τα δύο σώματα να έχουν γίνει ένα.



Εικόνα 85 πείραμα 1597 με διαλύτη ακετόνη

Στο πείραμα 1598, το μηχάνημα εμφάνισε σφάλμα, το «Frequency Below Limit», και η συγκόλληση σταμάτησε σε χρόνο 2 δευτερόλεπτα και έλαβε ενέργεια 150 Joule. Παρ' όλα αυτά, επειδή ο διαλύτης ακετόνη προσβάλλει το PMMA, φαίνεται να έχουμε μια αρκετή καλή συγκόλληση, παρά τη μικρή ενέργεια.



**Εικόνα 86 πείραμα 1598 με διαλύτη ακετόνη**

Στα επόμενα δύο πειράματα που παρατίθενται χρησιμοποιήθηκε μίγμα προπανόλης και ακετόνης ως διαλύτης. Το συγκεκριμένο μίγμα περιέχει 75% προπανόλη και 25% ακετόνη, όπως αναφέρεται και παραπάνω.

Στο επόμενο πείραμα 1631 που παρατίθεται είχαμε συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 5.0 μm, και αυξανόμενη δύναμη συγκόλλησης που αρχικά ήταν 150 N, μετά από 5 δευτερόλεπτα αυξανόταν σε 200 N και τα τελευταία 6 δευτερόλεπτα είχε τη τιμή 200 N. Συνολικός χρόνος συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα. Το trigger force είχε τιμή 120 N, το Touch force 200 N, ενώ το Hold force 500 N για 30 δευτερόλεπτα. Η ενέργεια συγκόλλησης ήταν 1516 Joule.



**Εικόνα 87 πείραμα 1631 με διαλύτη μίγμα προπανόλης- ακετόνης**

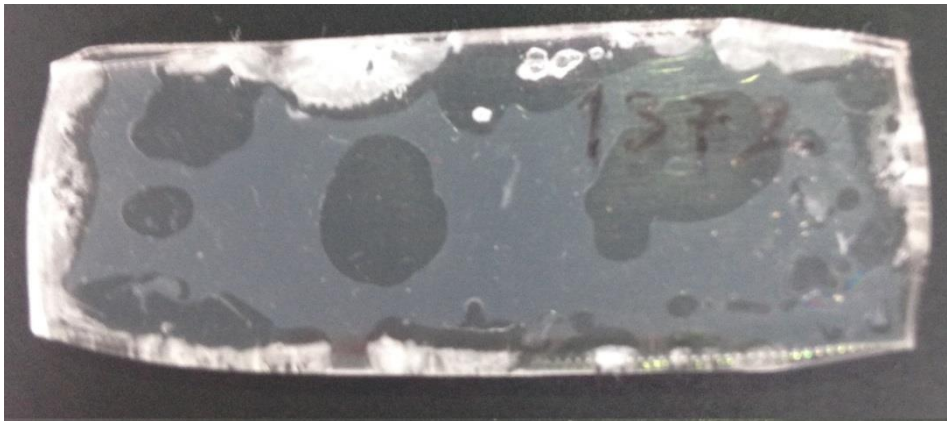
Στο επόμενο πείραμα 1639 που παρατίθεται είχαμε συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4.3 μm, και δύναμη συγκόλλησης 200 N, με συνολικό χρόνο συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα. Το trigger force είχε τιμή 120 N, το Touch force 200 N, ενώ το Hold force 500 N για 30 δευτερόλεπτα. Η ενέργεια συγκόλλησης ήταν 723 Joule.





**Εικόνα 88 Πείραμα 1639 με διαλύτη μίγμα προπανόλης- ακετόνης**

Με χρήση μόνο προπανόλης είναι τα παρακάτω δείγματα σε συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4.4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, Trigger force 120 N, Touch force 200 N, και Hold Force 550 N για 30 δευτερόλεπτα.



**Εικόνα 89 Πείραμα 1572 πλάτος ταλάντωσης 4.4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, Χρόνος 10 δευτερόλεπτα, Ενέργεια 568 J**



**Εικόνα 90 Πείραμα 1572 πλάτος ταλάντωσης 4.4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, Χρόνος 10 δευτερόλεπτα, Ενέργεια 500 J**

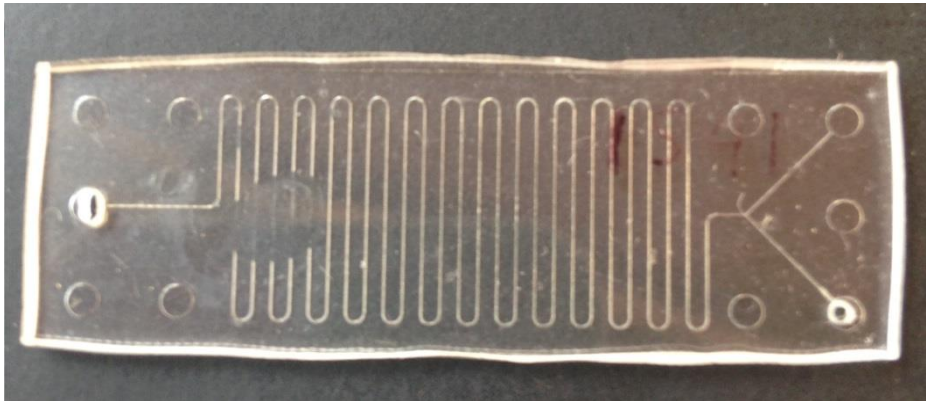
Παρατηρούμε ότι ενώ έχουμε κάποιες θερμικές παραμορφώσεις, φαίνεται να έχουμε μια ένα αρκετό μεγάλο ποσοστό συγκόλλησης στο πείραμα 1595.

#### 5.2.4 με λεπτό καπάκι για το PMMA

Εξετάζεται η περίπτωση που ένα εκ των δύο συγκολλούμενων δοκιμίων είναι ένα λεπτό φιλμ πάχους 0.3 mm. Η λογική είναι πως το συγκεκριμένο λεπτότερο καπάκι θα οδηγήσει σε μια καλύτερη ποιότητα συγκόλλησης, αφού οι υπέρηχοι θα πρέπει να διανύσουν μικρότερη απόσταση από όταν χρησιμοποιούμε δύο δοκίμια πάχους 2 mm.

Δυστυχώς, όπως φαίνεται και παρακάτω, η αλλαγή σε λεπτό καπάκι δεν φαίνεται να βελτιώνει σημαντικά τη συγκόλληση, αφού σε πολλές από τις περιπτώσεις όπου προσδίδεται μεγάλη ενέργεια, αποκτά μια ψαθυρότητα.

Παρακάτω παρατίθεται το πείραμα 1541 με πλάτος ταλάντωσης 4.0 μm, δύναμη συγκόλλησης 200 N, για χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερολέπτων, όπου έλαβε ενέργεια 720 Joule. Η δεξιά πλευρά στην φωτογραφία φαίνεται ότι δεν έχει κολλήσει καθόλου, ενώ στην αριστερή παρατηρούμε μόνο μια σημειακή συγκόλληση.



**Εικόνα 91 Πείραμα 1541 1572 πλάτος ταλάντωσης 4.0 μm, δύναμη συγκόλλησης 200 N, Χρόνος 10 δευτερόλεπτα, Ενέργεια 720 J**

Στο πείραμα 1621 είχαμε τις εξής συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4.3 μm, δύναμη συγκόλλησης 200 N, χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα και ενέργεια 633 Joule.



**Εικόνα 92 Πείραμα 1621 πλάτος ταλάντωσης 4.3 μm, δύναμη συγκόλλησης 200 N, χρόνος συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα και ενέργεια 633 Joule**

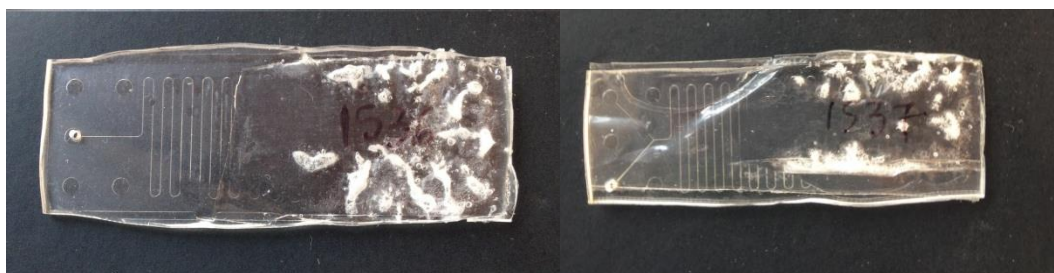
Πάλι, φαίνεται ότι με χρήση διαλύτη αυξάνονται τα ποσοστά της συγκόλλησης. Η ροή μέσα στο κανάλι μας υποδεικνύει να κινηθούμε σε μικρότερες ενέργειες συγκόλλησης.

### 5.2.5 με λεπτό καπάκι και διαλύτη

Εξετάζεται η περίπτωση που χρησιμοποιείται διαλύτης ισοπροπανόλης σε δοκίμια PMMA, που το ένα εξ αυτών είναι λεπτό φιλμ πάχους 0.3 mm.

Στα παρακάτω πειράματα παρατηρείται ότι το λεπτό φιλμ έχει εφαρμόσει αρκετά καλά πάνω στη κυρίως επιφάνεια επίσης μικρορευστονικής διάταξης, αλλά στη δεξιά πλευρά επίσης φαίνεται στην εικόνα 112 το λεπτό φιλμ έχει λιώσει και έχει ρεύσει μέσα στη μικρορευστονική διάταξη. Επίσης, τα άσπρα στίγματα που εμφανίζονται σαν καψίματα, υποδηλώνουν ότι το υλικό έχει παραμορφωθεί σε σημείο που κρυσταλλοποιείται. Το άμεσο συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε είναι ότι το λεπτό φιλμ γίνεται πιο ψαθυρό με την εφαρμογή υπερήχων από ότι το κάτω μέρος που έχει πάχος 2 mm.

Οι συνθήκες διεξαγωγής των συγκεκριμένων πειραμάτων ήταν: πλάτος ταλάντωσης 5.0  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N και ενέργεια συγκόλλησης 1200 Joule. Το πείραμα 1536 έφτασε τη συγκεκριμένη ενέργεια σε χρόνο 10.378 δευτερόλεπτα, ενώ το 1537 σε χρόνο 11.096 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 93 Πειράματα 1536 και 1537 με διαλύτη ισοπροπανόλη

Παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ενέργειας στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου, πιθανώς αποτέλεσμα κακής ευθυγράμμισης του κέρατος συγκόλλησης με τη βάση συγκράτησης.

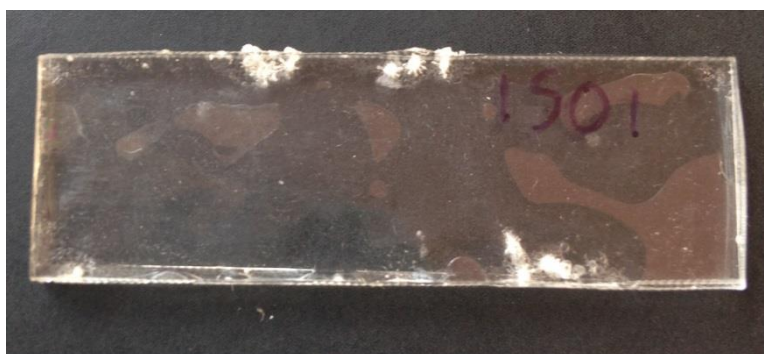
### 5.3 Πειράματα συγκόλλησης με τη χρήση ελαστικού υποστρώματος βελτίωσης της επιπεδότητας για το PMMA

Δοκιμάζουμε χρήση ελαστικού υποστρώματος με λειτουργία ως «μαξιλαράκι». Συγκεκριμένα, ένα λεπτό φύλλο PDMS πάχους 0.3 mm, τοποθετείται κάτω από λεπτό φύλλο πυριτίου πάχους 0.5 mm. Έτσι, εξομαλύνουμε τυχόν ανομοιομορφίες της βάσης που προκαλούν προβλήματα στη συγκόλληση. Βέβαια το λεπτό φύλλο PDMS λειτουργεί σαν αποσβεστήρας για τις ταλαντώσεις και έτσι χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για να επιτύχουμε την ίδια συγκόλληση χωρίς «μαξιλάρι». Δοκιμάζουμε με και χωρίς μαξιλάρι. Για την ίδια ποιότητα συγκόλλησης αποδεικνύεται απαιτείται παραπάνω ενέργεια με το «μαξιλάρι» που λειτουργεί ως ελατήριο, αφού το στρώμα PDMS απορροφά μέρος της ενέργειας.

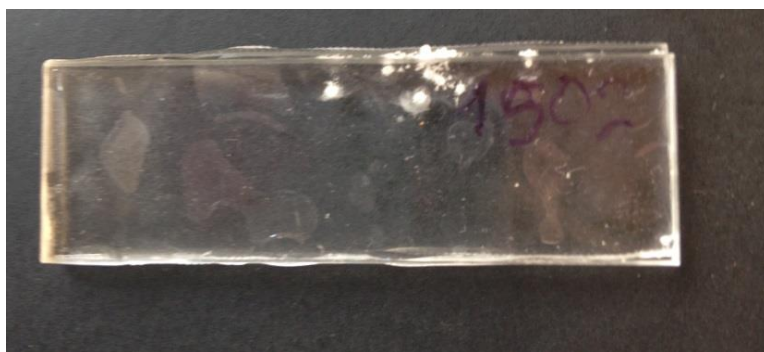
Δοκιμάζουμε με «μαξιλάρι» για πλάτος ταλάντωσης 4  $\mu\text{m}$ , με 200 N δύναμη συγκόλλησης, για πάνω από 13 δευτερόλεπτα και για 800 και 1000 joule αποδιδόμενη ενέργεια έχουμε πολύ καλά αποτελέσματα.



Εφαρμόζουμε ενέργεια συγκόλλησης 1000 έως 1500 joule για 4, 4.5 και 5 πλάτος ταλάντωσης για να εξεταστεί η ποιότητα της συγκόλλησης και πάλι έχω αρκετά καλά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το πείραμα 1501 έχει συνθήκες πλάτος ταλάντωσης 5.0 μm, δύναμη συγκόλλησης 400 N και έλαβε ενέργεια συγκόλλησης 1500 Joule σε 12.335 δευτερόλεπτα. Το πείραμα 1502 έχει συνθήκες πλάτος ταλάντωσης 4.5 μm, δύναμη συγκόλλησης 400 N και έλαβε ενέργεια συγκόλλησης 1498 Joule σε 16 δευτερόλεπτα. Και τα δύο αυτά πειράματα έγιναν με προγραμματισμό μηχανής ADEPT.



**Εικόνα 94 Πείραμα 1501 πλάτος ταλάντωσης 5.0 μm, δύναμη συγκόλλησης 400 N και έλαβε ενέργεια συγκόλλησης 1500 Joule σε 12.335 δευτερόλεπτα**



**Εικόνα 95 Πείραμα 1502 πλάτος ταλάντωσης 4.5 μm, δύναμη συγκόλλησης 400 N και έλαβε ενέργεια συγκόλλησης 1498 Joule σε 16 δευτερόλεπτα**

Επίσης, εξετάζονται και άλλες περιπτώσεις με μεγάλη ενέργεια συγκόλλησης. Πραγματοποιούνται πειράματα σε μεγάλο πλάτος ταλάντωσης 6 και 8 μm, αλλά για πολύ μικρούς χρόνους συγκόλλησης. Το επόμενο πείραμα έγινε με 8 μm για χρόνο 1.4 δευτερόλεπτα και με 6 μm πλάτος ταλάντωσης για 1.6 δευτερόλεπτα και έλαβε ενέργεια 323 και 154 Joule αντίστοιχα. Η δύναμη συγκόλλησης είναι 200 N και στα δύο συνεχόμενα πειράματα. Το ποσοστό της συγκόλλησης είναι από τα μεγαλύτερα που έχουν επιτευχθεί σε όλες τις σειρές πειραμάτων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

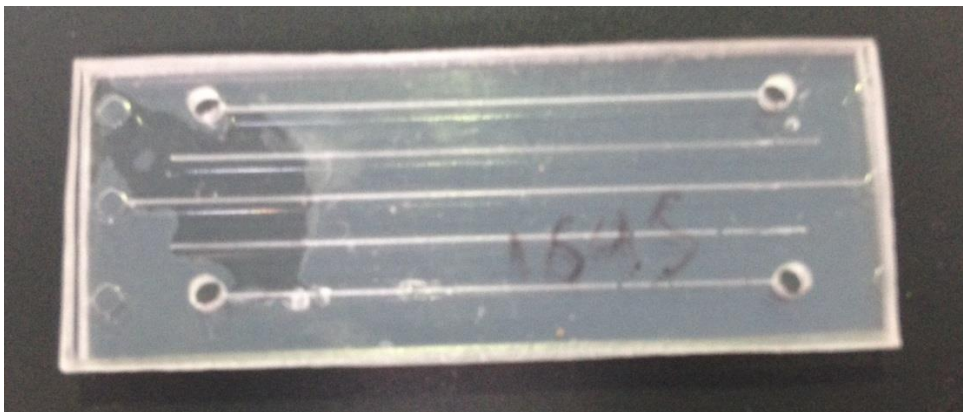


Εικόνα 96 Πείραμα μεγάλου πλάτους ταλάντωσης και μικρού χρόνου συγκόλλησης με "μαξιλάρι"

Επειδή όμως σε επανάληψη των παραπάνω πειραμάτων δεν επαναλήφθηκε το παραπάνω αποτέλεσμα αλλά είχαμε μικρότερα ποσοστά κόλλησης, εγκαταλείφθηκε το συγκεκριμένη προσέγγιση.

### 5.3.1. Με προθέρμανση για το PMMA

Σε αυτή τη περίπτωση δεν πραγματοποιήθηκαν πολλά πειράματα. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το πείραμα 1695, με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 3.8  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 120 N, και πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια των 10 δευτερολέπτων. Στο 1<sup>ο</sup> στάδιο έλαβε ενέργεια 374 Joule και στο 2<sup>ο</sup> στάδιο έλαβε ενέργεια 509 Joule.



Εικόνα 97 Πείραμα 1695 : πλάτος ταλάντωσης 3.8  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 120 N

### 5.3.3 Με διαλύτη για το PMMA με λεπτό καπάκι

Τα επόμενα πειράματα πραγματοποιούνται με χρήση διαλύτη στη διεπιφάνεια με ένα από τα δοκίμια να είναι λεπτό φιλμ πάχους 0.3 mm. Ο διαλύτης που εξετάζεται είναι η ισοπροπανόλη, με βάση τη βιβλιογραφία. Η ποσότητα δηλαδή της ισοπροπανόλης είναι 80  $\mu\text{L}$ .

Εξετάζονται οι περιπτώσεις κοντά στην περιοχή λειτουργίας, δηλαδή για πλάτος

ταλάντωσης 4 και 5  $\mu\text{m}$ , για 200 N δύναμη συγκόλλησης. Δίνεται ενέργεια 1200 Joule και σε μια δεύτερη σειρά δίνεται χρόνος συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα. Δυστυχώς, δεν έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα αφού έχουμε κόλληση και κάψιμο μόνο στη μία μεριά του δοκιμίου με την άλλη να μην έχει κολλήσει καθόλου.

Για πλάτος ταλάντωσης 4  $\mu\text{m}$  έως 4.4  $\mu\text{m}$  και δύναμη συγκόλλησης 200 N και εκτελούμενο χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα, λαμβάνουμε ενέργειες από 424 έως 760 Joule. Χαρακτηριστικά είναι τα πειράματα 1578 και 1579 με πλάτος ταλάντωσης 4.4  $\mu\text{m}$ , που αν και δεν έχουμε ομοιόμορφη συγκόλληση, στα σημεία που έχει κολλήσει έχουμε μια αρκετή στιβαρή συγκόλληση, αν και παρατηρείται ροή λιωμένου υλικού και μέσα στη μικρορευστονική διάταξη.

Με συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 4.0  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα και ενέργεια συγκόλλησης 696 Joule, το πείραμα 1557 φαίνεται να έχει κολλήσει μόνο στη μέση και να έχει χαθεί η μικρορευστονική διάταξη σε ορισμένα σημεία. Η δύναμη συγκράτησης ήταν ρυθμισμένη στα 200 N για 30 δευτερόλεπτα.



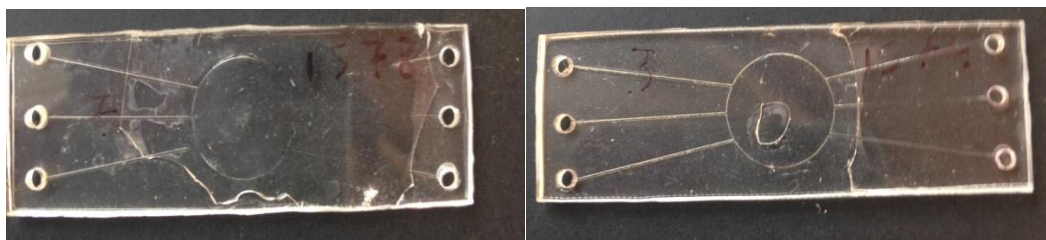
**Εικόνα 98 Πείραμα 1557 με χρήση διαλύτη ισοπροπανόλη**

Με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες, με μόνη διαφορά τη δύναμη συγκράτησης ρυθμισμένη στα 400 N, το πείραμα 1564 έλαβε ενέργεια συγκόλλησης 723 Joule. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ότι έχει κολλήσει σε πολύ μεγάλο ποσοστό η αριστερή πλευρά, χωρίς να χαθεί η μικρορευστονική διάταξη, αλλά η δεξιά πλευρά δεν έχει κολλήσει καθόλου.



**Εικόνα 99 Πείραμα 1564 με χρήση διαλύτη**

Το πλάτος ταλάντωσης είναι 4.4  $\mu\text{m}$  στα επόμενα πειράματα. Στην περίπτωση του πειράματος 1578 όπου έχει κολλήσει καλά το φιλμ έχει χαθεί και η μικρορευστονική διάταξη. Στο πείραμα όμως 1579 δεν συμβαίνει αυτό. Και στα δύο όμως πειράματα η αποκόλληση του λεπτού στρώματος ήταν πολύ εύκολη στις περιοχές που δεν είχε κολλήσει.



Εικόνα 114 Πείραμα 1578 και πείραμα 1579 με χρήση διαλύτη

Με λεπτό καπάκι και χρήση διαλύτη πάνω στη διάταξη PDMS – πυριτίου, εμφανίζονται τα ίδια προβλήματα όπως και χωρίς τη συγκεκριμένη διάταξη, με το φιλμάκι να μην κολλάει σε όλη την επιφάνεια, και να αποκτά μια ψαθυρότητα όταν λάβει μεγάλη ενέργεια συγκόλλησης. Σε όλα τα δείγματα, τοποθετείται διαλύτης ισοπροπανόλη, ποσότητας 80  $\mu\text{L}$ , με χρήση ειδικής πιπέτας.

Τέλος, για το πείραμα 1568 είχαμε πλάτος ταλάντωσης 4.4  $\mu\text{m}$ , δύναμη συγκόλλησης 200 N, δύναμη συγκράτησης 550 N για 30 δευτερόλεπτα και το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερολέπτων και έλαβε 721 Joule ενέργειας στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

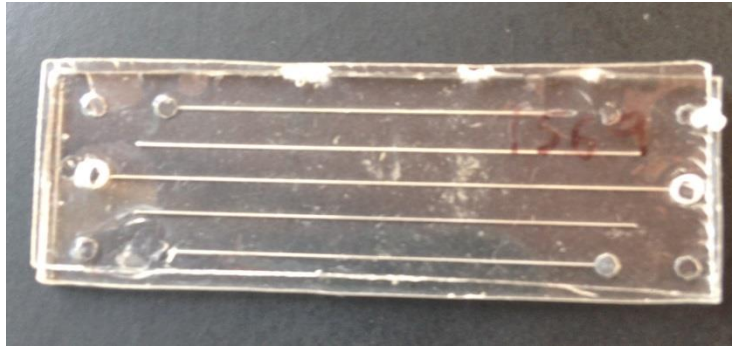


Εικόνα 100 Πείραμα 1568 με χρήση διαλύτη ισοπροπανόλη

### 5.3.4 Διαλύτης σε χοντρό καπάκι PMMA

Τα πλάτη ταλάντωσης που εξετάζονται είναι: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 και 4.5 ενώ η δύναμη συγκόλλησης είναι 200 N. Συγκεκριμένα το παρακάτω πείραμα είναι με συνθήκες: 4.4  $\mu\text{m}$  πλάτος ταλάντωσης, δύναμη συγκόλλησης 200 N, χρόνο συγκόλλησης 10 δευτερόλεπτα και ενέργεια συγκόλλησης 691 Joule. Αν και υπάρχουν μικροκαωίματα και αλλοιώσεις στην επιφάνεια, έχει κολλήσει το μεγαλύτερο μέρος των δοκιμίων.





**Εικόνα 101 Πείραμα 1569 με χρήση διαλύτη ισοπροπανόλη**

Στα 5  $\mu\text{m}$  πλάτος ταλάντωσης με δύναμη που μειώνεται σταδιακά ανά 5 δευτερόλεπτα και έχει τις τιμές 250 N, 200 N και τα τελευταία 6 δευτερόλεπτα έχει τιμή 150 N. Συνολικός χρόνος συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα. Οι συγκεκριμένες συνθήκες αφορούν το πείραμα 1535 που παρατίθεται στη παρακάτω εικόνα και έχει πολύ μεγάλο ποσοστό κόλλησης, και δεν έχουν χαθεί οι μικρορευστονικές διατάξεις. Σε κάποια σημεία που δεν υπάρχει κανάλι, είναι λόγω του master αποτύπωσης, που έχει αλλοιωθεί και “τυπώνει” έτσι τη μικρορευστονική διάταξη.



**Εικόνα 116 Πείραμα 1535**

Με χρήση προπανόλης 80  $\mu\text{L}$  στη διεπιφάνεια και σε συνθήκες 4.3  $\mu\text{m}$ , με δύναμη συγκόλλησης 200 N και χρόνο συγκόλλησης 16 δευτερόλεπτα έχουμε μια ομοιόμορφη συγκόλληση. Στην παρακάτω περίπτωση (πείραμα 1622) έχει λιώσει βέβαια το κανάλι το οποίο είναι 90  $\mu\text{m}$ , αλλά τα δύο δοκίμια έχουν γίνει ένα συσσωμάτωμα με πολύ δυνατούς δεσμούς.



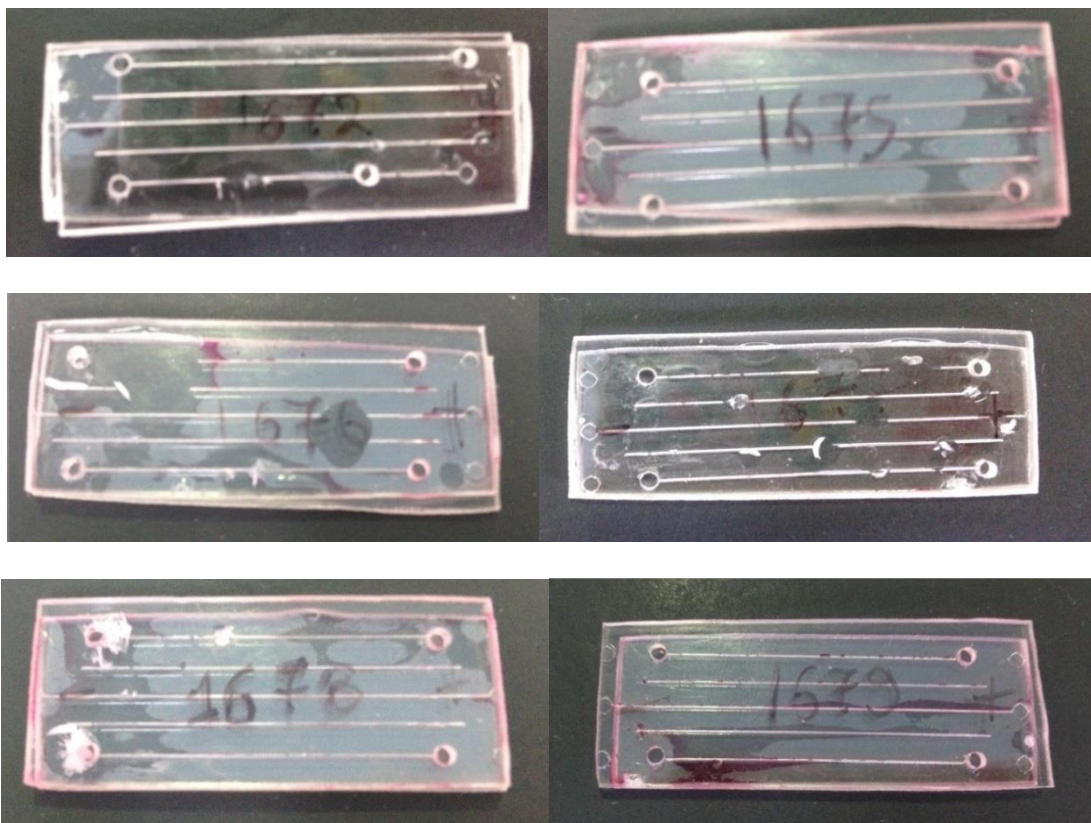
**Εικόνα 102 πείραμα 1622 με χρήση διαλύτη ισοπροπανόλη**

Στα επόμενα πειράματα τα δοκίμια αφήνονται μέσα σε διάλυμα προπανόλης για 10 λεπτά. Στη συνέχεια, ρίχνουμε στη διεπιφάνεια 100μL για 1 λεπτό. Οι συνθήκες είναι 4 μm πλάτος ταλάντωσης και ο χρόνος συγκόλλησης ο μέγιστος δηλαδή 16 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 118 Εμβαπτισμένα σε διαλύτη δείγματα πριν τη συγκόλληση

Τα επόμενα πειράματα πραγματοποιούνται με πλάτος ταλάντωσης από 4 μm και καταλήγουν στα 3.4 μm και η δύναμη ταλάντωσης είναι 110 N. Στόχος είναι να βρούμε την ελάχιστη περιοχή όπου πραγματοποιείται συγκόλληση με διαλύτη χωρίς να έχουμε λιώσιμο υλικού. Δυστυχώς οι συγκεκριμένες συνθήκες δεν είναι ικανοποιητικές αφού έχουμε διαρροή και καυίματα. Επίσης, δεν έχουμε συγκόλληση σ' όλη την επιφάνεια. Εξαιρέση αποτελεί το πείραμα 1672 που έχει αρκετά μεγάλο ποσοστό συγκόλλησης με λιώσιμο μόνο στη κάτω πλευρά και ροή υλικού μέσα στη μικρορευστονική διάταξη.



Εικόνα 119 Πειράματα με χρήση διαλύτη προπανόλη



Τα τελευταία πειράματα πραγματοποιούνται σε συνθήκες: πλάτος ταλάντωσης 3.8 και 3.9  $\mu\text{m}$  και δύναμη ταλάντωσης 110 N και 120 N. Οι χρόνοι συγκόλλησης είναι είτε 16 δευτερόλεπτα, είτε 10 και μετά άλλα 10 δευτερόλεπτα. Στα 16 δευτερόλεπτα έχουμε ενέργεια γύρω στα 800 Joule (712, 700, 798, 914, 715, 848, 758, 790, 835). Στα 10 δευτερόλεπτα η ενέργεια είναι γύρω στα 500 Joule (484, 430, 441, 509, 474, 509, 571, 448).

Στην περίπτωση μας, δεν καταφέραμε να επιτύχουμε την “τέλεια” συγκόλληση, γιατί είχαμε περιορισμό στο χρόνο συγκόλλησης από το συγκεκριμένο μηχάνημα υπερήχων που διαθέτουμε, στα 16 δευτερόλεπτα. Αν υπήρχε η δυνατότητα να εκτελέσουμε τη συγκόλληση σε χρόνους 30 ή 60 δευτερολέπτων, θα φτάναμε λογικά στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

#### **5.4 Βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης για τις μικρορευστονικές διατάξεις PMMA**

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η περιοχή λειτουργίας για το PMMA, χωρίς τη χρήση βοηθητικού υποστρώματος, είναι για συνθήκες:

**Πίνακας 5.12**

Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	Μονάδα μεγέθους
Πλάτος ταλάντωσης	3.8 έως 4.5	$\mu\text{m}$
Δύναμη συγκόλλησης	120 έως 200	Newton
Δύναμη συγκράτησης	550	Newton
Χρόνος συγκράτησης	30	Seconds
Χρόνος συγκόλλησης	16	Seconds
Ενέργεια συγκόλλησης	1000	Joule

Η περιοχή λειτουργίας για το PMMA, με τη χρήση βοηθητικού υποστρώματος, είναι για συνθήκες:

**Πίνακας 5.13**

Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	Μονάδα μεγέθους
Πλάτος ταλάντωσης	3.8 έως 5.0	$\mu\text{m}$
Δύναμη συγκόλλησης	200 έως 450	Newton
Δύναμη συγκράτησης	550	Newton
Χρόνος συγκράτησης	30	Seconds
Χρόνος συγκόλλησης	16	Seconds
Ενέργεια συγκόλλησης	1500	Joule

Η χρήση διαλύτη ισοπροπανόλης σε ποσότητα 80  $\mu\text{L}$ , βοηθάει αρκετά στο να έχουμε μια ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας.

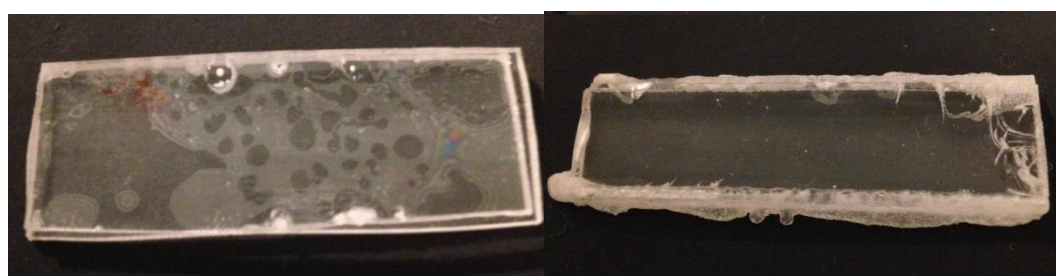
## **5.5 Πειραματικά αποτελέσματα συγκόλλησης για το πολυμερές κυκλολεφίνης COP**

Αλλάζοντας υλικό και χρησιμοποιώντας COP, τα αποτελέσματα της συγκόλλησης με υπερήχους φαίνονται καλύτερα. Παρ' όλα αυτά όμως, παρατηρείται αρχικά μια ασυνέπεια στην επαναληψιμότητα. Ο λόγος είναι η επιπεδότητα, όπως αυτή αναλύεται παραπάνω. Κατόπιν λοιπόν επεξεργασίας των δοκιμίων με τον ίδιο τρόπο όπως για το υλικό PMMA, λαμβάνουμε αρκετά καλά αποτελέσματα συγκόλλησης.

### **5.6.1 Χωρίς τη χρήση ελαστικού υποστρώματος βελτίωσης της επιπεδότητας για το COP**

Εξετάζονται συνθήκες για το πολυμερές COP, με 6,5  $\mu\text{m}$  amplitude, welding force 600 Newton, σταματώντας την ενέργεια στα 450, 600 και 750 Joule, είχαμε αξιοπρεπή αποτελέσματα συγκόλλησης. Παρατηρείται ότι το συγκεκριμένο υλικό αποδίδει καλύτερα και ποιοτικότερα αποτελέσματα συγκόλλησης, αλλά απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια για να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω.

Συγκεκριμένα, στο πείραμα 32 έχουμε προσδώσει 100 Joule, με πλάτος ταλάντωσης 3  $\mu\text{m}$  και δύναμη ταλάντωσης 120 N, ενώ στο πείραμα 6 (σε μια άλλη σειρά πειραμάτων) για πλάτος ταλάντωσης 5  $\mu\text{m}$  και δύναμη 500 N, έχουμε 1099 Joule σε χρόνο 10 δευτερολέπτων.



**Εικόνα 120 Πείραμα 32 και Πείραμα 6**

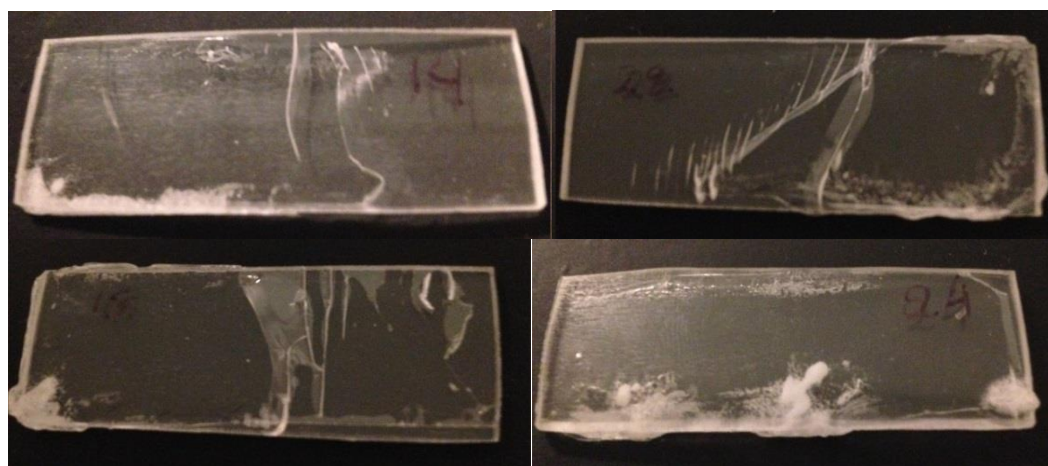
Παρατηρούμε ότι ενώ τα 100 Joule δεν αρκούν για να κολλήσουν μια ελάχιστη επιφάνεια του πολυμερούς PMMA, παρά μόνο για προθέρμανση στις συνθήκες του πειράματος 32, στο υλικό COP, δείχνουν ότι είναι πολύ κοντά στο να κολλήσει ένα μικρό μέρος της επιφάνειας. Για το επόμενο πείραμα 6 (δεξιά εικόνα), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα δυο δοκίμια έχουν γίνει ένα συσσωμάτωμα με ροή υλικού προς τις εξωτερικές πλευρές.

### 5.6.2 Με χρήση ελαστικού υποστρώματος βελτίωσης της επιπεδότητας για το COP

Πραγματοποιούνται πειράματα με πλάτος ταλάντωσης 5.8 μm δύναμη ταλάντωσης 450 και 500 N. Ο χρόνος συγκόλλησης είναι ο μέγιστος δηλαδή 16 δευτερόλεπτα και η ενέργεια τείνει στη μέγιστη δηλαδή στα 2500 Joule. Σε όλα τα πειράματα προσδίδονται πάνω από 2000 Joule.

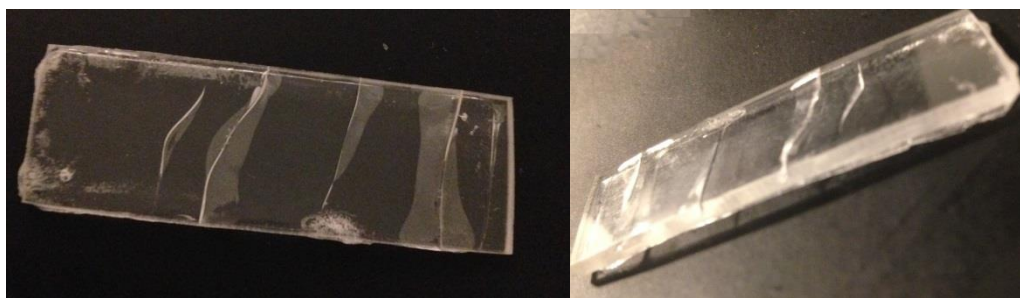
Για το COP πλέον με «μαξιλαράκι» από τα 6.3 μέχρι τα 5.5 amplitude και welding force από 550 έως 200 N παίρνουμε ενέργειες από 800 έως 2500 joule.

Ερευνάται η επίδραση που έχει το η διάταξη PDMS με το επίπεδο φύλλο πυριτίου κάτω από τα δοκίμια από υλικό COP. Παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά κόλλησης, και επίσης πάλι απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια στα δοκίμια από ότι χωρίς τη διάταξη. Τα επόμενα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη διάταξη αυτή και αντί για 2 δοκίμια πάχους 2 mm, δοκιμάστηκε το ένα εκ αυτών να είναι λεπτότερο στρώμα πάχους 0.3 mm (''φίλμ'' COP). Γενικά παρατηρείται ότι έχουμε μια διαύγεια στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας, αποτέλεσμα της καλής συγκόλλησης και διάφορες ρωγμές στο λεπτό φύλλο COP. Επίσης παρατηρείται ροή υλικού στα άκρα και εμφάνιση «καυίματος».



Εικόνα 121 Πειράματα με φιλμάκι COP

Στην παρακάτω εικόνα, όπως και στις προηγούμενες, παρατηρείται η καταπόνηση από τη συγκόλληση με υπερήχους, που φαίνεται στο συγκεκριμένο πείραμα ότι το ''φίλμ'' έχει καταστραφεί σε ορισμένα σημεία. Η καταστροφή αυτή φαίνεται ως κάθετες γραμμές στις εικόνες και οφείλεται στο λυγισμό/στρέβλωση του τεμαχίου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Το φαινόμενο της στρέβλωσης είναι λόγω του βίαιου φαινομένου της συγκόλλησης με υπερήχους και της απότομης αλλαγής της θερμοκρασιακής του κατάστασης (δεξιά εικόνα).



Εικόνα 122 ρωγμές στο λεπτό στρώμα COP και λυγισμένο δοκίμι μετά τη συγκόλληση (δεξιά εικόνα)

### 5.6 Βέλτιστες συνθήκες συγκόλλησης για τις μικρορευστονικές διατάξεις COP

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η περιοχή λειτουργίας για το COP, χωρίς τη χρήση βοηθητικού υποστρώματος, είναι για συνθήκες:

**Πίνακας 5.14**

Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	Μονάδα μεγέθους
Πλάτος ταλάντωσης	5 έως 5.5	μm
Δύναμη συγκόλλησης	300 έως 500	Newton
Δύναμη συγκράτησης	550	Newton
Χρόνος συγκράτησης	30	Seconds
Χρόνος συγκόλλησης	16	Seconds
Ενέργεια συγκόλλησης	1500	Joule

Η περιοχή λειτουργίας για το COP, με τη χρήση βοηθητικού υποστρώματος, είναι για συνθήκες:

**Πίνακας 5.15**

Παράμετρος	Τιμή Παραμέτρου	Μονάδα μεγέθους
Πλάτος ταλάντωσης	5.5 έως 6.5	μm
Δύναμη συγκόλλησης	450 έως 550	Newton
Δύναμη συγκράτησης	550	Newton
Χρόνος συγκράτησης	30	Seconds
Χρόνος συγκόλλησης	16	Seconds
Ενέργεια συγκόλλησης	2500	Joule

# Κεφάλαιο 6

---

## 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία δοκιμάσαμε να συγκόλλησουμε επιφάνειες δοκιμίων από πολυμερικά υλικά, το ένα εκ των οποίων έφερε μικροκανάλι. Αν και δεν επιτύχαμε ακόμη καλή και ομοιόμορφη συγκόλληση τα συμπεράσματα της εργασίας μπορούν να συνοψισθούν παρακάτω:

Όπως φαίνεται από τα πειράματα στο κεφάλαιο 5, με καλή προετοιμασία των δειγμάτων, καταφέρνουμε να αυξήσουμε την επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα μας και να μειώσουμε τον παράγοντα τυχαιότητα.

Η οποιαδήποτε ανομοιομορφία της επιφάνειας των δοκιμίων, στη συγκόλληση με υπερήχους λειτουργεί σαν ενεργειακός κατευθυντής. Έτσι, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδη η επιφάνεια, ώστε να υπάρχουν θεωρητικά “άπειροι” ενεργειακοί κατευθυντές. Συνεπώς, η απόδοση τραχύτητας σε μια από τις επιφάνειες προς συγκόλληση αυξάνει σημαντικά το ποσοστό της συγκόλλησης.

Η βάση της μηχανής συγκόλλησης θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτικά σχεδιασμένη. Αφενός η συγκράτηση των τεμαχίων θα πρέπει να είναι απόλυτα σταθερή ώστε να μην υπάρχει η παραμικρή μετακίνηση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και αφετέρου, θα πρέπει να έχουμε μια αρκετά λειασμένη και επίπεδη επιφάνεια στη βάση, όπου θα «πατάνε» τα δοκίμια και θα υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των υπερήχων.

Το πλάτος ταλάντωσης και η δύναμη συγκόλλησης έχουν εξίσου το ίδιο σημαντικό ρόλο στην επίδραση που έχουν σαν παράμετροι της συγκόλλησης. Υπερτερούν όμως και οι δύο σε σχέση με την παράμετρο της ενέργειας, η οποία αυξάνει με την αύξηση των δύο άλλων παραμέτρων.

Επίσης, η χρήση διαλύτη που δεν προσβάλλει το πολυμερές, αλλά το “μαλακώνει”, αυξάνει σημαντικά το ποσοστό της συγκόλλησης. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι η τραχύτητα και η χρήση διαλύτη συμβάλλουν σε μια ποιοτικότερη συγκόλληση και αυξάνουν το ποσοστό συγκόλλησης.

Η περίπτωση των πολλών βημάτων δεν βοηθάει σε καλύτερη συγκόλληση, καθώς η ενέργεια συσσωρεύεται στα ίδια σημεία με το προηγούμενο βήμα. Η περίπτωση των δύο μόνο βημάτων είναι όμως χρήσιμη, καθώς δεν παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο.

Ιδιαίτερη προσθήκη είναι η διάταξη που αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα PDMS και ένα λεπτό επίπεδο φύλλο πυριτίου. Το στρώμα PDMS βοηθά στην ισοκατανομή της πίεσης συγκόλλησης και την εφαρμογή των υπερήχων σ’ όλη τη μάζα της διάταξης. Το λεπτό φύλλο πυριτίου επιτρέπει την παράλληλη τοποθέτηση των δειγμάτων καθώς και την ανάκλαση των υπερήχων κατά τη διάρκεια της

συγκόλλησης. Προφανώς, απαιτείται περισσότερη ενέργεια με τη χρήση της παραπάνω διάταξης PDMS-πυριτίου, αφού το ελαστομερές λειτουργεί ως αποσβεστήρας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Η περιοχή λειτουργίας για συγκόλληση πολυμερούς PMMA με υπερήχους είναι για πλάτος ταλάντωσης 3.8 με 4.4  $\mu\text{m}$ , χωρίς τη χρήση ελαστικού υποστρώματος για βελτίωση της επιπεδότητας. Η δύναμη συγκόλλησης με εύρος τιμών από 100 έως 300 Newtons. Ο χρόνος συγκόλλησης είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, στην περίπτωση μας 16 δευτερόλεπτα, ενώ η ενέργεια συγκόλλησης θα πρέπει να φτάνει την τιμή των 1000 Joule. Η δύναμη συγκράτησης είναι κατά το δυνατόν η μεγαλύτερη (550 N), το ίδιο και ο χρόνος συγκράτησης (30 δευτερόλεπτα) μετά το πέρας της εφαρμογής υπερήχων.

Με τη χρήση του ελαστικού υποστρώματος για βελτίωση της επιπεδότητας, η περιοχή λειτουργίας είναι για πλάτος ταλάντωσης 3.8 με 5  $\mu\text{m}$ , η δύναμη συγκόλλησης κυμαίνεται σε εύρος τιμών από 200 έως 400 Newtons, ο χρόνος συγκόλλησης είναι 16 δευτερόλεπτα και η ενέργεια συγκόλλησης 1500 Joule.

Αντίστοιχα, η περιοχή λειτουργίας για συγκόλληση πολυμερούς COP με υπερήχους είναι για πλάτος ταλάντωσης 5.0 με 5.5  $\mu\text{m}$ , χωρίς τη χρήση ελαστικού υποστρώματος για βελτίωση της επιπεδότητας. Η δύναμη συγκόλλησης με εύρος τιμών από 300 έως 500 Newtons. Ο χρόνος συγκόλλησης είναι 16 δευτερόλεπτα, ενώ η ενέργεια συγκόλλησης θα πρέπει να φτάνει την τιμή των 1500 Joule. Η δύναμη συγκράτησης είναι κατά το δυνατόν η μεγαλύτερη (550 N), το ίδιο και ο χρόνος συγκράτησης μετά το πέρας της εφαρμογής υπερήχων (30 δευτερόλεπτα).

Με τη χρήση του ελαστικού υποστρώματος για βελτίωση της επιπεδότητας, η περιοχή λειτουργίας είναι για πλάτος ταλάντωσης 5.5 με 6.5  $\mu\text{m}$ , η δύναμη συγκόλλησης κυμαίνεται σε εύρος τιμών από 450 έως 550 Newtons, ο χρόνος συγκόλλησης είναι 16 δευτερόλεπτα και η ενέργεια συγκόλλησης 2500 Joule.



# Κεφάλαιο 7

---

## 7.1 Μελλοντική εργασία

Με βάση τα συμπεράσματα που έχουμε εξάγει για τη περιοχή λειτουργίας, απαιτείται να βρεθούν οι ακριβείς συνθήκες για μαζική συγκόλληση μικρορευστονικών διατάξεων, οποιουδήποτε μεγέθους. Έτσι, θα μπορεί να πραγματοποιείται συγκόλληση σε ελάχιστο χρόνο σε σύγκριση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο συγκόλλησης.

Θα πρέπει να γίνει μια αναπαράσταση της κατανομή της ενέργειας, καθώς και της καταπόνησης των δοκιμίων κατά τη διάρκεια εφαρμογής των υπερήχων. Το κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα για αυτό είναι το ANSYS. Η συγκεκριμένη αναπαράσταση έχει πραγματοποιηθεί ως τώρα μόνο σε μέταλλα, αλλά δεν έχει γίνει κάτι αντίστοιχο για τα πολυμερή (πλαστικά). Συνεπώς, προτείνω να γίνει με λεπτομερή ανάλυση για τη συγκόλληση με υπερήχους σε πολυμερή.

Το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS, είναι ικανό να πραγματοποιήσει το παραπάνω και για την πρόσθετη διάταξη ελαστικού υποστρώματος PDMS-πυριτίου, ώστε να καταγραφεί το ποσό της απορρόφησης της ενέργειας κατά τη διάρκεια εφαρμογής των υπερήχων, και επίσης τη καταπόνηση σε κύκλους φόρτισης. Μετά από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων φόρτισης, θα πρέπει να αντικατασταθεί με καινούργιο πολυμερές PDMS.

Όλες οι συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν και είχαν τα καλύτερα αποτελέσματα έγιναν με χρήση διαλύτη ή με χρήση κάποιας βοηθητικής συσκευής. Θεμιτό είναι λοιπόν να πραγματοποιηθεί συγκόλληση χωρίς τα παραπάνω. Γι' αυτό θα πρέπει να βρεθεί το ποσοστό του λιωσίματος και το ποσοστό του όγκου που ρέει μέσα στη μικρορευστονική διάταξη. Στη συνέχεια, θα μπορέσει να κατασκευαστεί μικρορευστονική διάταξη που να διαθέτει το ελάχιστο σε βάθος κανάλι.

Τέλος, θα πρέπει να γίνει διερεύνηση και για άλλα πολυμερή, εκτός του PMMA και του COP.

# Βιβλιογραφία –References

---

A. E. Read and G. D. Dean, Determination of Dynamic Properties of Polymers and Composites, John Wiley and Sons, New York (1978).

Composites." John Wiley and Sons.

Asseby, G. t. U. P. "<Guide To US Plastic Assembly.pdf>."

GROWTH SPEED DURING ENGRAVING SILICON WITH PLASMA FOR MICROFLUIDICS PROVISIONS Boulousis "<PhD Thesis - G. Boulousis.pdf>."

C.J. Aliosio, D. G. W., E.E. Whetsel (1972). "A Simplified Thermoviscoelastic Analysis of Ultrasonic Bonding." Brookfield SPE Technical Papers: 26-32.

Chan, W. X., et al. (2016). "Micro-ultrasonic welding using thermoplastic-elastomeric composite film." Journal of Materials Processing Technology **236**: 183-188.

D. Grewell, A. B. "Welding of PlasticsQ Fundamentals and New Developments."

Kim (2009). "<2009 - Kim - Ultrasonic Bonding for MEMS Sealing and Packaging.pdf>."

Luo, Y., et al. (2010). "Ultrasonic bonding for thermoplastic microfluidic devices without energy director." Microelectronic Engineering **87**(11): 2429-2436.

Ng, S. H., et al. (2009). "Microfluidic connectors by ultrasonic welding." Microelectronic Engineering **86**(4-6): 1354-1357.

P.G. Bruce, Solid State Ionics 179, 752 (2008), Chapter 2. Polymers, Solid State Ionics **179**: 752. "<Vorl4\_221111.pdf>."

ENGINEERING VISCOELASTICITY, David Roylance, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, October 24, 2001, "< visco.pdf>."

Siddiq, A. and E. Ghassemieh (2008). "Thermomechanical analyses of ultrasonic welding process using thermal and acoustic softening effects." Mechanics of Materials **40**(12): 982-1000.

Sun, Y., et al. (2012). "Micro energy director array in ultrasonic precise bonding for thermoplastic micro assembly." Journal of Materials Processing Technology **212**(6): 1331-1337.

Truckenmüller, R., et al. (2006). "An ultrasonic welding based process for building up a new class of inert fluidic microsensors and -actuators from polymers." Sensors and Actuators A: Physical **132**(1): 385-392.

Tsujino02 (2002). "<2002 - TSUJINO - WELDING CHARACTERISTICS OF 40 KHZ ULTRASONIC PLASTIC WELDING SYSTEM USING FUNDAMENTAL AND HIGHER RESONANCE FREQUENCY VIBRATIONS.pdf>."

Welding, P. D. f. U. "<PW-3\_Part\_Design\_for\_Ultrasonic\_Welding\_(single\_pgs)\_hr.pdf>."

"<Appendix 1, The Williams Landau Ferry (WLF) equation, Time Temperature Superposition.pdf>."

Zhang, Z., et al. (2010). "Thermal assisted ultrasonic bonding method for poly(methyl methacrylate) (PMMA) microfluidic devices." *Talanta* **81**(4-5): 1331-1338.

Application of Time-Temperature Superposition Principles to Rheology, "<RN011.pdf>."

Ιστοσελίδες

[https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic\\_welding](https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic_welding)

<https://www.herrmannultrasonics.com/en-us/home/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_welding](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_welding)

<http://www.tainst.com/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Συνθήκες κοπής LASER, σχεδιασμός τεμαχίων και μηχανολογικό σχέδιο μηχανής υπερήχων

#### Εξεταζόμενες συνθήκες κοπής στη μηχανή κοπής LASER

<b>0 - 100</b>	<b>Power</b>	<b>Speed</b>	<b>PPI</b>	<b>Z- Axis</b>
----------------	--------------	--------------	------------	----------------

#### Continuous Cast Acrylic

0	50%	8.7%	1000	2.10
25	75%	8.7%	1000	2.10
50	100%	8.7%	1000	2.10
75	100%	7%	1000	2.10
100	100%	5.8%	1000	2.10

#### Extrude Acrylic

0	50%	8.8%	1000	2.10
25	75%	8.8%	1000	2.10
50	100%	8.8%	1000	2.10
75	100%	7%	1000	2.10
100	100%	5.9%	1000	2.10

#### Polyster

0	50%	5.7%	300	2.10
25	75%	5.7%	300	2.10
50	100%	5.7%	300	2.10
75	100%	4.6%	300	2.10
100	100%	3.9%	300	2.10

#### Polycarbonate

0	50%	8.6%	250	2.10
25	75%	8.6%	250	2.10
50	100%	8.6%	250	2.10
75	100%	6.9%	250	2.10
100	100%	5.7%	250	2.10

#### Microsurface Plastic -> Microsurface -> Non Metallic

0	50%	10%	300	2.10
25	75%	10%	300	2.10
50	100%	10%	300	2.10
75	100%	8.6%	300	2.10
100	100%	7.2%	300	2.10

Natural -> Vellum

0	50%	9.9%	500	2.10
25	75%	9.9%	500	2.10
50	100%	9.9%	500	2.10
75	100%	8.6%	500	2.10
100	100%	7.2%	500	2.10

Plastic -> ABS

0	50%	7%	400	2.10
25	75%	7%	400	2.10
50	100%	7%	400	2.10
75	100%	5.6%	400	2.10
100	100%	4.7%	400	2.10

Polyster -> Mylar™ film

0	50%	10%	500	2.10
25	75%	10%	500	2.10
50	100%	10%	500	2.10
75	100%	8%	500	2.10
100	100%	6.6%	500	2.10

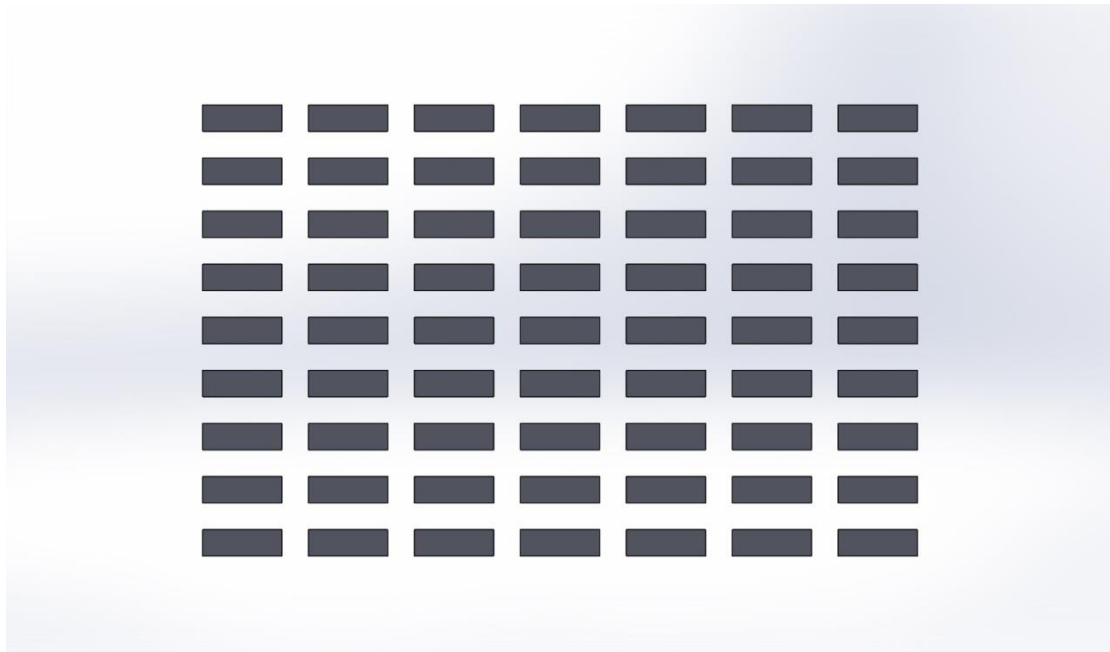
Continuous Cast Acrylic

0	50%	4%	1000	4.1
25	75%	4%	1000	4.1
50	100%	4%	1000	4.1
75	100%	3.2%	1000	4.1
100	100%	2.7%	1000	4.1

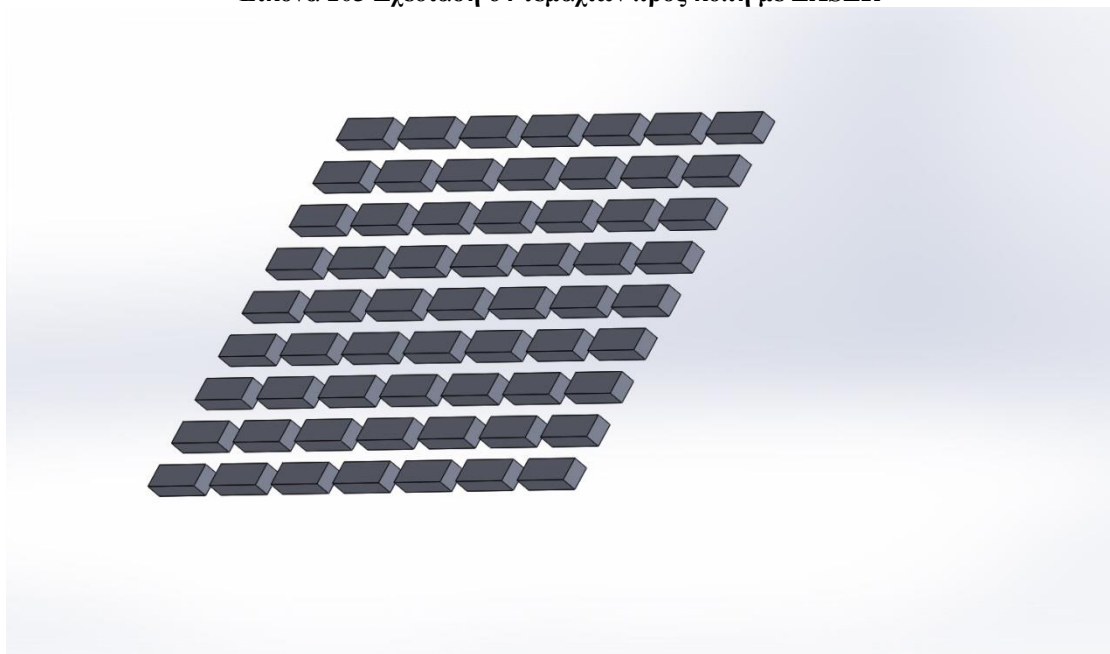
Continuous Cast Acrylic

0	50%	12%	1000	1.1
25	75%	12%	1000	1.1
50	100%	12%	1000	1.1
75	100%	9.8%	1000	1.1
100	100%	8.2%	1000	1.1

## Σχεδίαση τεμαχίων προς κοπή με laser στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS



Εικόνα 103 Σχεδίαση 64 τεμαχίων προς κοπή με LASER



Εικόνα 104 Σχεδίαση τεμαχίων 64 τεμαχίων για κοπή με LASER





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

#### Code for Box Benken amplitude 3, 5, 7 $\mu\text{m}$

```
clear all;
close all;
clc;

for i=1:3
    y=[0.001 0.0227 0.1239 0.12169 0.3461 0.516377 0.36714 0.27858
0.36223 0.19234 0.69098 0.49911 0.21534];
    if i==1
        %x1 kai x2
        x1 = [3 3 3 5 5 5 7 7 7 5 5 5 4.8];
        x2 = [200 400 600 200 400 600 200 400 600 400 200 200 200];
    elseif i==2
        %x2 kai x3
        x1 = [200 400 600 200 400 600 200 400 600 400 200 200 200];
        x2 = [82 147 255 230 656 800 800 800 800 1465 1000 450 200];
    else
        %x1 kai x3
        x1 = [3 3 3 5 5 5 7 7 7 5 5 5 4.8];
        x2 = [82 147 255 230 656 800 800 800 800 1465 1000 450 200];
    end

    x=[-inf -inf -inf -inf -inf -inf];

    % length(x1)
    % length(x2)
    % length(y)

    % X=[ones(size(x1)) ones(size(x2)) x1 x2];
    % [a,b,r2]=regress(y,[x1 x2]')
    % [a,b,r2]=regression(y,[x1 x2]')

    ft = fittype(
'myfun(b1,b2,b3,b4,b5,b6,x,y)', 'independent', {'x','y'}, 'dependent', 'z
');

    [f1,gof] = fit([x1' x2'],y',ft, 'StartPoint',x);

    figure(i)
    plot( f1, [x1' x2'], y')

    coeffvalues(f1)
    gof
end

function z = myfun(b1,b2,b3,b4,b5,b6,x,y)
```

```
z = b1 + b2*x + b3*y + b4 * x.* y + b5 * x.^2 + b6 * y.^2;
```

```
end
```

### Code for Box-Benken amplitude 3.5 , 4 , 4.5 $\mu\text{m}$ (27 experiments)

```
clear all;
close all;
clc;

for i=1:3
    y=[0.10528 0.0629 0.12436 0.17955 0.06147 0.10178 0.22811 0.16850
0.29689 0.01800 0.09146 0.12755 0.0912 0.02079 0.20162 0.20784
0.23343 0.32100 0.06168 0.09035 0.13261 0.29579 0.15084 0.116211
0.27864 0.27864 0.35509 ];
    if i==1
        %x1 kai x2
        x1 = [3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5];
        x2 = [200 250 300 200 250 300 200 250 300 200 250 300 200 250
300 200 250 300 200 250 300 200 250 300 200 250 300 ];
    elseif i==2
        %x2 kai x3
        x1 = [200 250 300 200 250 300 200 250 300 200 250 300 200 250
300 200 250 300 200 250 300 200 250 300 200 250 300 ];
        x2 = [200 200 200 300 122 228 100 100 100 100 100 100 200 200
200 300 300 100 100 100 200 200 200 300 300 300];
    else
        %x1 kai x3
        x1 = [3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 3.5 4 4 4 4 4 4 4 4 4
4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5 4.5];
        x2 = [200 200 200 300 122 228 100 100 100 100 100 100 200 200
200 300 300 300 100 100 100 200 200 200 300 300 300];
    end

    x=[-inf -inf -inf -inf -inf -inf];

    % length(x1)
    % length(x2)
    % length(y)

    % X=[ones(size(x1)) ones(size(x2)) x1 x2];
    % [a,b,r2]=regress(y,[x1 x2]')
    % [a,b,r2]=regression(y,[x1 x2]')

    ft = fittype(
'myfun(b1,b2,b3,b4,b5,b6,x,y)', 'independent',{ 'x', 'y'}, 'dependent', 'z
');

    [f1,gof] = fit([x1' x2'],y',ft, 'StartPoint',x);

    figure(i)
    plot( f1, [x1' x2'], y')

    coeffvalues(f1)
    gof
```

```
end
```

```
function z = myfun(b1,b2,b3,b4,b5,b6,x,y)
```

```
z = b1 + b2*x + b3*y + b4 * x.* y + b5 * x.^2 + b6 * y.^2;
```

```
end
```

### **Code for Box-Benken amplitude 3.5, 4 , 4.5 $\mu\text{m}$ , welding force 100, 175, 250 Newton**

```
clear all;  
close all;  
clc;
```

```
x1 = [3.5 3.5 3.5 4 4 4 4.5 4.5 4.5 4 4]';  
x2 = [100 175 250 100 175 250 100 175 250 175 175]';  
y = [ 16.69 40.68 49.7 41.97 65.84 69.54 57.39 62.28 97.24 58.93  
67.15 ]';
```

```
%%% Test coef
```

```
b0 = -491.3  
b1 = 220.8  
b11 = -23.88  
b12 = 0.0402  
b2 = 0.2108  
b22 = -0.0004284
```

```
for i=1:length(x1)  
xx=x1(i);  
yy=x2(i);
```

```
zz = b0 + b1*xx + b2*yy + b12 * xx * yy + b11 * xx^2 + b22 *  
yy^2;
```

```
xx  
yy  
zz  
disp('-----');
```

```
end
```

```
mdl = fitlm(x1,y)  
mdl.Rsquared.Ordinary
```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Εύρεση της απαραίτητης ενέργειας για να φτάσει το PMMA στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$ .

$$\log a_T = \frac{C_1 * (T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}$$

Για PMMA:  $T_r = T_g = 115 \text{ }^\circ\text{C} = 388 \text{ K}$  και  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$ , έχουμε για  $C_1 = -17.4 \text{ K}$  και  $C_2 = 51.6 \text{ K}$

Τότε  $\log a_T = 40.781$

$$\log a_T = \frac{-E}{R * (T - T_r)} \quad \Leftrightarrow \quad E = \log a_T * R * (T - T_r)$$

Για  $R = 8.314 \text{ J/K} * \text{mol}$ , τότε  $E = 30,514.978 \text{ J/ mole} = 30.515 \text{ KJ/ mole}$

Για το PMMA επίσης έχουμε:

Amorphous density (πυκνότητα) at  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  :  $1.17 \text{ g/cm}^3$

Molecular weight if repeat unit:  $100.12 \text{ g/mol}$

Volume of PMMA used at experiments :  $1.45 \text{ cm} \times 4.45 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm} = 1.2905 \text{ cm}^3$

Άρα η μάζα του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι :  $m = 1.509885 \text{ gr}$  και η ποσότητα των moles ισούται με  $0.015081 \text{ moles}$ .

Συνεπώς η απαιτούμενη ενέργεια απορρόφησης είναι :

$$E = \mathbf{0.460189 \text{ KJoule} = 460.2 \text{ Joule}}$$

Λαμβάνοντας την εξίσωση του Arrhenius από το PDF: Chapter 6 Dynamic Mechanical Analysis (etd\_Chapt\_6.pdf)

$$\log a_T = \frac{-\Delta E}{R * 2.303} * \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)$$

Και για συνθήκες  $T = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ , έχουμε για  $C_1 = 8.86 \text{ K}$  και  $C_2 = 101.6 \text{ K}$

Υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως ότι  $\Delta E = 425,060.759 \text{ J/ mole}$  ή  $\Delta E = 425.061 \text{ KJ/ mole}$

Έχουμε απαιτούμενη ενέργεια απορρόφησης είναι :

$E = 6.4099 \text{ KJoule} = 6410 \text{ Joule}$  για να φτάσει τη τιμή του  $T_g$  από θερμοκρασία  $T = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Οι  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  δεν είναι αναλογικοί με το πείραμα, και επίσης οι  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ξεπερνούν τη θερμοκρασία τήξης του υλικού (PMMA).

## Παράρτημα Δ

Αρχείο excel με πειραματικά αποτελέσματα

# of experiment *	Energy (J)	Time (sec)
05/11/2015		
Amplitude 3μm		
401	25	3,722
402	50	7,464
403	75	11,276
404	100	14,287
405	<b>88</b>	15,000
406	<b>86</b>	15,000
Amplitude 3.5μm		
407	25	2,275
408	50	4,399
409	75	6,034
410	100	7,708
411	125	11,478
412	150	15,000

Amplitude 4μm		
413	25	0,927
414	50	2,714
415	75	8,652
416	100	12,332
417	125	13,466
418	150	9,973

# of experiment *	Energy (J)	Time (sec)		
06/11/2015				
Amplitude 3μm				
0	425	25	0.848	1
0	426/427	50	4.804/5.313	1
0	428	75	2,276	1
0	429	100	8,537	2
0	430	<b>98</b>	15,000	1
0	431	<b>132</b>	15,000	1
Amplitude 3.5μm				
0	432	25	2,285	1
0	433	50	3,192	1
0	434	75	4,799	2
0	435	100	7,950	1
0	436	125	10,329	1
2	437	150	12,274	1

Amplitude 4μm				
0	438	25	1,151	1
1	439	50	2,405	1
0	440	75	3,645	1
0	441	100	5,379	1
1	442	125	5,891	1
2	443	150	8,892	1



# of experiment *	Energy	Time
06/11/2015		
Amplitude 3μm		
445	25	2,953
446	50	5.23
447	75	8.311
448	100	15,000
449	<b>98</b>	15,000
450	<b>132</b>	15,000
Amplitude 3.5μm		
451	25	1,955
452	50	3,849
453	75	5,077
454	100	6,584
455	125	10,247
456	150	9,655
Amplitude 4μm		
457	25	1,093
458	50	2,143
459	75	4,190
460	100	4,357
461	125	5,709
462	150	8,460

# of experiment *	Energy	Time
11/11/2015		
Amplitude 3μm		
0	463	25 3,392
0	464	50 6,530
0	465	75 7,277
0	466	100 12,138
0	467	<b>98</b> 14,760
0	468	<b>132</b> 15,000

Amplitude 3.5μm WF=90N			
1	492	25	1,565
1	471	50	3,484
1	472	75	7,787
2	473	100	<b>10,515</b>
1	474	125	12,695
1	475	150	10,418
	476	175	10,232
	477	200	12,890

2  
1  
2  
2  
2  
2

# of experiment *	Energy	Time
11/6/2015		
Amplitude 3 $\mu$ m		
419	25	5,660
420	50	10,813
421	75	10,813

0  
0  
0

Amplitude 3.5 $\mu$ m WF=120N		
493	25	1,440
478	50	3,714
479	75	3,959
480	100	6,352
481	125	12,368
482	150	12,542
483	175	13,309
484	200	12,140

Amplitude 3.5 $\mu$ m WF=150N		
494	25	1,495
485	50	1,460
486	75	7,153
487	100	7,757
488	125	7,402
489	150	4,793
490	175	12,302
491	200	15,000

12/4/2015

Plasma's roughness

Amplitude 3.5 $\mu$ m WF=120N		
719	(100)100	3.42
720	(100)100	5.939
721	(100)100	3.139

12/4/2015

Plasma's roughness

Amplitude 3.5 $\mu$ m WF=120N		
719	(75)75	1.951
720	(75)75	3.83
721	(75)75	1.928

12/4/2015

Amplitude 4 $\mu$ m WF=120N		
722	(100)100	2.915
723	(100)100	2.915
724	(100)100	2.202

12/4/2015

Plasma's roughness

Amplitude 4 $\mu$ m WF=120N		
732	(75)75	1.532
733	(75)75	1.435
734	(75)75	1.928

12/9/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=120N		
802	2x [(50)+50]	1.463
804	2x [(50)+50]	1.379
807	2x [(50)+50]	0.977

12/9/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=180N		
816	2x [(50)+50]	0.403
817	2x [(50)+50]	0.869
821	2x [(50)+50]	0.256

12/9/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 4µm WF=180N		
732	2x [(50)+50]	0.868
733	2x [(50)+50]	0.98
734	2x [(50)+50]	2.042

12/9/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=240N		
833	2x [(50)+50]	1.463

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=180N		
852	50	1.986
853	50	2.297
854	50	1.804
855	50	1.357

**855**

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=180N		
856	50	0.972
857	50	0.941
858	50	0.987
859	50	1.063

**859**

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 4µm WF=240N		
880	50	3.127
881	50	3.247
882	50	4.757
883	50	3.761

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 4µm WF=240N		
884	50	0.797
885	50	1.017
886	50	0.725
887	50	0.762

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 4,5µm WF=240N		
888	50	0.999
889	50	0.899
890	50	0.6
891	50	0.599

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 4,5µm WF=240N		
864	(50) 50	0.653
865	(50) 50	0.487

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 5µm WF=240N		
897	50	0.445
898	50	0.577
899	50	0.813
900	50	0.459

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 5µm WF=240N		
896	(50) 50	0.592

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=180N		
860	50	1.684
861	50	2.134
862	50	1.951
863	50	2.656

**863**

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 3.5µm WF=240N		
864	50	0.979
865	50	1.011
866	9	0.595
867	12	0.658
868	15	0.736
869	13	0.697
870	17	0.783

**871**

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 4µm WF=240N		
892	(50) 50	1.203
893	(50) 50	1.412

12/11/2015  
Plasma's roughness

Amplitude 5µm WF=240N		
901	(35) 35	0.277

871 50 0.901