

ΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



«Δημιουργία και μελέτη καναλιών
σε πλάκες αλουμινίου ΑΙ5083-
Η111 με τριβή μέσω ανάδευσης»

Τομέας: Κατεργασιών

Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2021

Τριμελή Επιτροπή

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Ε.Μ.Π.

ΣΠΥΡΟΣ ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ Ε.Μ.Π.

ΑΓΓΕΛΟΣ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Ε.Μ.Π.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Νασόπουλος Κωνσταντίνος

1. Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η δημιουργία καναλιών στο εσωτερικό πλακών από αλουμίνιο Al5083-H111, με χρήση της κατεργασίας διατριβής μέσω ανάδευσης (Friction Stir Channeling, FSC). Τα κανάλια σχηματίστηκαν μελετώντας εργαλεία με πείρο, ο οποίος διέθετε δεξιόστροφο σπείρωμα, που όπως φαίνεται από την πειραματική διαδικασία ήταν ζωτικής σημασίας και επηρέασε σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.

Κατά την πειραματική διαδικασία της εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διάφορες παραμέτρους διεργασιών, δηλαδή διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης, ταχύτητες περιστροφής, φορά περιστροφής εργαλείου και διαφορετική γεωμετρία αυτού, με τη χρήση τριών διαφορετικών εργαλείων, με σκοπό να παρατηρηθεί η μεταβολή των διαστάσεων και τελικώς της διατομής των καναλιών. Για την επιλογή των πειραματικών παραμέτρων και τον τύπο των εργαλείων, έγινε έρευνα σε διάφορες μελέτες, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Αφού καταλήξαμε στις κατάλληλες συνθήκες διεργασιών, κατά τις οποίες θα επιτυγχανόταν καλύτερη δομή των εσωτερικών αυλακώσεων, πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, έχοντας στη διάθεση μας εξοπλισμό και υλικά της σχολής. Μέσω των πειραμάτων παρατηρήθηκε η ροή του εναποτιθέμενου υλικού, που επιδρά καθοριστικά στην μορφολογία των καναλιών, μελετήθηκαν η μορφολογία, η δομή και οι διαστάσεις των προκυπτουσών καναλιών και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα.

2. Abstract

In the present dissertation the creation of channels inside the Al5083-H111 aluminum plates was studied, using the friction stir treatment (FSC). The channels were formed by studying tools with a pin, which had a clockwise thread, which as shown by the experimental process was vital and greatly influenced the results.

During the experimental process, tests were performed with different process parameters, i.e. different propulsion speeds, rotation speeds, tool rotation direction and different geometry, using three different tools, in order to observe the change of dimensions and finally the cross section of the channels. For the selection of the experimental parameters and the type of tools, research was done in various studies, which are presented below.

After reaching the appropriate process conditions, during which a better structure of the internal grooves would be achieved, the experiments were carried out, having at our disposal equipment and materials of the school. Through the experiments the flow of the deposited material was observed, which has a decisive effect on the morphology of the channels, the morphology, the structure and the dimensions of the resulting channels were studied and the results were commented.

3. Περιεχόμενα

1.	Περίληψη	7
2.	Abstract	8
3.	Περιεχόμενα.....	9
4.	Εισαγωγή.....	11
5.	Χαρακτηριστικά και αρχές του FSC.....	12
5.1	FSC.....	12
5.2	Εναλλακτική FSC.....	14
5.3	Τροποποιημένη FSC	15
6.	Παράμετροι διεργασίας σε FSC	17
7.	Μικροδομή του καναλιού και της ευρύτερης περιοχής του	19
8.	Review	22
8.1	Σκοπιμότητα και εφαρμογές του Friction Stir Channeling	22
8.2	AA6061-T6 – πάχος τεμαχίου 5mm	23
8.3	Al 5083 – πάχος τεμαχίου 10mm.....	25
8.4	AA5083-H111 – πάχος τεμαχίου 15mm	29
8.5	AA7178-T6 – πάχος τεμαχίου 13mm	31
9.	Πειραματική διαδικασία	34
9.1	Μηχανή συγκόλλησης.....	34
9.2	Εργαλεία συγκόλλησης	35
9.2.1	Υλικό εργαλείου	35
9.2.2	Διαστάσεις εργαλείων	35
9.3	Πλάκα συγκράτησης	37
9.4	Δοκίμια αλουμινίου προς συγκόλληση	39
9.5	Μεταλλογραφική αξιολόγηση	41
9.5.1	Εξοπλισμός λείανσης	42
9.5.2	Εξοπλισμός οπτικής μικροσκοπίας	43
9.6	Συνθήκες πειραματικών διαδικασιών	44
9.7	Συγκόλληση των πλακών αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6mm.....	46
9.7.1	Δοκίμιο 10	46
9.7.2	Δοκίμιο 11	47
9.7.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	48
9.7.4	Δοκίμιο 12	49
9.7.5	Δοκίμιο 13	50
9.7.6	Δοκίμιο 14	51
9.7.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	52
9.7.8	Δοκίμιο 16	53
9.7.9	Δοκίμιο 18	54
9.7.10	Δοκίμιο 19	55
9.7.11	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	56

9.7.12 Δοκίμιο 20	57
9.7.13 Δοκίμιο 21	58
9.7.14 Δοκίμιο 22	59
9.7.15 Δοκίμιο 23	60
9.7.16 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	61
9.7.17 Δοκίμιο 24	62
9.7.18 Δοκίμιο 25	63
9.7.19 Δοκίμιο 26	64
9.7.20 Δοκίμιο 27	65
9.7.21 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	66
9.8 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις	67
9.9 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	69
10. Κατάλογος Σχημάτων	70
11. Κατάλογος Πινάκων	72
12. Βιβλιογραφία	73

4. Εισαγωγή

Η τριβή ανάδευσης (Friction Stir Channeling, FSC) είναι μια καινοτόμος μέθοδος ενός σταδίου κατασκευής συνεχών και ολοκληρωμένων καναλιών σε μονολιθικές πλάκες σε ένα μόνο πέρασμα για εφαρμογές εναλλάκτη θερμότητας. Το FSC αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας έξυπνα τον μηχανισμό σχηματισμού ελαττωμάτων της διεργασίας FSW για την παραγωγή συνεχών και ολοκληρωμένων καναλιών (Mishra, Integral channels in metal components and fabrication thereof, 2005) (Mishra, Integral channels in metal components and fabrication thereof, 2008) (Balasubramanian, 2008) (N. Balasubramanian, Process.Technol. 209 (3696-3704), 2009) (N. Balasubramanian, Process.Technol. 211 (305-311), 2011). Η εμφάνιση καναλιών στην ζώνη ανάδευσης FSW οφείλεται σε ανεπάρκειες ροής που προκύπτουν από μη βελτιστοποιημένες συνθήκες επεξεργασίας, όπως ακατάλληλη επαφή μεταξύ του ώμου του εργαλείου FSW και της επιφάνειας του, προς κατεργασία, τεμαχίου ή της γεωμετρίας των χαρακτηριστικών του εργαλείου (Balasubramanian, 2008). Ο μηχανισμός σχηματισμού καναλιών χρησιμοποιήθηκε με έλεγχο επί συγκεκριμένων παραμέτρων διεργασίας προς όφελος της ανάπτυξης τεχνολογίας FSC. Έτσι, το FSC μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία σκόπιμης δημιουργίας καναλιών για ευεργετικούς σκοπούς. Προς το παρόν, η τεχνολογία FSC έχει αναπτυχθεί σε μονολιθικές πλάκες.

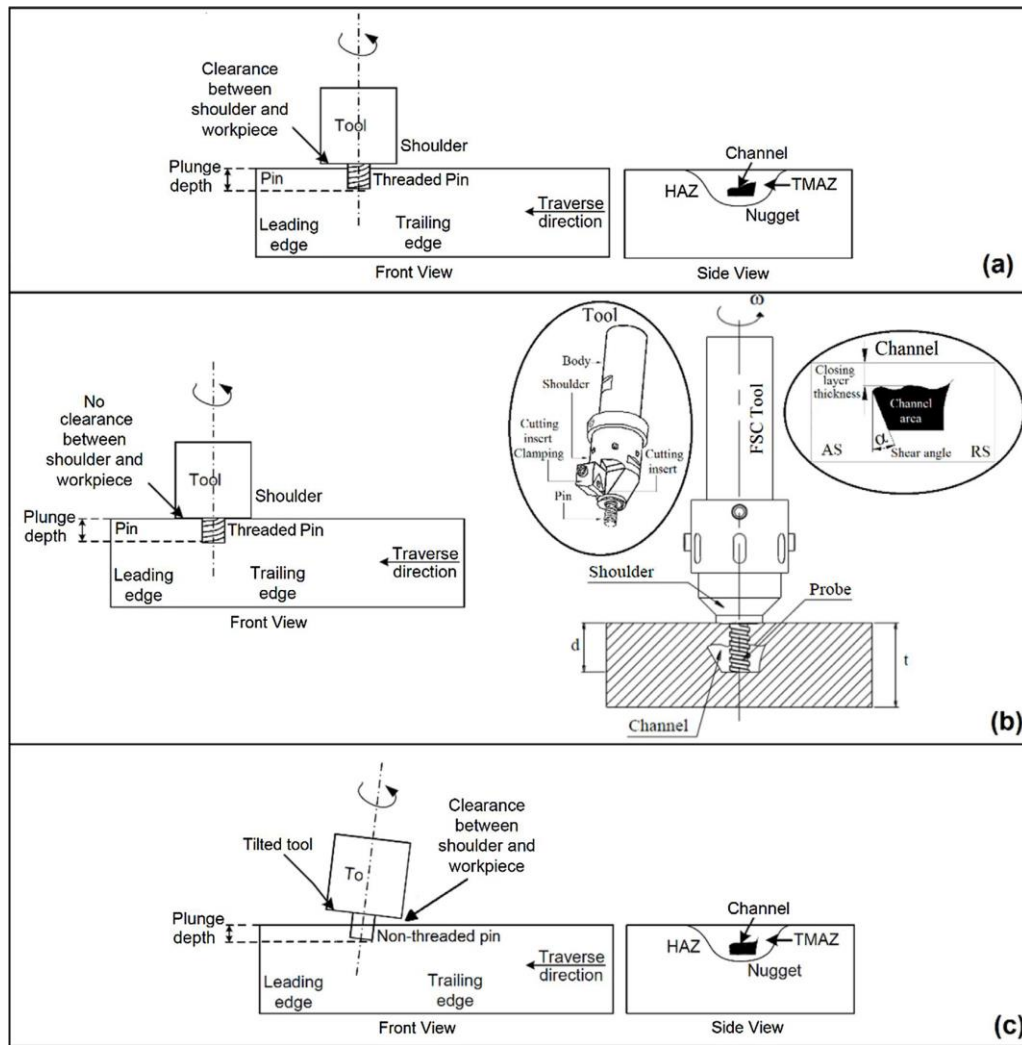
5. Χαρακτηριστικά και αρχές του FSC

Τρεις διαφορετικές έννοιες του FSC έχουν αναπτυχθεί, με κυριότερη την ανάπτυξη του καναλιού ανάδευσης τριβής από τους Mishra και N. Balasubramanian (FSC) (Mishra, Integral channels in metal components and fabrication thereof, 2005) (Mishra, Integral channels in metal components and fabrication thereof, 2008) (Balasubramanian, 2008). Προκειμένου να δημιουργηθούν κανάλια καλύτερου σχήματος, μεγέθους, σταθερότητας και ακεραιότητας, αναπτύχθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι FSC από τους Vidal κλπ (*εναλλακτική FSC ή αλλιώς A-FSC*) (Mustafa Kemal Kulekci, 2016) (P. Vilaca, 2011) (C. Vidal V. I., Key Eng. Mater. 488 (105-108), 2012) (C. Vidal V. I., Mater. Sci. Forum 730 (817-822), 2013) (C. Vidal V. I., Proc. Eng. 66 (264-273), 2013) (C. Vidal V. I., 2014) (C. Vidal V. I., 2014) (C. Vidal V. I., Int. J. Fatigue 62 (85-92), 2014) (C. Vidal V. I., Int. J. Fatigue 62 (77-84), 2014) (Ferraz) και Rashidi κλπ (*τροποποιημένη FSC ή αλλιώς M-FSC*) (A. Rashidi A. M., 2013) (A. Rashidi A. M., 2013) (A. Rashidi A. M., Proc. Inst. Mech. Eng. BQ J. Eng. Manuf., 2015) (A. Rashidi A. M., Int. J. Adv. Manuf. Technol. 80 (1087-1096), 2015).

5.1 FSC

Η αρχή λειτουργίας του FSC είναι παρόμοια με εκείνη του FSW. Η **εικόνα 1** (α) δείχνει τον τρόπο λειτουργίας της διαδικασίας FSC. Το FSC περιλαμβάνει τέσσερα στάδια, το στάδιο βύθισης, το στάδιο παραμονής, το στάδιο διοχέτευσης και την ανάκληση. Το στάδιο διοχέτευσης είναι ανάλογο με το στάδιο συγκόλλησης. Δεδομένου ότι ο στόχος του FSC είναι να δημιουργήσει ένα κανάλι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, η γεωμετρία του εργαλείου και η κατεύθυνση περιστροφής του κατά τη διαδικασία είναι σημαντικές (N. Balasubramanian, Process.Technol. 209 (3696-3704), 2009). Εκτός από την παραγωγή θερμότητας τριβής για την παραγωγή επαρκούς ιξωδοελαστικής εξάλειψης και ροής υλικού μέσω της περιστροφικής κίνησής του, επίσης σημαντικό για το εργαλείο στο στάδιο διοχέτευσης του FSC είναι να κατευθύνει τη ροή του υλικού προς τα πάνω, δηλαδή , προς τον ώμο του εργαλείου, και για να διαχωρίσετε το πλαστικοποιημένο υλικό γύρω από τον πείρο από αυτό στη βάση του πείρου. Αυτό απαιτεί ειδικό σχεδιασμό του εργαλείου και της διαδικασίας.

Η ανοδική ροή επιτυγχάνεται με περιστροφή είτε ενός εργαλείου, με δεξιόστροφο σπείρωμα, δεξιόστροφα είτε ενός εργαλείου, με αριστερόστροφο σπείρωμα, σε αριστερόστροφη διεύθυνση. Μετά το σχεδιασμό του εργαλείου, ο μηχανισμός σχηματισμού καναλιών εφαρμόζεται στην πράξη. Για να γίνει αυτό, παρέχεται μια αρχική απόσταση, δηλ. ένα εσκεμμένο διάκενο, μεταξύ του ώμου του εργαλείου και της επιφάνειας του τεμαχίου εργασίας κατά τη διάρκεια του σταδίου βύθισης του εργαλείου και διατηρείται σε όλα τα στάδια παραμονής και διοχέτευσης. Αυτό το διάκενο επιτρέπει στο υλικό να διαχωρίζεται από τη βάση του πείρου και να ρέει προς τα πάνω για να εναποτίθεται στο πάνω μέρος του τεμαχίου κάτω από την επιφάνεια του ώμου. Αυτή η ενέργεια δημιουργεί ένα συνεχές κανάλι κατά μήκος της κατεύθυνσης του εργαλείου. Αυτά τα κανάλια χαρακτηρίζονται από το σχήμα, το μέγεθος και την διάμετρο τους και ως ένα βαθμό την τραχύτητα της επιφάνειας της οροφής.



Εικόνα 1 Σχηματικές διεργασίες (α) FSC (Balasubramanian, 2008), (β) A-FSC (Pedro Vilaça, 2012) (P. Vilaça, 2011) και (γ) διεργασίες M-FSC (A. Rashidi A. M., 2013) (A. Rashidi A. M., 2013).

5.2 Εναλλακτική FSC

Το σχήμα του Alternative-FSC φαίνεται στην **εικόνα 1** (β). Η ιδέα και οι αρχές του A-FSC είναι ελαφρώς διαφορετικές από το FSC, αν και ο στόχος είναι η παραγωγή εσωτερικών καναλιών. Στο A-FSC, μια ελεγχόμενη ποσότητα υλικού, που ρέει από την εσωτερική επεξεργασμένη ζώνη του κομματιού εργασίας, κατευθύνεται έξω από την επεξεργασμένη ζώνη, η οποία εξέρχεται με αποτέλεσμα

την δημιουργία εσωτερικού καναλιού (P. Vilaca, 2011). Αυτό διατηρεί την επεξεργασμένη επιφάνεια στο ίδιο αρχικό επίπεδο. Αυτό είναι αντίθετο με το FSC, όπου το υλικό που ρέει προς τα πάνω εναποτίθεται στην κατεργασμένη ζώνη κάτω από τον ώμο, προκαλώντας ελαφρά διόγκωση της επεξεργασμένης επιφάνειας, μόνο που αφαιρείται αργότερα με επεξεργασία φρεζαρίσματος.

Η κύρια διαφορά του A-FSC από το FSC είναι ότι δεν υπάρχει διάκενο μεταξύ του ώμου και του κομματιού εργασίας (Pedro Vilaça, 2012). Ως εκ τούτου, το υλικό από τη βάση του πείρου εργαλείου εναποτίθεται στις πλευρές και στο πίσω μέρος του ώμου για δημιουργία του καναλιού. Βασικό χαρακτηριστικό της διεργασίας A-FSC είναι πως χρησιμοποιεί ένα ειδικά σχεδιασμένο εργαλείο με σπείρωμα, όπως γίνεται στο FSC (Ferraz). Ορισμένες νέες παράμετροι που ορίζονται για να χαρακτηρίσουν το κανάλι στο A-FSC είναι η περιοχή καναλιών, το πάχος του στρώματος της άνω επιφάνειας του καναλιού και η γωνία διάτμησης (C. Vidal V. I., Key Eng. Mater. 488 (105-108), 2012) (C. Vidal V. I., Mater. Sci. Forum 730 (817-822), 2013). Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κενό μεταξύ του ώμου του εργαλείου και του κομματιού εργασίας στο A-FSC, έχει μοντελοποιηθεί ένα εργαλείο που ενσωματώνει χαρακτηριστικά φινιρίσματος επιφάνειας, το οποίο, εάν είναι δυνατόν, παράγει ταυτόχρονα το απαιτούμενο φινίρισμα επιφάνειας (Pedro Vilaça, 2012) (C. Vidal V. I., 2014).

5.3 Τροποποιημένη FSC

Το σχήμα της διαδικασίας Modified-FSC φαίνεται στην **εικόνα 1** (γ). Στη διαδικασία M-FSC, χρησιμοποιείται ένας πείρος χωρίς σπείρωμα (A. Rashidi A. M., 2013). Τα στάδια βύθισης, παραμονής και διοχέτευσης πραγματοποιούνται εφαρμόζοντας μια γωνία κλίσης στο εργαλείο και ένα διάκενο μεταξύ του ώμου του εργαλείου και της επιφάνειας του κομματιού εργασίας. Η χρήση μιας κλίσης του εργαλείου υπό γωνία επιφέρει καλύτερη εξαγωγή του υλικού και ως συνέπεια τη δημιουργία του καναλιού. Ο μη σπειροειδής πείρος του εργαλείου χρησιμοποιείται για την επίτευξη σταθερής κατάστασης ή σταθερής ροής υλικού, ώστε να δημιουργήσει σταθερά και πιθανώς βέλτιστα κανάλια (A. Rashidi A. M., 2013) (A. Rashidi A. M., Proc. Inst. Mech. Eng. BQ J. Eng. Manuf., 2015).

Στο M-FSC, η κατεύθυνση περιστροφής του εργαλείου δεν επηρεάζει το σχηματισμό του καναλιού. Ωστόσο, μια αλλαγή στην κατεύθυνση περιστροφής

αλλάζει τη θέση του καναλιού από Advancing Side σε Retreating Side ή αντίστροφα (βλ. **Εικόνα 2 γ**). Αυτές οι τροποποιήσεις έχουν αποδειχθεί ζωτικής σημασίας για την παραγωγή καναλιών μεγαλύτερου μεγέθους, πιο κανονικού σχήματος και καλύτερης σταθερότητας. Αυτή η μέθοδος εισήγαγε το πλάτος του καναλιού ως παράμετρο για τον χαρακτηρισμό του καναλιού (A. Rashidi A. M., *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 80 (1087–1096), 2015) (A. Rashidi A. M., *Int. J. Mater. Form.* 9 (1–8), 2016). Τόσο το πλάτος όσο και το ύψος του καναλιού αυξάνονται στην διεργασία M-FSC σε σύγκριση με την διεργασία FSC.

6. Παράμετροι διεργασίας σε FSC

Στο FSW, ο σχηματισμός καναλιών είναι ανεπιθύμητος και ο τρόπος πρόληψής της είναι ενδιαφέρον. Στο FSC, ωστόσο, τα κανάλια δημιουργούνται σκόπιμα λόγω της δυνατότητάς τους να παρέχουν ευέλικτες υπηρεσίες. Οι κύριες παράμετροι της διαδικασίας και στις τρεις εκδοχές του FSC είναι παρόμοιες.

Η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και η ταχύτητα πρόωσης ελέγχουν την ποσότητα παραγωγής θερμότητας από την τριβή και την επακόλουθη ροή ιξωδοπλαστικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτές οι δύο παράμετροι, μαζί με το βάθος βύθισης επηρεάζουν την προς τα κάτω δύναμη που ασκείται στο τεμάχιο και επομένως, επηρεάζουν τη συνολική ποιότητα του καναλιού (Pedro Vilaça, 2012).

Ένα τυπικό κανάλι που σχηματίζεται από το FSC έχει περίπου ελλειπτικό σχήμα, ενώ εκείνο στα A-FSC και M-FSC απέχει πολύ από κωνικές τομές και παρουσιάζει τραχύ ορθογώνιο σχήμα, όπως φαίνεται στην **εικόνα 2 (α)**. Το σχήμα, το μέγεθος και η ακεραιότητα του καναλιού μπορούν να ελεγχθούν ρυθμίζοντας την απόσταση ανάμεσα στον ώμο του εργαλείου και το κομμάτι εργασίας και ελέγχοντας τον δείκτη θερμότητας (Balasubramanian, 2008). Ο δείκτης θερμότητας είναι ένας σχετικός όρος που ορίζεται ως ο λόγος του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής του εργαλείου προς την ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου. Ο υψηλός δείκτης θερμότητας προκαλεί μεγαλύτερη ροή υλικού προς τα πάνω (C. Vidal V. I., Int. J. Fatigue 62 (85-92), 2014). Αυτό σημαίνει ότι, η υψηλή ταχύτητα περιστροφής και οι χαμηλές ταχύτητες πρόωσης δημιουργούν κανάλια καλύτερης μορφής. Ο δείκτης θερμότητας καθορίζει επίσης την ακεραιότητα του καναλιού. Χαμηλότερες αξονικές δυνάμεις προς τα κάτω είναι ευεργετικές για την ακεραιότητα του καναλιού.

Επίσης, η περιοχή διατομής του καναλιού έχει αυξηθεί σε υψηλότερες ταχύτητες πρόωσης και χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής. Τα κανάλια είναι συνεχή σε ένα βελτιστοποιημένο εύρος ταχύτητας περιστροφής εργαλείου, ταχύτητας πρόωσης και βάθους βύθισης. Πολύ κρύες συνθήκες διεργασίας, δηλαδή, πολύ χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και βάθη βύθισης, δημιουργούν ανοιχτά κανάλια, στην κορυφή κάτω από τον ώμο του εργαλείου, λόγω ανεπαρκούς πλαστικού υλικού, ενώ οι πολύ θερμές συνθήκες διαδικασίας οδηγούν σε ασυνεχές κανάλι, λόγω της κατάρρευσης της οροφής του καναλιού (Balasubramanian, 2008). Η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και τα

μεγέθη του πείρου και του ώμου μπορούν να ρυθμιστούν, ώστε να ελέγχουν το σχήμα, το μέγεθος και την ακεραιότητα του καναλιού (Mishra, Integral channels in metal components and fabrication thereof, 2005) (Mishra, Integral channels in metal components and fabrication thereof, 2008) (Balasubramanian, 2008) (N. Balasubramanian, Process.Technol. 209 (3696-3704), 2009) (N. Balasubramanian, Process.Technol. 211 (305-311), 2011).

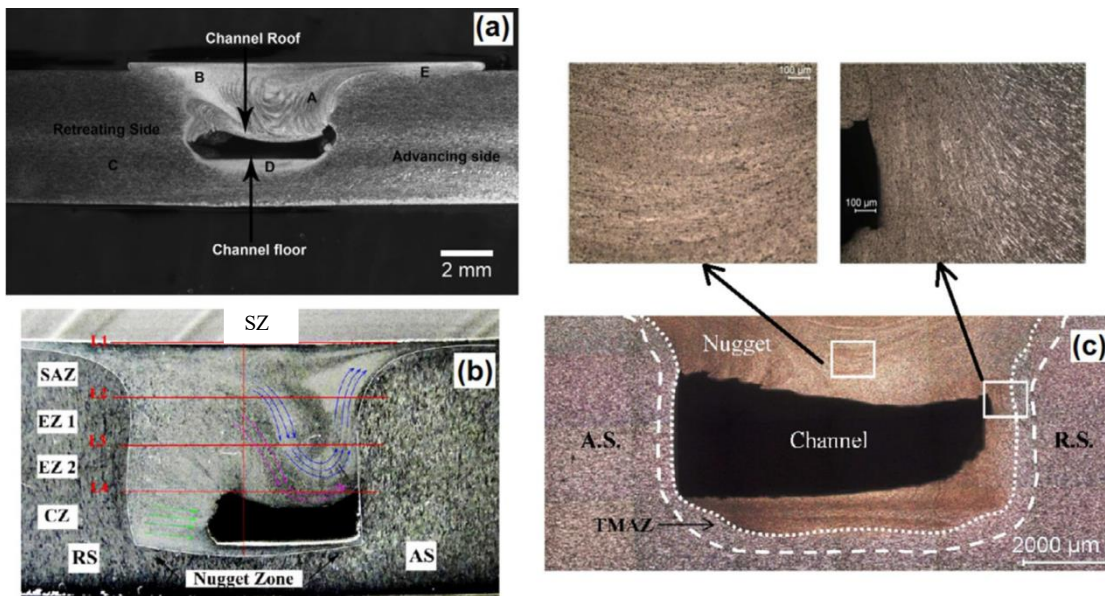
Στο A-FSC, η περιοχή του καναλιού αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης του εργαλείου και μείωση της ταχύτητας περιστροφής του (C. Vidal V. I., Mater. Sci. Forum 730 (817-822), 2013), ενώ οι ψυχρότερες συνθήκες διαδικασίας παράγουν σταθερά και καλύτερα κανάλια. Οι παράμετροι της διαδικασίας A-FSC δεν μεταφέρονται από υλικό σε υλικό και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος του υλικού. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα των απαραίτητων εξαρτημάτων όπως το σύστημα σύσφιξης, η πλάκα στήριξης κ.λπ. σε επαφή με το κομμάτι εργασίας επηρεάζει τις παραμέτρους της διαδικασίας.

Στο M-FSC, η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα πρόωσης, το βάθος βύθισης και η γωνία κλίσης εργαλείου είναι σημαντικές παράμετροι διεργασίας που έχουν διαφορετικές επιρροές σε διαφορετικές περιοχές του καναλιού λόγω της ισχυρής τους τάσης να επηρεάζουν τη ροή του υλικού (A. Rashidi A. M., Int. J. Mater. Form. 9 (1-8), 2016). Η αύξηση της γωνίας κλίσης προκαλεί αύξηση της ποσότητας του εναποτιθέμενου υλικού που δημιουργεί μεγάλη πύρωση (large flash) και μειώνει την περιοχή του καναλιού. Επιπλέον, η μείωση της περιοχής αφήνει το κανάλι με πιο κανονικό σχήμα. Η επίδραση της ταχύτητας πρόωσης στο μέγεθος και το σχήμα του καναλιού ακολουθεί μια παρόμοια τάση με τη γωνία κλίσης. Η αύξηση της ταχύτητας πρόωσης τείνει να βελτιώσει το μέγεθος και το σχήμα του καναλιού. Οι χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής είναι ευεργετικές για την καταστολή της αυλάκωσης στην οροφή του καναλιού AS και για την κανονική μορφή του καναλιού. Ωστόσο, το πλάτος του καναλιού μειώνεται (A. Rashidi A. M., Proc. Inst. Mech. Eng. BQ J. Eng. Manuf., 2015) (A. Rashidi A. M., Int. J. Adv. Manuf. Technol. 80 (1087-1096), 2015) (A. Rashidi A. M., Int. J. Mater. Form. 9 (1-8), 2016). Σε όλες τις εκδόσεις του καναλιού, η εσωτερική δομή του καναλιού είναι επίσης σημαντική, επειδή μπορεί να επηρεάσει την ανταλλαγή θερμότητας μέσω του καναλιού.

7. Μικροδομή του καναλιού και της ευρύτερης περιοχής του

Η κατανόηση του σχηματισμού καναλιού απαιτεί αναγνώριση διακριτών περιοχών ροής στην διατομή καναλιού. Δεδομένου ότι το FSC είναι παρόμοιο με το FSW εκτός από την απόσταση ή την τάση να οδηγεί το βισκοπλαστικό υλικό προς τα πάνω και να δημιουργεί ένα κανάλι. Οι περισσότερες θερμομηχανικές ενέργειες στο FSC ακολουθούν το ίδιο χαρακτηριστικό με το FSW. Επομένως, οι μικροδομές της ευρύτερης περιοχής του καναλιού σε FSC, A-FSC και M-FSC είναι παρόμοιες και ανάλογες με τη μικροδομή της συγκόλλησης στο FSW, με εξαίρεση το κανάλι.

Η **εικόνα 2 (α)** δείχνει τη μακροδομή ενός καναλιού και τα περίχωρά του που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας το FSC (Balasubramanian, 2008). Το κανάλι, η ροή του υλικού και η μετατόπιση του υλικού από τον πυθμένα του πείρου και η εναπόθεσή του στην οροφή του καναλιού κατά μήκος της προωθούμενης πλευράς είναι σαφέστατα. Οι περιοχές A και B αντιπροσωπεύουν τη ζώνη ανάδευσης, η περιοχή Γ είναι το μη επεξεργασμένο μητρικό υλικό και η περιοχή Δ είναι το κανάλι. Η περιοχή Ε αντιπροσωπεύει την περιοχή με εναποθέσεις υλικού από την περιοχή του καναλιού, που πετά προς τα πάνω καλύπτοντας την αρχική επιφάνεια του υλικού κάτω από τον ώμο. Η ζώνη ανάδευσης στην περιοχή Α επεξεργάζεται εν μέρει από τον πείρο και απεικονίζει τη ροή του υλικού από τη βάση του πείρου προς την επιφάνεια του υλικού κάτω από τον ώμο. Η εναπόθεση κάτω από τον ώμο ασκεί μια προς τα κάτω δύναμη στην πίσω πλευρά του πείρου στην οροφή του καναλιού, ενώ το υλικό κοντά στην επιφάνεια του τεμαχίου οδηγείται προς τα μέσα για να κατατεθεί στην πλευρά υποχώρησης, περιοχή Β. Η θερμομηχανικά επηρεαζόμενη ζώνη του τεμαχίου (TMAZ), ορίζεται από τις περιοχές του μητρικού υλικού που μένει ανεπηρέαστο και του κάτω μέρους του καναλιού, και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (HAZ) δεν είναι ξεκάθαρα ορατή.

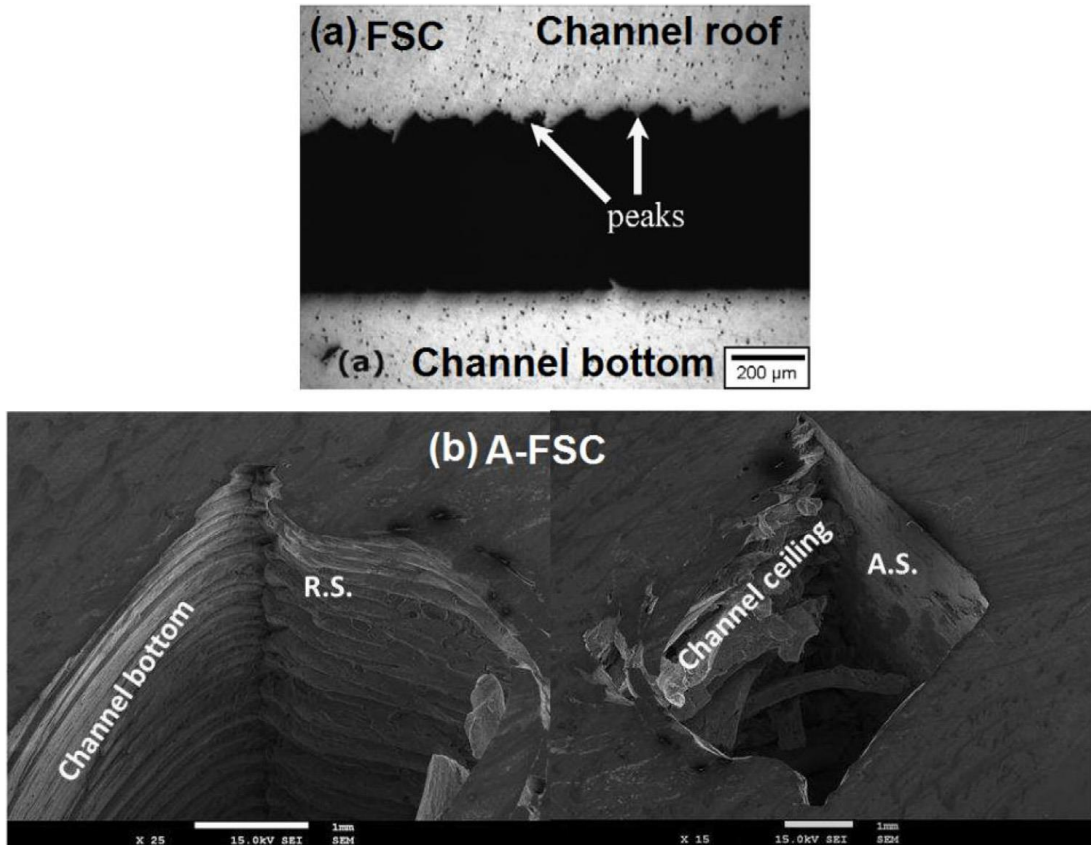


Εικόνα 2 Διατομή καναλιού (α) σε FSC, όπου A, B – Βισκοπλαστικό υλικό καναλιού, C - μητρικό υλικό, D - κανάλι και E - υλικό από το κανάλι καναλιού που εναποτίθεται στην επιφάνεια (Balasubramanian, 2008), (β) σε M- FSC, όπου SAZ - ζώνη που επηρεάζεται από τον ώμο, EZ - ζώνη διέλασης, CZ - ζώνη καναλιού (A. Rashidi A. M., Int. J. Mater. Form. 9 (1–8), 2016), και (γ) σε A-FSC, που δείχνει επίσης το σχηματισμένο κανάλι (C. Vidal V. I., 2014).

Ακόμη, η **εικόνα 2** (β) δείχνει την περαιτέρω ταξινόμηση της ζώνης SZ ενός καναλιού M-SFC σε ζώνη SAZ, την ζώνη εξώθησης (EZ1 και EZ2) και την ζώνη καναλιού (CZ). Αυτά τα χαρακτηριστικά ζώνης ανάδευσης είναι σημαντικά για τον έλεγχο της δομής και του εσωτερικού του καναλιού (A. Rashidi A. M., Int. J. Mater. Form. 9 (1–8), 2016). Για παράδειγμα, η τραχύτητα στην οροφή και τη βάση του καναλιού είναι σημαντική για την επίτευξη πτώσης πίεσης σε μίνι εναλλάκτες θερμότητας. Στην περιοχή του καναλιού A-FSC, που φαίνεται στην **εικόνα 2** (γ), οι χονδροειδείς κόκκοι αντικαθίστανται από λεπτούς ανακρυσταλλωμένους και ισοσταθμισμένους κόκκους που περιβάλλουν το SZ και το κανάλι. Το TMAZ παρουσιάζει αύξηση στο μέσο μέγεθος κόκκων λόγω της ανάδευσης του εργαλείου που παραμορφώνει πλαστικά το υλικό (C. Vidal V. I., 2014). Φαίνεται ότι η διάμετρος SZ και το ύψος του καναλιού είναι αντίστοιχα της διαμέτρου και του χρησιμοποιούμενου μήκους του κυλινδρικού πείρου στη διαδικασία. Η τραχύτητα του καναλιού έχει ιδιαίτερη σημασία.

Η **εικόνα 3** (α) και (β) δείχνει τα χαρακτηριστικά της εσωτερικής επιφάνειας των καναλιών που παράγονται σε FSC και A-FSC, αντίστοιχα. Στο FSC, το κάτω μέρος

και τα πλευρικά τοιχώματα του καναλιού είναι σχετικά ομαλά και επίπεδα, ενώ η οροφή του καναλιού είναι τραχιά, κυματοειδής και προσανατολισμένη κατά μήκος του εργαλείου, με περιοδικότητα ίση με το βήμα (δηλαδή πρόωση εργαλείου ανά περιστροφή) της διαδικασίας (Balasubramanian, 2008). Αυτά τα χαρακτηριστικά τραχύτητας είναι παρόμοια στο A-FSC (C. Vidal V. I., 2014).



Εικόνα 3 Χαρακτηριστικά επιφάνειας καναλιού στο (α) FSC (R.S.Mishra, M.W.Mahoney, S.X.McFadden, N.A.Mara, & A.K.Mukherjee, 1999) και (β) A-FSC (C. Vidal V. I., Mater. Sci. Forum 730 (817-822), 2013).

8. Review

8.1 Σκοπιμότητα και εφαρμογές του Friction Stir Channeling

Ως τώρα, οι εκδοχές του FSC έχουν διεξαχθεί σε μονολιθικές μεταλλικές πλάκες εμπορικού πάχους 5 mm AA6061-T6, πάχους 10 mm Al 5083, πάχους 15 mm AA5083-H111 και πάχους 13 mm AA7178-T6 για παραγωγή γραμμικών και μη γραμμικών συνεχών καναλιών (Pedro Vilaça, 2012) (Balasubramanian, 2008) (C. Vidal V. I., 2014) (A. Rashidi A. M., 2013). Με τη σωστή επιλογή υλικού εργαλείου, το FSC θα επέτρεπε την παραγωγή τέτοιων καναλιών σε άλλα υλικά υψηλής αντοχής όπως κράματα Fe-, Ti- και Cu. Το FSC διαμορφώνει κανάλια σε ένα μόνο βήμα και είναι εξαιρετικά χρήσιμο στην κατασκευή εμπορικών εναλλακτών θερμότητας (T.R. McNelley, 2008).

Βάσει πρόσφατων δοκιμών και αξιολόγησης, το FSC φαίνεται να έχει τη δυνατότητα να ευδοκιμήσει στον κλάδο παραγωγής εναλλάκτη θερμότητας και καλουπιών (Ferraz). Τα συνεχή εσωτερικά κανάλια που παράγονται από την FSC έχουν μια ποικιλία εφαρμογών ως εναλλάκτες θερμότητας που μεταφέρουν θερμική ενέργεια μεταξύ πολλαπλών ρευστών ή μεταξύ επιφανειών με θερμική επαφή ενός υγρού και ενός στερεού σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για θέρμανση / εξάτμιση ή ψύξη / συμπύκνωση ρευστού ρεύματος για αποβολή ή ανάκτηση θερμότητας. Η συμπαγής επιφάνεια των εναλλακτών θερμότητας, δίνει την δυνατότητα για εφαρμογή τους ως εναλλάκτες θερμότητας οχημάτων, συμπυκνωτές και εξατμιστές στη βιομηχανία κλιματισμού και ψύξης, ψύκτες λαδιού αεροσκαφών, καλοριφέρ αυτοκινήτων και μεσοψύκτες ή συμπιεστές (Ferraz).

Τα κανάλια για κάθε τύπο εναλλάκτη θερμότητας μπορούν να κατασκευαστούν από την FSC. Αυτή η διαδικασία έχει επαληθευτεί ότι είναι μια πιθανή εναλλακτική λύση για τη συμβατική ψύξη και τις διαδικασίες ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων όπως διάτρηση, EDM και άλεση στις βιομηχανίες παραγωγής καλουπιών (Mustafa Kemal Kulekci, 2016) (Ferraz). Η FSC έχει τη δυνατότητα να διεισδύσει στην αεροδιαστημική, τη θαλάσσια, τη χειρσαία μεταφορά, την αυτοκινητοβιομηχανία, την άμυνα (για στρατιωτική χρήση) και τη βιοϊατρική βιομηχανία (Mustafa Kemal Kulekci, 2016) (Ferraz).

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4) φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση εργαλείου FSC.



Εικόνα 4 Τύπος εργαλείου FSC

8.2 AA6061-T6 – πάχος τεμαχίου 5mm

Οι πλάκες AA6061-T6 πάχους 5mm υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ανάδευση τριβής χρησιμοποιώντας διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας, μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου και την ταχύτητα πρόωσης και με διαφορετικές γεωμετρίες εργαλείων. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά των τριών εργαλείων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη μελέτη δίνονται στον Πίνακα 2 και οι συνθήκες επεξεργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 1. Ο πείρος διείσδυσε σε βάθος 3,2 mm (παρέχοντας απόσταση 0,8 mm μεταξύ του ώμου και του τεμαχίου). Η γωνία κλίσης του εργαλείου ήταν 0 ° και η φορά περιστροφής του αριστερόστροφη για όλες τις διαδρομές (Balasubramanian, 2008).


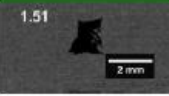
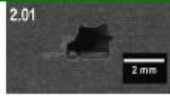

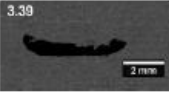



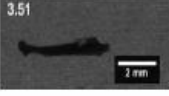



Πίνακας 1 Παράμετροι διεργασίας FSC

α/α διαδικασίας	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)
1	1100	130.2
2	1100	177.6
3	1200	130.2
4	1200	177.6

Πίνακας 2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν

Γεωμετρία εργαλείων							
Εργαλ είο	Διάμετ ρος ώμου (mm)	Μήκος πείρο υ (mm)	Διάμε τρος ακίδ ων (mm)	Προφίλ σπειρώμ ατος	Θέση σπειρώμ ατος (mm)	Γωνία σπειρώμ ατος (°)	Βάθος κοπής σπειρωμά των (mm)
FSC11	16	4	5	LHT	1.25	60	0.2
FSC12	16	4	5	LHT	1.25	60	0,5
FSC13	16	4	5	LHT	1.25	75	0,8

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά καναλιού του τεμαχίου AA6061-T6 που υποβλήθηκε σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FSC. Το μέγεθος του καναλιού μετράται σε mm².

Tool ID	1100 rpm	1100 rpm	1200 rpm	1200 rpm
	2.11 mm/sec	2.96 mm/sec	2.11 mm/sec	2.96 mm/sec
FSC 11	2.36 	1.51 	2.01 	1.57 
FSC 12	3.39 	3.72 	2.96 	3.27 
FSC 13	3.51 	3.64 	2.82 	3.67 

8.3 AI 5083 – πάχος τεμαχίου 10mm

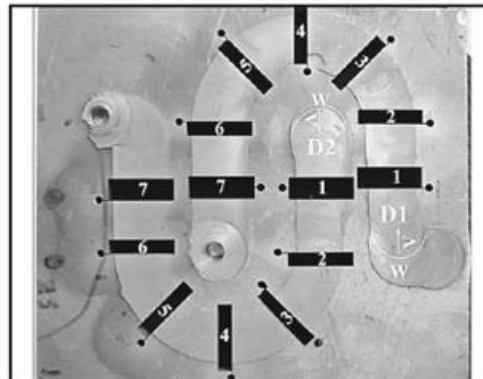
Μια πλάκα πάχους 10 mm από κράμα 5083 AI χρησιμοποιήθηκε ως κομμάτι εργασίας. Το υλικό του εργαλείου ήταν το H13, το οποίο είχε σκληρύνει έως και 51 HRC. Χρησιμοποιήθηκαν δύο προφίλ πείρων εργαλείων, στα οποία ένα από αυτά ήταν μη σπειροειδής προς τα πάνω κωνικός πείρος (UCP) και το άλλο προφίλ εργαλείου ήταν μη σπειροειδής ευθύγραμμος κυλινδρικός πείρος (SCP). Η γωνία κλίσης είναι ένας βασικός παράγοντας για την εξαγωγή του υλικού και τη δημιουργία καναλιού. Βάση προηγούμενων πειραμάτων σε άλλα κράματα αλουμινίου παρατηρήθηκε πως, η δομή του καναλιού έχει το βέλτιστο σχήμα και μέγεθος υπό γωνία κλίσης 3°. Επομένως, αυτή η μελέτη δημιουργήθηκε με κλίση 3°. Το εργαλείο UCP ρυθμίζεται χωρίς τη γωνία κλίσης μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, ενώ για το εργαλείο SCP χρησιμοποιήθηκε γωνία κλίσης 3°. Τα προφίλ των δύο εργαλείων και οι διαστάσεις τους αναφέρονται στον Πίνακα 5. Ο κοίλος ώμος με 5° χρησιμοποιήθηκε για να ενσωματώσει το εκχυλισμένο υλικό κάτω από τον ώμο. Οι παράμετροι πειραματικής εκτέλεσης της διαδικασίας MFSC, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή καναλιών με δύο εργαλεία, φαίνονται στον Πίνακα 4.

Οι υψηλές ταχύτητες περιστροφής και πρόωσης (1000rpm και 31,5 mm / min) επιλέχθηκαν για να δημιουργήσουν ένα μεγάλο κανάλι. Εκτός αυτού, η υψηλότερη απόσταση (0,8 mm) επιλέχθηκε επίσης για να μειώσει τη δύναμη ώμου

και την έλλειψη ροής υλικού για να αυξήσει επίσης το μέγεθος του καναλιού (A. Rashidi A. M., Int. J. Adv. Manuf. Technol. 80 (1087–1096), 2015).

Πίνακας 4 Παράμετροι διεργασίας FSC

α/α διαδικασίας	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Διάκενο (mm)
1	800	12	0.8
2	1000	31.5	0.8
3	1000	12	0.5

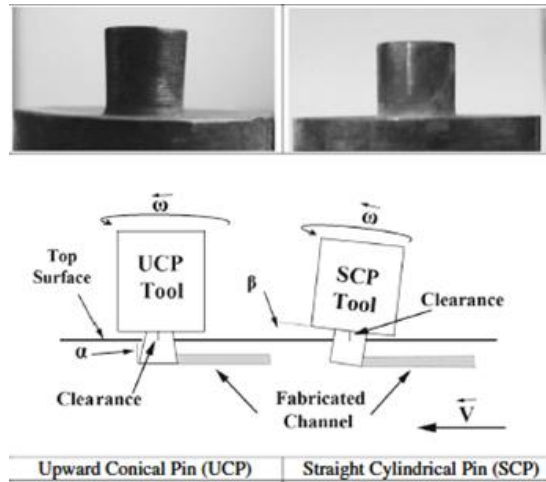


Location	D1 (CCW)	Channel Dimensions	D2 (CW)	Channel Dimensions
1		H= 3.61 mm W= 4.53 mm		H= 3.71 mm W= 4.34 mm
2		H= 3.42 mm W= 4.43 mm		H= 3.62 mm W= 4.12 mm
3		H= 3.22 mm W= 4.96 mm		H= 3.43 mm W= 4.06 mm
4		H= 3.37 mm W= 5.68 mm		H= 3.49 mm W= 4.24 mm
5		H= 3.20 mm W= 5.11 mm		H= 3.64 mm W= 4.13 mm
6		H= 3.40 mm W= 4.66 mm		H= 3.61 mm W= 4.20 mm
7		H= 3.32 mm W= 4.43 mm		H= 3.52 mm W= 4.27 mm

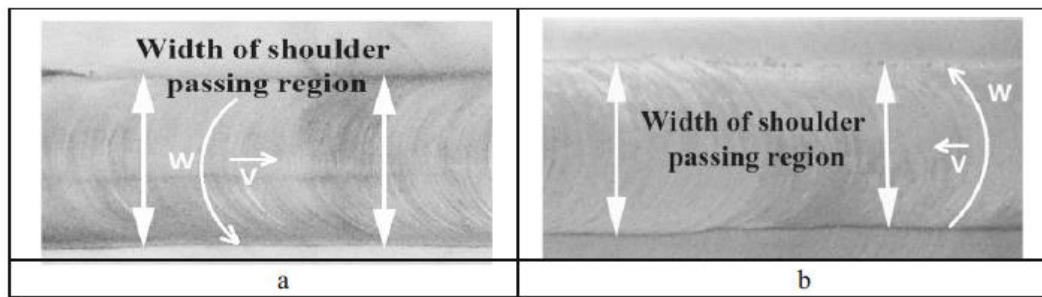
Εικόνα 5 Τα κανάλια όπως προέκυψαν από την πρώτη διεργασία (α/α 1) του τεμαχίου με το εργαλείο UCP

Πίνακας 5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν

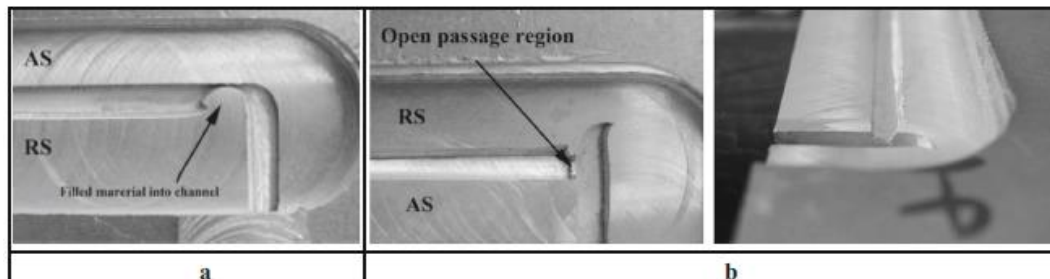
Γεωμετρία εργαλείων					
Εργαλείο	Διάμετρος ώμου (mm)	Μήκος πείρου (mm)	Διάμετρος ακίδων (mm)	Διάμετρος πείρου (mm)	Κωνικότητα ώμου (°)
UCP	25	7.8	7	8	5
SCP	25	7.8	8	8	5



Εικόνα 6 Αναπαράσταση εργαλείων UCP και SCP



Εικόνα 7 Επιφάνεια της ζώνης διεργασίας και διατομή του κατασκευασμένου καναλιού κάτω από τη δεύτερη διεργασία ($\alpha/\alpha 2$) χρησιμοποιώντας: (a) το εργαλείο SCP και (b) το εργαλείο UCP



Εικόνα 8(a) Κάτοψη του καναλιού (προς τα εμπρός στην εξωτερική διαδρομή). (b) Κάτοψη και πλάγια όψη του καναλιού (προς τα εμπρός στην εσωτερική διαδρομή), μετά από την τρίτη διεργασία ($\alpha/\alpha 3$).

8.4 AA5083-H111 – πάχος τεμαχίου 15mm

Οι περίοδοι βύθισης και παραμονής ($v = 0$) πραγματοποιήθηκαν υπό έλεγχο κατακόρυφης θέσης και η περίοδος επεξεργασίας ($v > 0$) πραγματοποιήθηκε υπό έλεγχο κατακόρυφης δύναμης προς τα κάτω με γωνία κλίσης 0° . Επιλέχθηκε, για όλες τις διαδρομές, ένας κυλινδρικός πείρος με διάμετρο 8 mm και αριστερόστροφα σπειρώματα κατά μήκος του και ένας επίπεδος ώμος με δύο σπειροειδείς ράβδους κύλισης με γωνία 360° με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 19 mm και 8 mm, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην **εικόνα 9**.

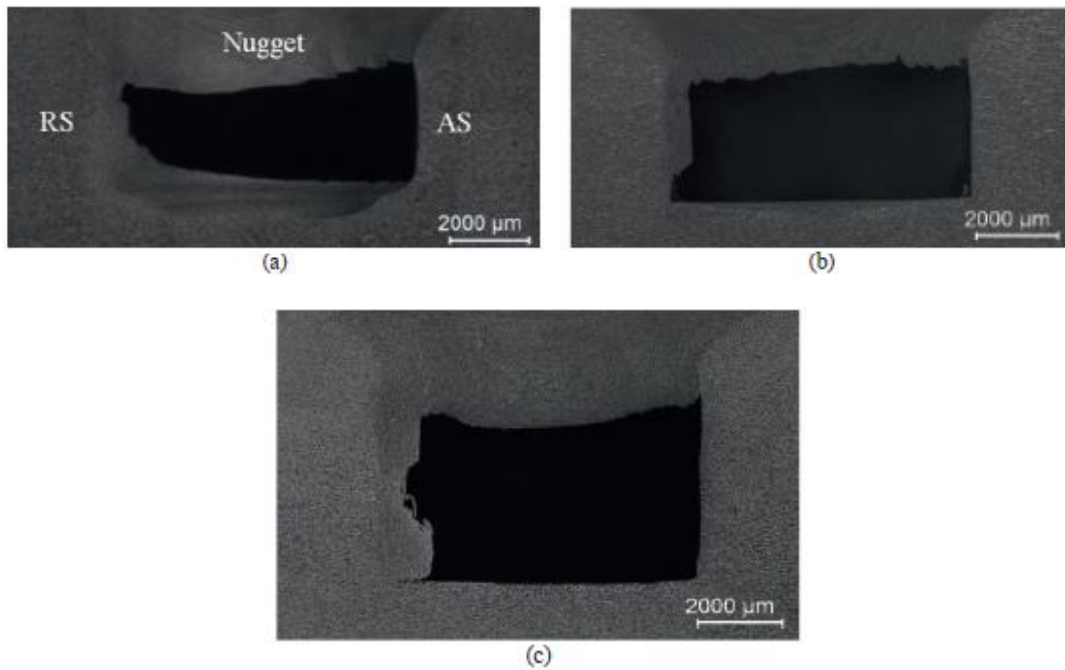


Εικόνα 9 Εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διεργασία FSC για το υλικό AA5083-H111

Προκειμένου να ληφθούν κανάλια με διαφορετική γεωμετρία, εφαρμόστηκαν τρία σύνολα παραμέτρων FSC, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6. Χρησιμοποιήθηκε ένα αρθρωτό χαλύβδινο εργαλείο H13, το οποίο επιτρέπει εσωτερική αναγκαστική ψύξη, που αποτελείται από το σώμα, τον ώμο και τον πείρο. Όλη η διάταξη του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε είχε έναν κυλινδρικό πείρο με διάμετρο 8mm και ώμο διαμέτρου 19mm. Ο κυλινδρικός πείρος που χρησιμοποιήθηκε είχε αριστερόστροφα σπειρώματα κατά μήκος του, με τραπεζοειδές προφίλ, βήμα σπειρώματος 3mm και βάθος κοπής 0,7mm. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εργαλείων που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7**. Το εργαλείο περιστράφηκε στις 1100rpm πραγματοποιώντας αριστερόστροφη περιστροφή. Η γωνία κλίσης του εργαλείου ήταν 0° για όλες τις διαδρομές (Ferraz).

Πίνακας 6 Παράμετροι διεργασίας FSC

α/α διαδικασίας	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
1	1100	50	0.7
2	1100	80	0.7
3	1100	50	0.7



Εικόνα 10 Οπτικές μακρογραφίες διατομών των καναλιών που δημιουργήθηκαν από τα εργαλεία FSC (a) U1, (b) U2, (c) L1

Πίνακας 7 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν

Γεωμετρία εργαλείων						
Εργαλείο	Διάμετρος ώμου (mm)	Μήκος πείρου (mm)	Βήμα σπειρώματος (mm)	Διάμετρος πείρου (mm)	Συνολικές σπείρες	Ύψος σπείρας (mm)
U1	19	6	3	8	2	0.7
U2	19	6	3	8	1	0.7
L1	19	8	3	8	1	1

8.5 AA7178-T6 – πάχος τεμαχίου 13mm

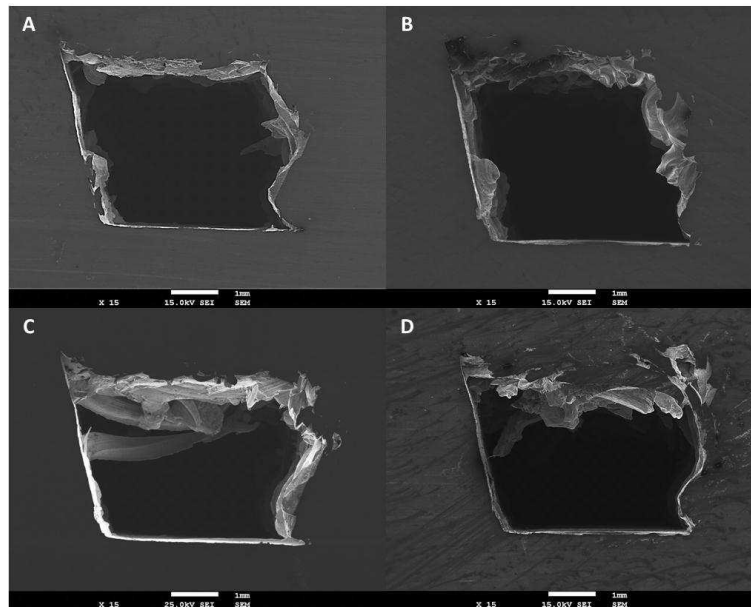
Οι περίοδοι βύθισης και παραμονής ($v = 0$) και η περίοδος επεξεργασίας ($v > 0$) πραγματοποιήθηκαν υπό έλεγχο κάθετης θέσης. Χρησιμοποιήθηκε εργαλείο FSW που επιτρέπει την εσωτερική αναγκαστική ψύξη για την εκτέλεση όλων των καναλιών. Αυτό το εργαλείο βασίζεται σε τρία κύρια συστατικά: το σώμα, τον ώμο και τον πείρο. Επιλέχθηκε, για όλες τις διαδρομές, ένας κωνικός πείρος με διάμετρο 5 mm και αριστερόστροφα σπειρώματα κατά μήκος του και ένας επίπεδος ώμος με δύο σπειροειδείς ράβδους κύλισης με γωνία 360° με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 20 mm και 9 mm, αντίστοιχα. Ο πείρος διείσδυσε σε βάθος 5,5 mm (χωρίς κενό μεταξύ του ώμου και του τεμαχίου). Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη μελέτη δίνονται στον **Πίνακα 9** και οι τέσσερις διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας παρατίθενται στον **Πίνακα 8**. Η γωνία κλίσης του εργαλείου ήταν 0° για όλες τις διαδρομές. Το εργαλείο περιστράφηκε αριστερόστροφα (C. Vidal V. I., Key Eng. Mater. 488 (105-108), 2012) (C. Vidal V. I., Mater. Sci. Forum 730 (817-822), 2013).

Πίνακας 8 Παράμετροι διεργασίας FSC

α/α διαδικασίας	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Βάθος κοπής (mm)
A	600	80	5.5
B	600	150	5.5
C	800	80	5.5
D	800	150	5.5

Πίνακας 9 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν

Γεωμετρία εργαλείων			
Εργαλείο	Διάμετρος ώμου (mm)	Μήκος πείρου (mm)	Διάμετρος πείρου (mm)
FSW	20	5	9



Εικόνα 11 Μακρογραφία που δείχνει τις γεωμετρίες των καναλιών σε διαφορετικές παραμέτρους επεξεργασίας FSC: (A) 600rpm, 80mm / min, (B) 600rpm, 150mm / min, (C) 800rpm, 80mm / min. και (D) 800rpm, 150mm / min

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικές πληροφορίες για κάθε έρευνα που μελετήθηκε και βοήθησε στην επιλογή παραμέτρων διεργασίας και υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

Πίνακας 10 Συνοπτική παρουσίαση άλλων ερευνών που μελετήθηκαν

Τεμάχιο			Παράμετροι διεργασίας			
Μελέτη	Υλικό	Πάχος τεμαχίου (mm)	Εργαλείο	Ταχύτητα πρόωσης (mm/min)	Ταχύτητα περιστροφή (rpm)	Φορά περιστροφής
Balasubramanian, N	AA6061-T6	5	Εργαλεία με σπείρωμα	130.2, 177.6	1100, 1200	Αριστερό στροφή
A. Rashidi, A. Mostafapour	Al 5083	10	Εργαλεία χωρίς σπείρωμα και με ανάποδη κωνικότητα	12, 31.5	800, 1000	Αριστερό στροφή
Ferraz, M.	AA5083-H111	15	Εργαλείο με σπείρωμα στον πείρο και στην κάτω επιφάνεια του ώμου	50, 80	1100	Αριστερό στροφή
C. Vidal, V. Infante, P. Vilaca	AA7178-T6	13	Εργαλείο χωρίς σπείρωμα	80, 150	600, 800	Αριστερό στροφή

9. Πειραματική διαδικασία

9.1 Μηχανή συγκόλλησης

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε η κάθετη φραιζομηχανή Kearney & Trecker Milwaukee του εργαστηρίου Συγκολλήσεων του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία φαίνεται στην **εικόνα 12**.



Εικόνα 12 Φραιζομηχανή τύπου Kearney & Trecker Milwaukee

Η παραπάνω φραιζομηχανή τύπου Kearney & Trecker Milwaukee μπορεί να αναπτύξει ταχύτητες περιστροφής εργαλείου από 25 rpm έως 1000 rpm και ταχύτητες πρόωσης από 13 mm/min έως 318 mm/min.

9.2 Εργαλεία συγκόλλησης

9.2.1 Υλικό εργαλείου

Τα εργαλεία που μελετήθηκαν για την δημιουργία των καναλιών είναι κατασκευασμένα από εργατοχάλυβα Sverker 21 σκληρότητας 61 HRC.

9.2.2 Διαστάσεις εργαλείων

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων μελετήθηκαν τρία διαφορετικά εργαλεία. Με βάση την έρευνα που πραγματοποιήθηκε επιλέχθηκαν οι παρακάτω διαστάσεις για τις διαμέτρους του περιουχενίου (shoulder) και του πείρου(pin) για το κάθε εργαλείο αντίστοιχα, όπως φαίνεται παρακάτω στον **πίνακα 11**.

Πίνακας 11 Διαστάσεις εργαλείων

α/α	Διάμετρος Περιουχενίου (mm)	Διάμετρος Πείρου (mm)	Ύψος πείρου (mm)
1	22	5.9	5.1
2	22	5.9	5.1
3	19	8	5.1

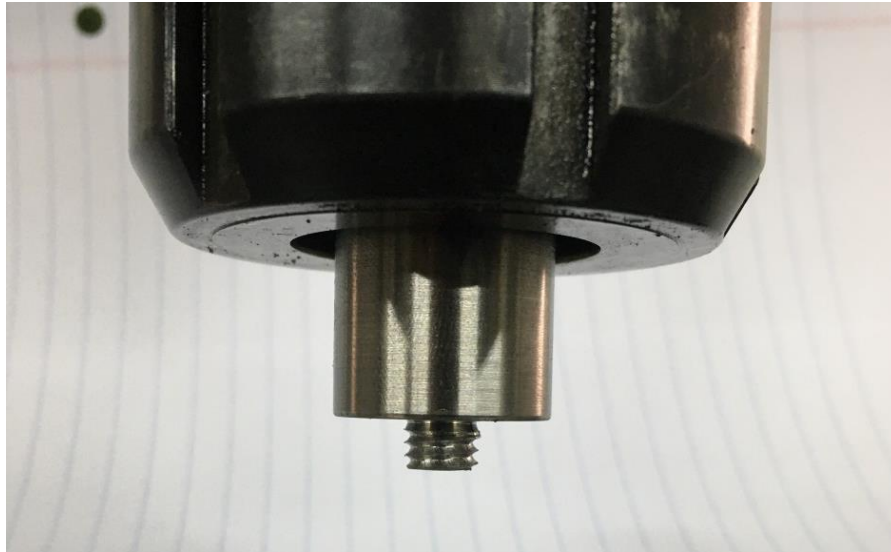
Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές διαδικασίες παρουσιάζονται παρακάτω στις **εικόνες 13, 14 και 15**. Κάθε εργαλείο διέθετε διαφορετικές παραμέτρους επιφέροντας με αυτόν τον τρόπο διαφορετικά πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 13 Εργαλείο 1



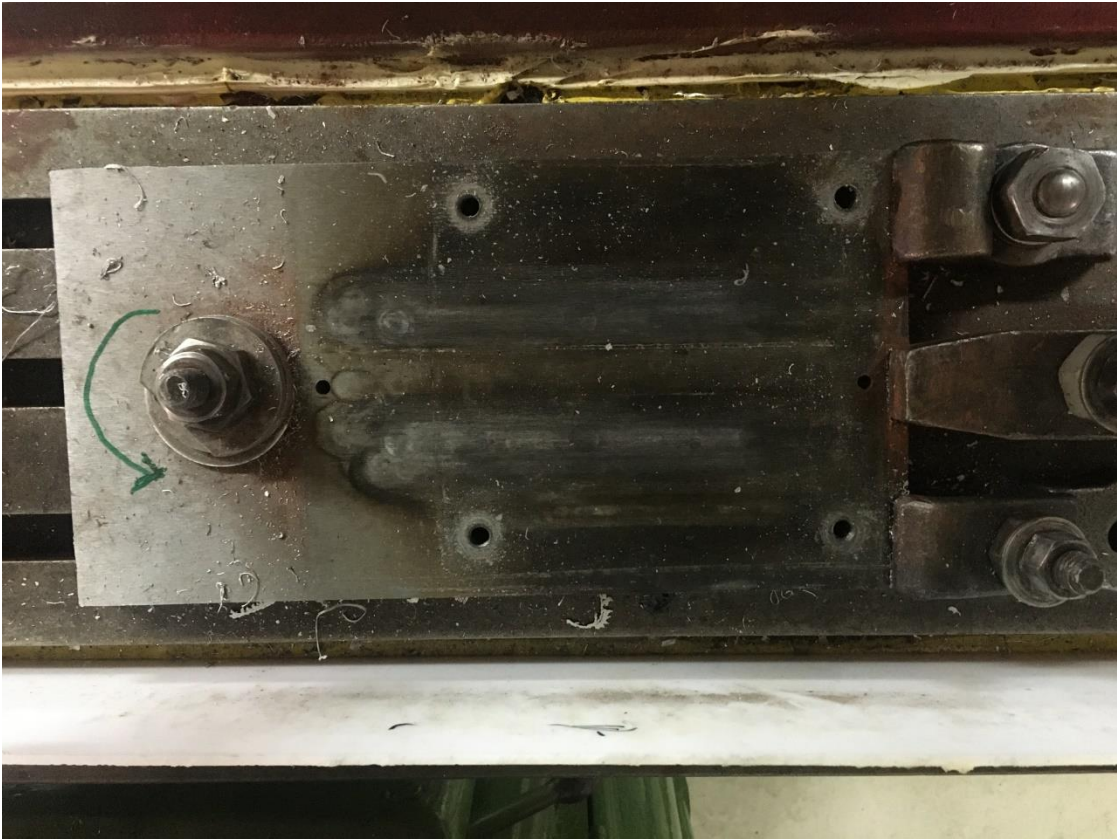
Εικόνα 14 Εργαλείο 2 (Επεξεργασία του εργαλείου 1 με μείωση της διαμέτρου του πείρου στα 4.5mm με ύψος λαιμού 1.8mm)



Εικόνα 15 Εργαλείο 3

9.3 Πλάκα συγκράτησης

Για την συγκράτηση των τεμαχίων προς συγκόλληση χρησιμοποιήθηκε ειδική πλάκα συγκράτησης, η οποία προσαρμόζεται ειδικά στο σύστημα συγκράτησης της φραιζομηχανής. Η πλάκα αυτή συγκρατείται από τη μία πλευρά της με μια σπή 12 χιλιοστών και από την άλλη πλευρά της με τρία μάγουλα. Είναι κατασκευασμένη από απλό χάλυβα, ενώ οι διαστάσεις της είναι 150mm x 290mm, πλάτος επί μήκος, πάχους 19mm. Διαθέτει επίσης 4 οπές με σπείρωμα M8. Πάνω σε αυτή τη βάση τοποθετούνται τα τεμάχια προς συγκόλληση, ενώ αυτά συγκρατούνται στην βάση με 4 κοχλίες M8 τύπου Allen, οι οποίοι διασφαλίζουν ότι τα τεμάχια δεν θα μετακινηθούν κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης καθώς αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η δομή της πλάκας συγκράτησης φαίνεται παρακάτω στην **εικόνα 16**.



Εικόνα 16 Πλάκα συγκράτησης τεμαχίων

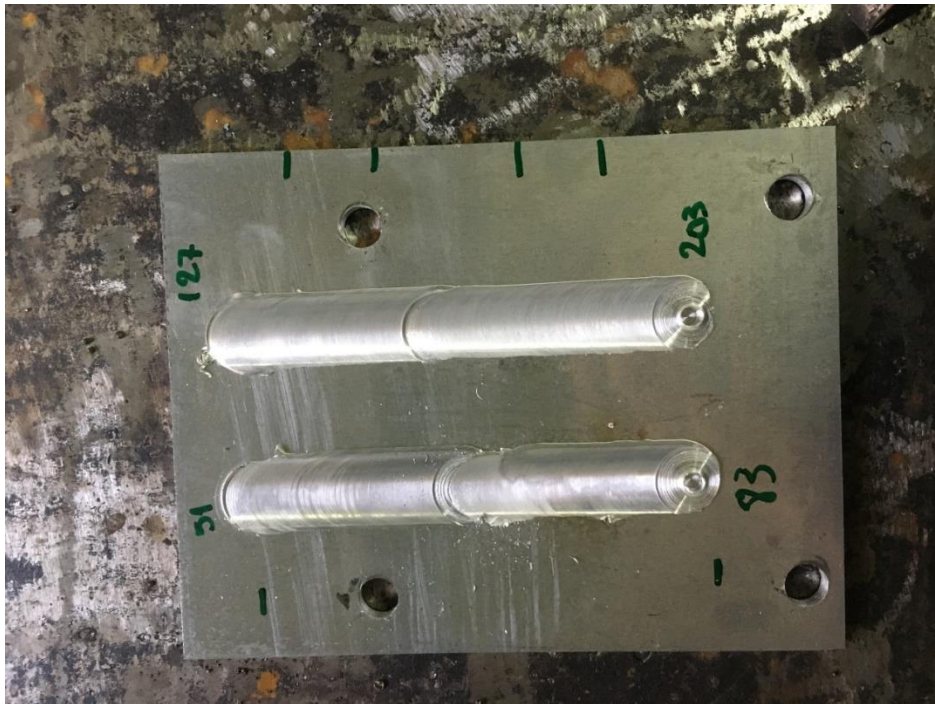
9.4 Δοκίμια αλουμινίου προς συγκόλληση

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι αλουμινίου Al5083-H111. Οι διαστάσεις τους είναι 200mm x 155mm, μήκος επί πλάτος, με πάχος 6mm.

Σε κάθε πλάκα πραγματοποιήθηκαν 4 πειράματα με διαφορετικές συνθήκες συγκόλλησης κατά μέσο όρο για οικονομία χρόνου και υλικού, όπως φαίνεται παρακάτω στις **εικόνες 17 και 18**.



Εικόνα 17 Πλάκες αλουμινίου προς κατεργασία



Εικόνα 18 Δοκίμια μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας

9.5 Μεταλλογραφική αξιολόγηση

Μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας, τα συγκολλημένα κομμάτια τεμαχίζονται σε κατάλληλες διαστάσεις με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανών του εργαστηρίου (βλ. **Εικόνες 19, 20**), ώστε να υποβληθούν σε μεταλλογραφική επεξεργασία.



Εικόνα 19 Κοπτική μηχανή τύπου Rich Young με προινοταινία



Εικόνα 20 Μηχανή Υδροκοπής τύπου Struers Discotom-2

9.5.1 Εξοπλισμός λείανσης

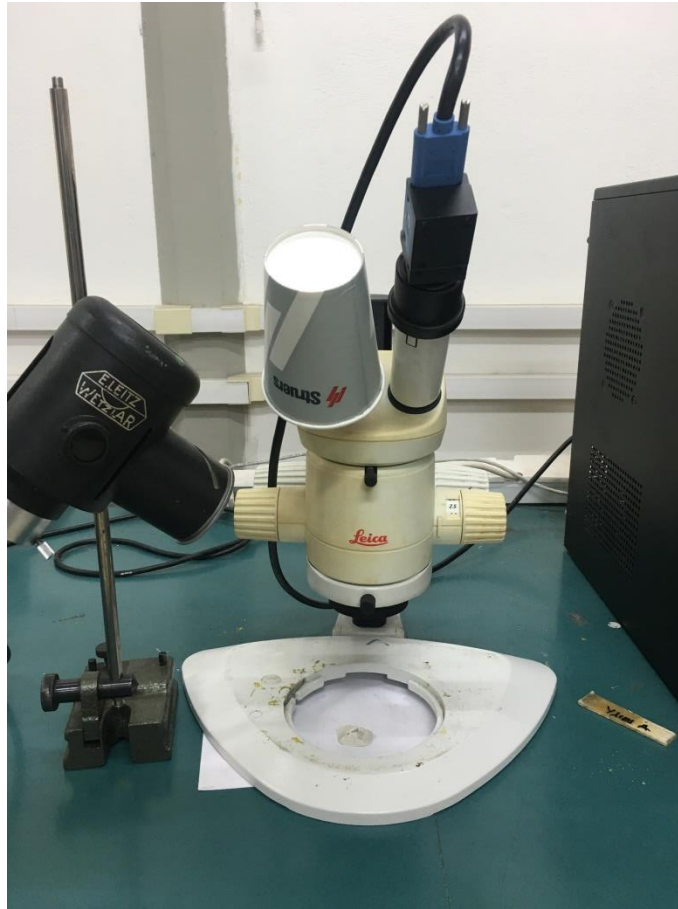
Η διαδικασία της λείανσης λαμβάνει χώρα σε κατάλληλη υδρόψυκτη διάταξη τύπου STRUERS, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω στην **εικόνα 21**. Τα δύο κύρια μέρη της διάταξης είναι το περιστρεφόμενο πλατό και το σύστημα ψύξης. Η συσκευή έχει δυνατότητα ελέγχου της γωνιακής ταχύτητας μέσω ενός ποτενσιόμετρου, χάρη στο οποίο αυτή παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η συγκεκριμένη συσκευή έχει εύρος επιλογής γωνιακής ταχύτητας από 50 έως και 500 στροφές ανά λεπτό. Για την ψύξη και τη λίπανση της επιφάνειας λείανσης χρησιμοποιείται νερό, η παροχή του οποίου γίνεται από βρύση ενσωματωμένη στη συσκευή. Τα λειαντικά χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν για την λείανση των διατομών των καναλιών διέθεταν κοκκομετρία 120, 500 και 1000 grit, αντίστοιχα.



Εικόνα 21 Λειαντική μηχανή τύπου Struers

9.5.2 Εξοπλισμός οπτικής μικροσκοπίας

Μετά τις κατάλληλες μεταλλογραφικές διαδικασίες τα δοκίμια παρατηρήθηκαν και φωτογραφήθηκαν με τη χρήση μικροσκοπίου τύπου Leica, όπως φαίνεται στην **εικόνα 22**, το οποίο διαθέτει τυποποιημένες κλίμακες μεγέθυνσης 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.2, 4.0.



Εικόνα 22 Μικροσκόπιο τύπου Leica

9.6 Συνθήκες πειραματικών διαδικασιών

Πραγματοποιήθηκαν 27 πειράματα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες προκειμένου να φτάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα, το οποίο ήταν η δημιουργία καναλιών στο εσωτερικό των πλακών. Τα 9 πρώτα πειράματα, που υλοποιήθηκαν με το πρώτο εργαλείο, δεν παρήγαγαν καθόλου κανάλια στις πλάκες αλουμινίου. Ακόμη, τα δοκίμια με αριθμό 15 και 16 δεν εμφάνισαν, επίσης, κανάλια. Μόλις στα 16 παρατηρήθηκαν τα ζητούμενα κανάλια, των οποίων η γεωμετρία διαφέρει ανάλογα με τις παραμέτρους κάθε διεργασίας. Οι παράμετροι κατεργασίας συνοπτικά παρουσιάζονται στον **πίνακα 12**.

Πίνακας 12 Παράμετροι πειραματικών διαδικασιών

Αριθμός δοκιμίου	Αριθμός εργαλείου	RPM (στροφές ανά λεπτό)	Πρόωση (mm/min)	Φορά περιστροφής εργαλείου	Παρουσία καναλιού	Διατομή καναλιού(mm ²)
1	1	1000	83	Αριστερόστροφα	ΟΧΙ	-
2	1	1000	51	Αριστερόστροφα	ΟΧΙ	-
3	1	1000	127	Αριστερόστροφα	ΟΧΙ	-
4	1	590	127	Αριστερόστροφα	ΟΧΙ	-
5	1	590	83	Αριστερόστροφα	ΟΧΙ	-
6	1	590	51	Αριστερόστροφα	ΟΧΙ	-
7	1	590	127	Δεξιόστροφα	ΟΧΙ	-
8	1	590	83	Δεξιόστροφα	ΟΧΙ	-
9	1	590	51	Δεξιόστροφα	ΟΧΙ	-
10	1	1000	127	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,85
11	1	1000	83	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,84
12	1	1000	51	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,50
13	1	1000	203	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,77
14	1	1000	318	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,43
15	2	1000	51	Δεξιόστροφα	ΟΧΙ	-
16	2	1000	83	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,16
17	2	1000	127	Δεξιόστροφα	ΟΧΙ	-
18	2	1000	203	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,21
19	2	1000	318	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	0,19
20	3	1000	83	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	2,74
21	3	1000	127	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	8,71
22	3	1000	203	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	6,57
23	3	1000	318	Δεξιόστροφα	ΝΑΙ	8,79
24	3	1000	83	Αριστερόστροφα	ΝΑΙ	0,61
25	3	1000	127	Αριστερόστροφα	ΝΑΙ	2,54
26	3	1000	203	Αριστερόστροφα	ΝΑΙ	3,26
27	3	1000	318	Αριστερόστροφα	ΝΑΙ	3,67

9.7 Συγκόλληση των πλακών αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6mm

9.7.1 Δοκίμιο 10

Στο δοκίμιο 10 (βλ. **Εικόνα 23**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 127 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 1.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 2,2 mm πλάτος και 0,9 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,85 mm².



Εικόνα 23 Διατομή δοκμίου 10

9.7.2 Δοκίμιο 11

Στο δοκίμιο 11 (βλ. **Εικόνα 24**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 83 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 1.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 1,96 mm πλάτος και 0,86 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,84 mm².



Εικόνα 24 Διατομή δοκιμίου 11

9.7.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για τη πειραματική διαδικασία των δοκιμών 10 και 11 χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 1 με διάμετρο περιουχενίου 22 mm και διάμετρο πείρου 5,9 mm, ενώ το εργαλείο είχε μια κλίση -3° κατά τον άξονα γγ'.

Από τη μορφολογία του καναλιού, το οποίο και στα δύο δοκίμια έχει σχήμα τριγώνου, αλλά και την εναπόθεση του βισκοπλαστικού υλικού στην οροφή του, φαίνεται πως καθοριστικό ρόλο παίζουν οι διαστάσεις του πείρου (5,9 mm) του εργαλείου, όπως επίσης και η φορά του σπειρώματος σε συνδυασμό με τη φορά περιστροφής του εργαλείου.

Ύστερα από πολλά πειράματα με αριστερόστροφη φόρα περιστροφής του εργαλείου δεν καταλήξαμε σε κάποιο αποτέλεσμα. Έτσι, καταφεύγουμε στο συμπέρασμα ότι η δομή του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε ευνοεί την δημιουργία καναλιών κατά την δεξιόστροφη φορά.

Πιο συγκεκριμένα, το δεξιόστροφο σπείρωμά του δημιουργεί μια προς τα πάνω ροή του υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργείται κανάλι. Οι διαστάσεις του καθορίζονται από τις παραμέτρους διεργασιών, δηλαδή όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης τόσο μεγαλύτερο κανάλι σχηματίζεται. Για να καταλήξουμε σε ασφαλές συμπέρασμα συνεχίστηκαν τα πειράματα με μικρότερες και υψηλότερες ταχύτητες, παρατηρώντας ταυτόχρονα την κάθε προκύπτουσα δομή.

9.7.4 Δοκίμιο 12

Στο δοκίμιο 12 (βλ. **Εικόνα 25**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 51 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 1.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 1,59 mm πλάτος και 0,69 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,50 mm².



Εικόνα 25 Διατομή δοκμίου 12

9.7.5 Δοκίμιο 13

Στο δοκίμιο 13 (βλ. **Εικόνα 26**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 203 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 1.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 2,34 mm πλάτος και 0,86 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,77 mm².



Εικόνα 26 Διατομή δοκιμίου 13

9.7.6 Δοκίμιο 14

Στο δοκίμιο 14 (βλ. **Εικόνα 27**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 318 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 1.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 1,70 mm πλάτος και 0,69 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,43 mm².



Εικόνα 27 Διατομή δοκιμίου 14

9.7.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για τη πειραματική διαδικασία των δοκιμών 12,13 και 14 χρησιμοποιήθηκε το ίδιο εργαλείο με τα παραπάνω πειράματα, το εργαλείο 1 με διάμετρο περιουχενίου 22 mm και διάμετρο πείρου 5,9 mm, έχοντας κλίση -3° κατά τον άξονα yy' .

Παρατηρούμε λοιπόν στο δοκίμιο 12, ότι καθώς μειώθηκε η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου μειώθηκαν και οι διαστάσεις του καναλιού. Γεγονός αναμενόμενο, αφού αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα το βισκοπλαστικό υλικό που εναποθέτεται στην οροφή του καναλιού καθυστερεί να φθάσει στο σημείο πήξης, πληρώνοντας με αυτό τον τρόπο ένα μικρό μέρος του καναλιού με υλικό.

Αντίστοιχα στο δοκίμιο 13. όπου αυξήθηκε η ταχύτητα πρόωσης παρατηρήθηκε και αύξηση του εμβαδού της διατομής του καναλιού, αφήνοντας όμως στο εσωτερικό του μητρικό υλικό.

Ταυτόχρονα στα δοκίμια 13 και 14 στην κάτω επιφάνεια του καναλιού δημιουργήθηκαν κορυφές, δηλαδή παρουσιάζει μια τραχύτητα, κυματοειδή μορφή, η οποία οφείλεται στη δομή του εργαλείου. Η δομή αυτή σε συνδυασμό με τις υψηλές ταχύτητες πρόωσης επέφεραν τη μορφή αυτή.

9.7.8 Δοκίμιο 16

Στο δοκίμιο 16 (βλ. **Εικόνα 28**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 83 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 0,72 mm πλάτος και 0,49 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,16 mm².



Εικόνα 28 Διατομή δοκιμίου 16

9.7.9 Δοκίμιο 18

Στο δοκίμιο 18 (βλ. **Εικόνα 29**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 203 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 0,78 mm πλάτος και 0,54 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,21 mm².



Εικόνα 29 Διατομή δοκμίου 18

9.7.10 Δοκίμιο 19

Στο δοκίμιο 19 (βλ. **Εικόνα 30**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 318 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 1,10 mm πλάτος και 0,52 mm ύψους, τριγωνικού σχήματος, με εμβαδόν διατομής 0,19 mm².



Εικόνα 30 Διατομή δοκιμίου 19

9.7.11 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για τη πειραματική διαδικασία των δοκιμών 16,18 και 19 χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 2, το οποίο έχει τις ίδιες διαστάσεις με το εργαλείο 1, δηλαδή με διάμετρο περιαιχενίου 22 mm και διάμετρο πείρου 5,9 mm, με τη διαφορά ότι παράχθηκε από την κατεργασία του 1^{ου}. Για την παρασκευή του δημιουργήθηκε λαϊμός στο πάνω μέρος του πείρου μειώνοντας την διάμετρο του στο σημείο αυτό στα 4,5 mm με πλάτος κοπής 1,8 mm. Το εργαλείο είχε, επίσης, κλίση -3° κατά τον άξονα γγ'.

Η γεωμετρία του καναλιού παραμένει σταθερή με τα προηγούμενα πειράματα, αλλά παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στις διαστάσεις του που οφείλονται στην μείωση της διαμέτρου στο πάνω μέρος του πείρου που έχει το εργαλείο. Με την μείωση της διαμέτρου έχουμε μικρότερη ροή υλικού στο πάνω τμήμα του μητρικού υλικού, με αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους του καναλιού.

Ωστόσο, όσο αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης παρατηρούμε ότι αυξάνεται ελαφρώς και το πλάτος του καναλιού που σχηματίζεται. Ακόμη, εσωτερικά των καναλιών φαίνεται να διατηρείται μέρος του βισκοπλαστικού υλικού, ενώ στα δοκίμια 16 και 18 η κάτω επιφάνειά τους εμφανίζει κυματοειδή μορφή.

9.7.12 Δοκίμιο 20

Στο δοκίμιο 20 (βλ. **Εικόνα 31**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 83 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 3,94 mm πλάτος και 1,64 mm ύψους, τραπεζοειδούς σχήματος, με εμβαδόν διατομής 2,74 mm².

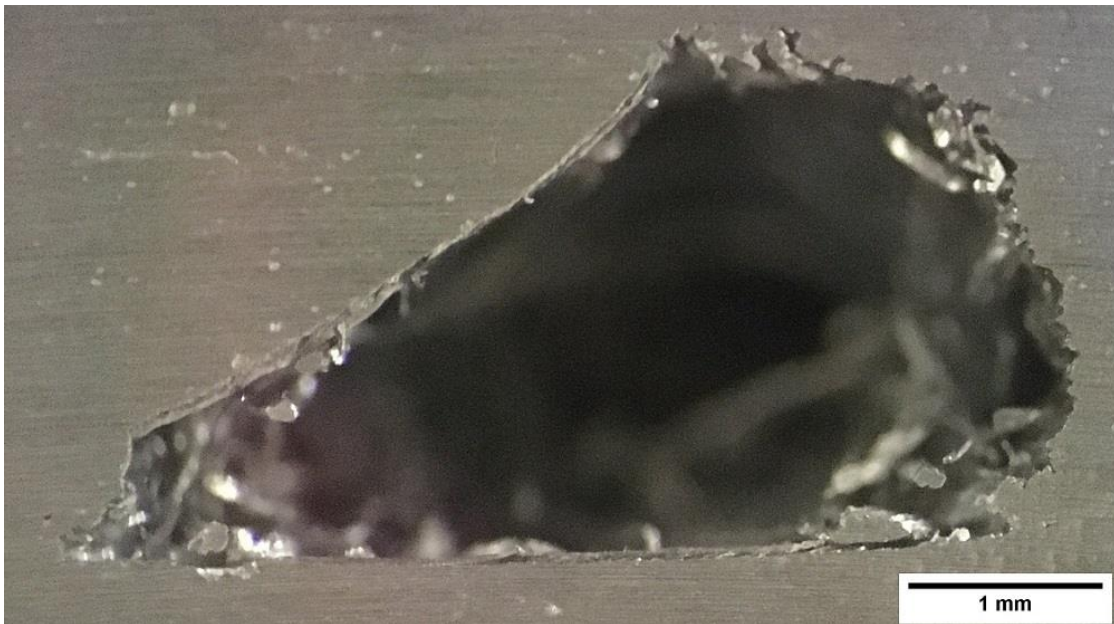


Εικόνα 31 Διατομή δοκιμίου 20

9.7.13 Δοκίμιο 21

Στο δοκίμιο 21 (βλ. **Εικόνα 32**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 127 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 5,04 mm πλάτος και 2,63 mm ύψους, τραπεζοειδούς σχήματος, με εμβαδόν διατομής 8,71 mm².



Εικόνα 32 Διατομή δοκμίου 21

9.7.14 Δοκίμιο 22

Στο δοκίμιο 22 (βλ. **Εικόνα 33**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 203 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 5,33 mm πλάτος και 1,98 mm ύψους, τραπεζοειδούς σχήματος, με εμβαδόν διατομής 6,57 mm².

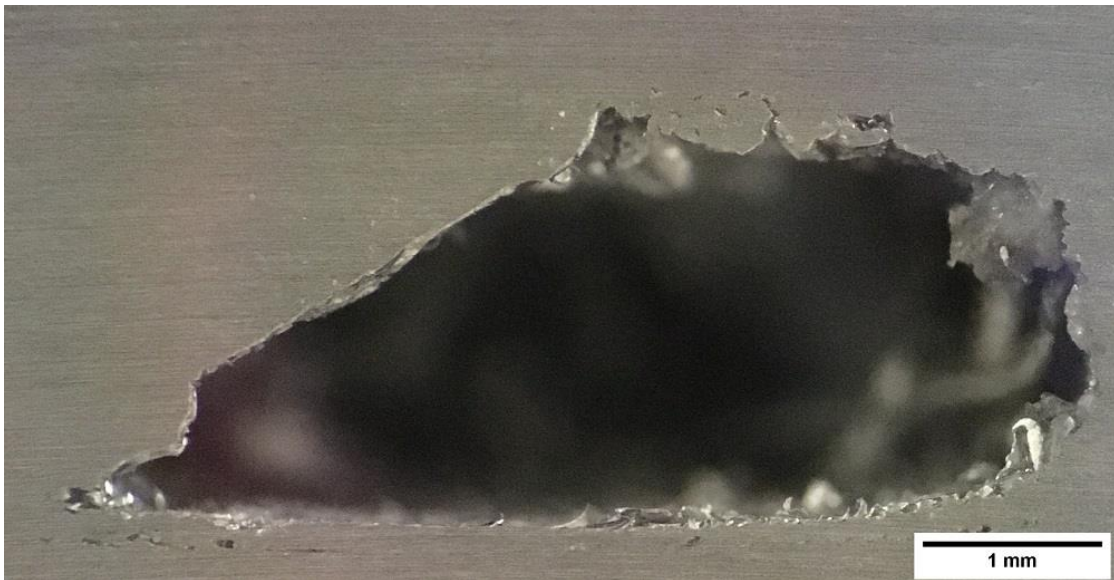


Εικόνα 33 Διατομή δοκιμίου 22

9.7.15 Δοκίμιο 23

Στο δοκίμιο 23 (βλ. **Εικόνα 34**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 318 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με δεξιόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 5,59 mm πλάτος και 2,04 mm ύψους, τραπεζοειδούς σχήματος, με εμβαδόν διατομής 8,79 mm².



Εικόνα 34 Διατομή δοκιμίου 23

9.7.16 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Έπειτα από μια αστοχία του πείρου του εργαλείου 2 πραγματοποιήθηκε αντικατάστασή του μ' ένα τρίτο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων στα δοκίμια 20, 21, 22 και 23.

Το εργαλείο 3 έχει διάμετρο περιουχενίου 19 mm και διάμετρο πείρου 8 mm, ενώ διατηρεί την κλίση -3° κατά τον άξονα γγ'.

Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα ότι η αύξηση της διαμέτρου του πείρου του εργαλείου οδήγησε στη δημιουργία σαφώς μεγαλύτερων σε πλάτος και ύψος καναλιών, των οποίων η μορφή μεταβλήθηκε σε τραπεζοειδής.

Παρατηρούμε από τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών πως, με εξαίρεση το κανάλι 22, το εμβαδόν της διατομής τους αυξάνεται, όπως ήταν αναμενόμενο. Στο κανάλι 22, όπου έχουμε μείωση της διατομής του συγκριτικά με εκείνη του δοκιμίου 23, φαίνεται ότι στην κάτω επιφάνεια του παρουσιάζει μια στρώση βισκοπλαστικού υλικού, το οποίο κατά τη διεργασία δεν μετακινήθηκε στην άνω επιφάνεια του καναλιού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να παραμείνει στο κάτω μέρος του καναλιού παρουσιάζοντας ασυνέχειες στο υλικό.

9.7.17 Δοκίμιο 24

Στο δοκίμιο 24 (βλ. **Εικόνα 35**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 83 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με αριστερόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 0,80 mm πλάτος και 0,75 mm ύψους, σχήματος ρόμβου, με εμβαδόν διατομής 0,61 mm².

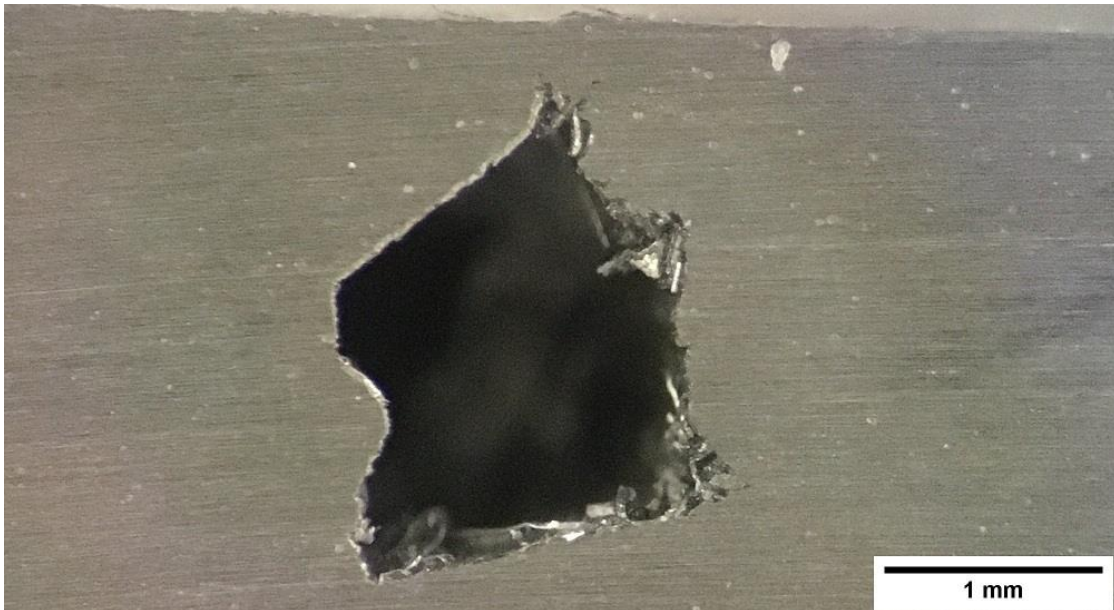


Εικόνα 35 Διατομή δοκιμίου 24

9.7.18 Δοκίμιο 25

Στο δοκίμιο 25 (βλ. **Εικόνα 36**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 127 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με αριστερόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 1,61 mm πλάτος και 2,04 mm ύψους, σχήματος ρόμβου, με εμβαδόν διατομής 2,54 mm².



Εικόνα 36 Διατομή δοκμίου 25

9.7.19 Δοκίμιο 26

Στο δοκίμιο 26 (βλ. **Εικόνα 37**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 203 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με αριστερόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 1,91 mm πλάτος και 2,60 mm ύψους, σχήματος ρόμβου χωρίς οροφή, με εμβαδόν διατομής 3,26 mm².

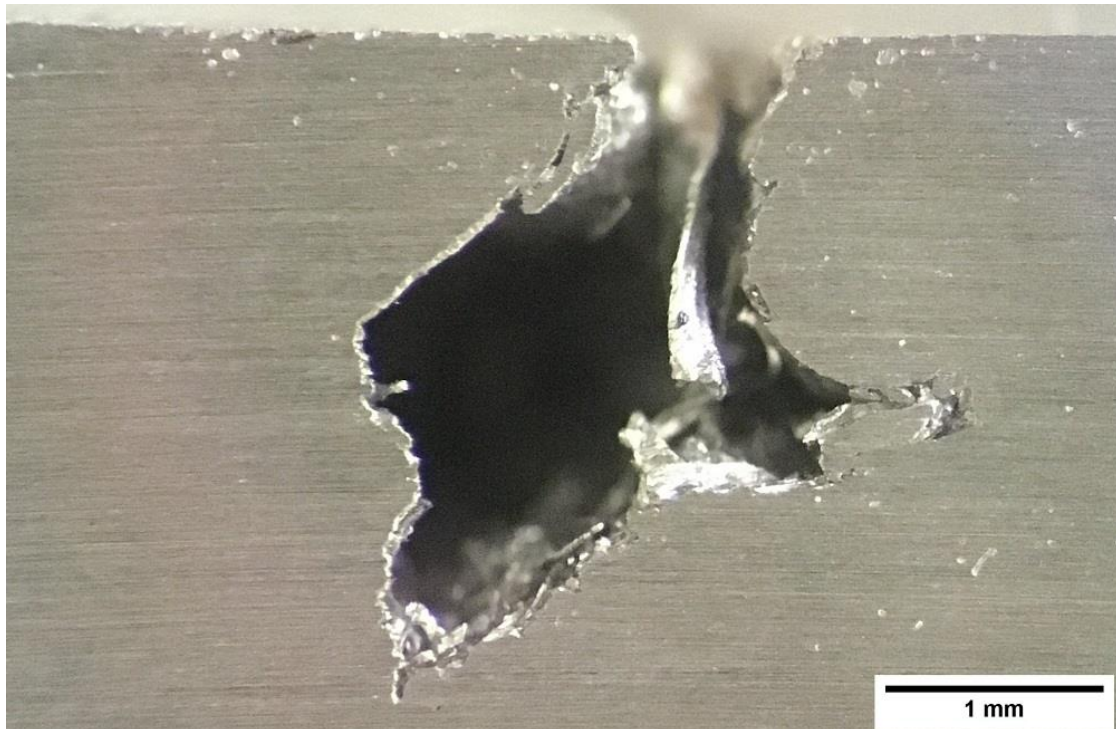


Εικόνα 37 Διατομή δοκιμίου 26

9.7.20 Δοκίμιο 27

Στο δοκίμιο 27 (βλ. **Εικόνα 38**), οι παράμετροι της πειραματικής διεργασίας για την δημιουργία εσωτερικού καναλιού σε πλάκα αλουμινίου AA5083-H111 πάχους 6 mm ήταν ταχύτητα πρόωσης 318 mm/min και ταχύτητα περιστροφής εργαλείου 1000 RPM με αριστερόστροφη φορά. Για την διεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3.

Οι διαστάσεις του καναλιού που εμφανίστηκε είναι 2,25 mm πλάτος και 2,77 mm ύψους, σχήματος ρόμβου, με εμβαδόν διατομής 3,67 mm².



Εικόνα 38 Διατομή δοκιμίου 27

9.7.21 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Για τη πειραματική διαδικασία των δοκιμών 24, 25, 26 και 27 χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο 3 με διάμετρο περιουχενίου 19 mm και διάμετρο πείρου 8 mm, έχοντας κλίση -3° κατά τον άξονα γγ'. Το εργαλείο περιστρεφόταν με αριστερόστροφη φορά.

Παρατηρείται στα παραπάνω πειράματα, πως η ροή του υλικού είναι προς τα κάτω, δηλαδή το βισκοπλαστικό υλικό ρέει προς την κάτω επιφάνεια του καναλιού. Αυτό συμβαίνει λόγω της αριστερόστροφης φοράς περιστροφής του εργαλείου και σε συνδυασμό με το ότι διαθέτει δεξιόστροφο σπείρωμα ωθεί το υλικό προς αυτή την κατεύθυνση. Ως απόρροια αυτού βλέπουμε να μειώνεται το πάχος της οροφής του σε σημείο, όπου σε μεγάλες ταχύτητες πρόωσης το κανάλι μετατρέπεται σε απλή αυλάκωση, παρουσιάζει δηλαδή απουσία μητρικού υλικού στο πάνω μέρος.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως το εμβαδόν της διατομής των καναλιών αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης του εργαλείου, όπως παρατηρήθηκε και στα παραπάνω πειράματα.

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων σε 27 δοκίμια, έχοντας παρατηρήσει την παρουσία καναλιών σε μόλις 16 από αυτά, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των διαστάσεων και του εμβαδού διατομής κάθε καναλιού. Οι διαστάσεις αυτές, όπως παρουσιάστηκαν και παραπάνω φαίνονται συγκεντρωτικά στον **πίνακα 13**.

Πίνακας 13 Διαστάσεις προκυπτουσών καναλιών ανά δοκίμιο

Δοκίμιο	Πλάτος(mm)	Ύψος(mm)	Διατομή(mm ²)
10	2,20	0,90	0,85
11	1,96	0,86	0,84
12	1,59	0,69	0,50
13	2,34	0,86	0,77
14	1,70	0,69	0,43
16	0,72	0,49	0,16
18	0,78	0,54	0,21
19	1,10	0,52	0,19
20	3,94	1,64	2,74
21	5,04	2,63	8,71
22	5,33	1,98	6,57
23	5,59	2,04	8,79
24	0,80	0,75	0,61
25	1,61	2,04	2,54
26	1,91	2,60	3,26
27	2,25	2,77	3,67

9.8 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αλλά και μετά το πέρας όλων των πειραματικών διαδικασιών και της οπτικής απεικόνισης των δοκιμίων μέσω του μικροσκοπίου σημειώθηκαν ορισμένα συμπεράσματα και παρατηρήσεις.

Συγκεκριμένα, καθώς πραγματοποιούνταν τα πειράματα, λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους εμφάνισης των καναλιών παρατηρήθηκε, πως το δεξιόστροφο σπείρωμα των εργαλείων σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής (1000 RPM) με δεξιόστροφη φορά περιστροφής είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία καναλιών. Αντίθετα, σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής (590 RPM) και σε αριστερόστροφη φορά περιστροφής του εργαλείου δεν εμφανίστηκαν κανάλια. Αυτό οφείλεται στην ροή του υλικού, δηλαδή το δεξιόστροφο σπείρωμα σε

συνδυασμό με την ωρολογιακή φορά περιστροφής του εργαλείου προκαλούν εξαναγκασμένη ροή του εναποτιθέμενου υλικού στην άνω επιφάνεια του καναλιού, προς τα πάνω ροή, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο την απουσία υλικού στο κεντρικό τμήμα του μητρικού υλικού και δίνοντας τελικά την μορφή του παραγόμενου καναλιού. Για την εμφάνισή του καθοριστικό ρόλο έπαιξε και η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, καθώς αυτή με την σειρά της, σε υψηλές τιμές, εναποθούσε το βισκοπλαστικό υλικό στο πάνω τμήμα του μητρικού υλικού και λόγω της υψηλής θερμότητας που εκλυόταν στις υψηλές στροφές επιταχυνόταν η διαδικασία αυτή, ενώ στις χαμηλότερες ταχύτητες το βισκοπλαστικό υλικό καθυστερούσε να ανέλθει με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται εσωτερική αυλάκωση.

Μεγάλο ενδιαφέρον μελέτης είχε και ο συνδυασμός των πειραματικών παραμέτρων υψηλής ταχύτητας περιστροφής και αριστερόστροφης φοράς περιστροφής του εργαλείου. Στην περίπτωση αυτή, η αριστερόστροφη φορά προκαλούσε μία αντίθετη με τα παραπάνω πειράματα διεργασία, καθώς όταν το εργαλείο με δεξιόστροφο σπείρωμα περιστρεφόταν αντιωρολογιακά δημιουργούσε ροή του εναποτιθέμενου υλικού στην κάτω επιφάνεια του καναλιού, προς τα κάτω ροή, ως απόρροια τη μορφή των καναλιών, όπου απουσίαζε το μητρικό υλικό από την άνω επιφάνεια τους. Το αποτέλεσμα, δηλαδή, ήταν ανοιχτές αυλακώσεις.

Όσον αφορά τη δομή, το μέγεθος και τη μορφολογία των καναλιών καθοριστικός παράγοντας ήταν η δομή των εργαλείων. Όσο μεγαλύτερα ήταν το ύψος και η διάμετρος του πείρου του εργαλείου τόσο μεγαλύτερη και η διατομή του παραγόμενου καναλιού, διατηρώντας σταθερές τις πειραματικές παραμέτρους, ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα πρόωσης και φορά περιστροφής εργαλείου. Αξίζει να σημειωθεί πως, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με το δεύτερο εργαλείο, στο οποίο είχε δημιουργηθεί λαιμός στο πάνω μέρος του πείρου, σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής παρουσιάστηκε αστοχία υλικού του πείρου με αποτέλεσμα την αδυναμία περαιτέρω μελέτης με το συγκεκριμένο εργαλείο.

Τέλος, για την μελέτη των διατομών των καναλιών ήταν απαραίτητη η διεργασία της λείανσης, καθώς η τραχεία επιφάνεια της διατομής τους εμπόδιζε την ακριβή ανάλυση και μέτρηση των διαστάσεων τους. Η διεργασία της λείανσης χρειαζόταν ιδιαίτερη προσοχή, ώστε η επιφάνεια προς λείανση να βρισκόταν συνεχώς σε καθετότητα με το λειαντικό χαρτί για την αποφυγή δημιουργίας πολλών επιπέδων, τα οποία θα δυσκόλευαν την μελέτη των καναλιών.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, καταφεύγουμε στο συμπέρασμα, ότι πολύ σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τη μορφή και την εμφάνιση των καναλιών στα δοκίμια

αλουμινίου 5083-H111 είναι οι παράμετροι κατεργασίας, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα πρόωσης και η φορά περιστροφής του εργαλείου, μεταβάλλοντας την εκλυόμενη θερμότητα και τελικώς το αποτέλεσμα. Γεγονός που επαληθεύει τα συμπεράσματα των παραπάνω ερευνών, δηλαδή μεγαλύτερος δείκτης θερμότητας επιφέρει μεν κανάλια μικρότερης διατομής αλλά καλύτερης δομής και ακεραιότητας. Εξίσου σημαντικό παράγοντα αποτελεί και το βάθος βύθισης του εργαλείου, επηρεάζοντας τη δομή του καναλιού, όπως επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου, η διάμετρος περιαιχενίου, η διάμετρος και το ύψος του πείρου, η μορφολογία του σπειρώματος στον πείρο, τα οποία επιδρούν στην ροή του υλικού.

9.9 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Προκειμένου να αναπτυχθεί και να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύτερο φάσμα πρακτικών εφαρμογών, η διεργασία της δημιουργίας καναλιών με τριβή μέσω ανάδευσης, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και μελέτη καθώς πρόκειται για μια νέα μέθοδο.

Για παράδειγμα, σε επίπεδο δοκιμών θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν πειραματικές διεργασίες εναλλάσσοντας τις παραμέτρους, δηλαδή αυξάνοντας σημαντικά την ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου, ώστε να παρατηρηθεί η ροή του εναποτιθέμενου υλικού και πως αυτή επιδρά στην δομή και τη μορφολογία των προκυπτουσών καναλιών.

Ένας ακόμη παράγοντας, που θα μπορούσε να μελετηθεί, είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του προς κατεργασία δοκιμίου, στην περίπτωση αυτή αλουμινίου, είτε, δηλαδή, να προθερμαίνεται πριν την κατεργασία, είτε να ψύχεται, αντίστοιχα. Η παραπάνω θερμική κατεργασία σε συνδυασμό με την εκλυόμενη, από την τριβή, θερμότητα επιδρά σημαντικά στην ροή του βισκοπλαστικού υλικού αλλάζοντας την διατομή του καναλιού.

10. Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1 Σχηματικές διεργασίες (α) FSC (Balasubramanian, 2008), (β) A-FSC (Pedro Vilaça, 2012) (P. Vilaca, 2011) και (γ) διεργασίες M-FSC (A. Rashidi A. M., 2013) (A. Rashidi A. M., 2013).	14
Εικόνα 2 Διατομή καναλιού (α) σε FSC, όπου A, B – Βισκοπλαστικό υλικό καναλιού, C - μητρικό υλικό, D - κανάλι και E - υλικό από το κανάλι καναλιού που εναποτίθεται στην επιφάνεια (Balasubramanian, 2008), (β) σε M- FSC, όπου SAZ - ζώνη που επηρεάζεται από τον ώμο, EZ - ζώνη διέλασης, CZ - ζώνη καναλιού (A. Rashidi A. M., Int. J. Mater. Form. 9 (1–8), 2016), και (γ) σε A-FSC, που δείχνει επίσης το σχηματισμένο κανάλι (C. Vidal V. I., 2014).	20
Εικόνα 3 Χαρακτηριστικά επιφάνειας καναλιού στο (α) FSC (R.S.Mishra, M.W.Mahoney, S.X.McFadden, N.A.Mara, & A.K.Mukherjee, 1999) και (β) A-FSC (C. Vidal V. I., Mater. Sci. Forum 730 (817-822), 2013).	21
Εικόνα 4 Τύπος εργαλείου FSC	23
Εικόνα 5 Τα κανάλια όπως προέκυψαν από την πρώτη διεργασία (α/α 1) του τεμαχίου με το εργαλείο UCP	27
Εικόνα 6 Αναπαράσταση εργαλείων UCP και SCP	28
Εικόνα 7 Επιφάνεια της ζώνης διεργασίας και διατομή του κατασκευασμένου καναλιού κάτω από τη δεύτερη διεργασία (α/α 2) χρησιμοποιώντας: (a) το εργαλείο SCP και (b) το εργαλείο UCP	28
Εικόνα 8(a) Κάτοψη του καναλιού (προς τα εμπρός στην εξωτερική διαδρομή). (b) Κάτοψη και πλάγια όψη του καναλιού (προς τα εμπρός στην εσωτερική διαδρομή), μετά από την τρίτη διεργασία (α/α 3).	28
Εικόνα 9 Εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διεργασία FSC για το υλικό AA5083-H111	29
Εικόνα 10 Οπτικές μακρογραφίες διατομών των καναλιών που δημιουργήθηκαν από τα εργαλεία FSC (a) U1, (b) U2, (c) L1	30
Εικόνα 11 Μακρογραφία που δείχνει τις γεωμετρίες των καναλιών σε διαφορετικές παραμέτρους επεξεργασίας FSC: (A) 600rpm, 80mm / min, (B) 600rpm, 150mm / min, (C) 800rpm, 80mm / min. και (D) 800rpm, 150mm / min	32
Εικόνα 12 Φραιζομηχανή τύπου Kearney & Trecker Milwaukee	34
Εικόνα 13 Εργαλείο 1	36

Εικόνα 14 Εργαλείο 2 (Επεξεργασία του εργαλείου 1 με μείωση της διαμέτρου του πείρου στα 4.5mm με ύψος λαιμού 1.8mm)	36
Εικόνα 15 Εργαλείο 3	37
Εικόνα 16 Πλάκα συγκράτησης τεμαχίων	38
Εικόνα 17 Πλάκες αλουμινίου προς κατεργασία	39
Εικόνα 18 Δοκίμια μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.....	40
Εικόνα 19 Κοπτική μηχανή τύπου Rich Young με πριονοταινία	41
Εικόνα 20 Μηχανή Υδροκοπής τύπου Struers Discotom-2	42
Εικόνα 21 Λειαντική μηχανή τύπου Struers	43
Εικόνα 22 Μικροσκόπιο τύπου Leica.....	44
Εικόνα 23 Διατομή δοκιμίου 10.....	46
Εικόνα 24 Διατομή δοκιμίου 11.....	47
Εικόνα 25 Διατομή δοκιμίου 12.....	49
Εικόνα 26 Διατομή δοκιμίου 13.....	50
Εικόνα 27 Διατομή δοκιμίου 14.....	51
Εικόνα 28 Διατομή δοκιμίου 16.....	53
Εικόνα 29 Διατομή δοκιμίου 18.....	54
Εικόνα 30 Διατομή δοκιμίου 19.....	55
Εικόνα 31 Διατομή δοκιμίου 20.....	57
Εικόνα 32 Διατομή δοκιμίου 21.....	58
Εικόνα 33 Διατομή δοκιμίου 22.....	59
Εικόνα 34 Διατομή δοκιμίου 23.....	60
Εικόνα 35 Διατομή δοκιμίου 24.....	62
Εικόνα 36 Διατομή δοκιμίου 25.....	63
Εικόνα 37 Διατομή δοκιμίου 26.....	64
Εικόνα 38 Διατομή δοκιμίου 27.....	65

11. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Παράμετροι διεργασίας FSC.....	24
Πίνακας 2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν	24
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά καναλιού του τεμαχίου AA6061-T6 που υποβλήθηκε σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο FSC. Το μέγεθος του καναλιού μετράται σε mm ²	25
Πίνακας 4 Παράμετροι διεργασίας FSC.....	26
Πίνακας 5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν	27
Πίνακας 6 Παράμετροι διεργασίας FSC.....	30
Πίνακας 7 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν	31
Πίνακας 8 Παράμετροι διεργασίας FSC.....	32
Πίνακας 9 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν	32
Πίνακας 10 Συνοπτική παρουσίαση άλλων ερευνών που μελετήθηκαν.....	33
Πίνακας 11 Διαστάσεις εργαλείων	35
Πίνακας 12 Παράμετροι πειραματικών διαδικασιών	45
Πίνακας 13 Διαστάσεις προκυπτουσών καναλιών ανά δοκίμιο	67

12. Βιβλιογραφία

- A. Rashidi, A. M. (2013). *Appl. Mech. Mater.* 302 (365-370).
- A. Rashidi, A. M. (2013). *Appl. Mech. Mater.* 302 (371–376).
- A. Rashidi, A. M. (2015). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 80 (1087–1096).
- A. Rashidi, A. M. (2015). *Proc. Inst. Mech. Eng. BQ J. Eng. Manuf.*
- A. Rashidi, A. M. (2016). *Int. J. Mater. Form.* 9 (1–8).
- Balasubramanian, N. (2008). *Friction Stir Channeling: an Innovative Technique for Heat Exchanger Manufacturing.*
- C. Vidal, V. I. (2012). *Key Eng. Mater.* 488 (105-108).
- C. Vidal, V. I. (2013). *Mater. Sci. Forum* 730 (817-822).
- C. Vidal, V. I. (2013). *Proc. Eng.* 66 (264-273).
- C. Vidal, V. I. (2014). *Adv. Mater. Res.* 891 (1494-1499).
- C. Vidal, V. I. (2014). *Int. J. Fatigue* 62 (77–84).
- C. Vidal, V. I. (2014). *Int. J. Fatigue* 62 (85-92).
- C. Vidal, V. I. (2014). *Key Eng. Mater.* 577 (37-40).
- C. Vidal, V. I. (2015). *Eng. Fail. Anal.* 56 (204-215).
- Ferraz, M. (n.d.). *Friction stir channeling-Industrial applications and prototype development.* Lisboa, Portugal.
- Fiji Imagej. (n.d.).
- Mishra, R. (2005). *Integral channels in metal components and fabrication thereof.*
- Mishra, R. (2008). *Integral channels in metal components and fabrication thereof.*
- Mustafa Kemal Kulekci, U. E. (2016). *Critical analysis of friction stir-based manufacturing processes (1687-1712).*
- N. Balasubramanian, R. M. (2009). *Process.Technol.* 209 (3696-3704).
- N. Balasubramanian, R. M. (2011). *Process.Technol.* 211 (305-311).
- P. Vilaca, C. V. (2011). *Ferramenta Modular Ajustavel e Respectivo Processo de Abertura deCanais Internos Continuos em Componentes Macicos (Modular adjustable tool and correspondent process for opening continuous internal channels in solid components);*
- Pedro Vilaça, J. G. (2012). *Aluminium Alloys – NewTrends in Fabrication and Applications (159-197).*

R.S.Mishra, M.W.Mahoney, S.X.McFadden, N.A.Mara, & A.K.Mukherjee. (1999).
*Scr.Mater.*42 (163-168).

T.R. McNelley, S. S. (2008). Recrystallization mechanisms during friction stir
welding/processing (349-354).