



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ
ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΦΡΩΝ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

υπό
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΠΑΓΩΝΗ

Διπλωματική Εργασία

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

Βόλος, 2023

© 2023 Δημήτριος Παγώνης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
---------------------------------	--

Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Αλέξης Κερμανίδης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
--------------------	--

Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Χασιώτης Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
------------------	---

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της υλοποίησης της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Αλέξη Κερμανίδη και Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οι ευχαριστίες επεκτείνονται και στον Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο που μου έδωσε την άδεια να χρησιμοποιήσω τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας καθώς και στην κα. Ελένη Καμούτση για τις σημαντικές οδηγίες χρήσης αυτού του εξοπλισμού. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Βέργο που με βοήθησε στην διεκπεραίωση των πειραματικών δοκιμών, καθώς και τον Καθηγητή κ. Νικόλαο Μιχαηλίδη, Διευθυντή του Εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την διάθεση του αφρώδους αλουμινίου.

Θα ήθελα να εκφράσω επίσης, ευχαριστίες στους φίλους μου, για τη διαρκή υποστήριξη και καθοδήγησή τους στα πέντε χρόνια των σπουδών μου, καθώς και για τις θετικές τους σκέψεις όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου, ιδιαίτερα τους γονείς μου, Παναγιώτη και Παναγιούλα Παγώνη, για την ολόψυχη αγάπη, την υποστήριξη, την υπομονή και την εμπιστοσύνη τους σ' εμένα και τις αποφάσεις μου όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΦΡΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΓΩΝΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Εμμανουήλ Μπουζάκης

Αναπληρωτής Καθηγητής στις Κατεργασίες Μορφοποίησης Υλικών

Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τα ελαττώματα που προκύπτουν κατά τη κατεργασία διάτρησης πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα και αφρών αλουμινίου. Πρώτον, γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στη διάτρηση πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα και αφρών αλουμινίου, στην οποία αναλύονται τα ελαττώματα που προκύπτουν κατά την διάτρηση τους, καθώς και η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας στην διάτρηση. Δεύτερον, διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές με στόχο την ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων κοπής (ταχύτητας κοπής, πρόωσης) επί της Αξονικής Δύναμης και της Ροπής Στρέψης, καθώς και επί της φθοράς των κοπτικών εργαλείων αλλά και της απόκλισης από τη κυκλικότητα στην είσοδο της οπής με οπτικές παρατηρήσεις.

Στο πρώτο μέρος γίνεται κυρίως εστίαση στο φαινόμενο σχηματισμού αποελασματοποίησης (αποκόλληση των στρώσεων) κατά τη κατεργασία της διάτρησης αλλά και σε άλλα σημαντικά ελαττώματα όπως η επιφανειακή τραχύτητα, το μέγεθος της οπής και η κυκλικότητα. Επίσης, αναλύεται η επίδραση των παραμέτρων κατεργασίας, πιο συγκεκριμένα της ταχύτητας κοπής v_c και της πρόωσης f , στις ενεργές παραμέτρους όπως η Αξονική Δύναμη και η Ροπή και στις ανενεργές παραμέτρους που είναι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της οπής. Κυρίαρχος στόχος είναι η βελτιστοποίηση της κατεργασίας διάτρησης των πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα.

Έπειτα, γίνεται αναφορά σε κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά της οπής και στην εξάρτησή τους από τις παραμέτρους κοπής (πρόωση, ταχύτητα κοπής, διάμετρος κοπτικού εργαλείου), κατά την κατεργασία διάτρησης αφρών αλουμινίου. Συγκεκριμένα, η απόκλιση από τη κυκλικότητα της οπής, είναι ένα ελάττωμα που οφείλεται στη δυναμική αστάθεια του κοπτικού εργαλείου κατά την είσοδο του στην οπή. Μελετήθηκαν επίσης η επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής επί της Αξονικής Δύναμης.

Τέλος, στο δεύτερο μέρος διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής επί της Αξονικής Δύναμης και της φθοράς των κοπτικών εργαλείων αλλά και της απόκλισης από την κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Το κατεργασμένο τεμάχιο που

χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές διάτρησης, είναι αφρός αλουμινίου όπου κατασκευάστηκε μέσω υγρής μεταλλουργίας χρησιμοποιώντας ως υλικό μήτρας το AlSi10. Η πλάκα που δημιουργήθηκε από τον αποκτηθέντα αφρό είχε μέσο πορώδες περίπου 70% και πάχος 30 mm η οποία τρυπήθηκε με διάφορους συνδυασμούς ταχύτητας κοπής και πρόωσης (και με τρυπάνια διαμέτρου 6 mm).

Λέξεις-κλειδιά: αφροί, αλουμίνιο, μέταλλο, άνθρακας, ίνες, αποκόλληση, μηχανική κατεργασία, εργαλεία, διάτρηση, αξονική δύναμη, παράμετροι κοπής, φθορά.

ANALYSIS OF DEFECTS DURING THE DRILLING PROCESS OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS AND ALUMINUM FOAM

DIMITRIOS PAGONIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2023

Supervisor: Dr. Emmanouil Bouzakis

Associate Professor of Manufacturing Processes

Abstract

In this thesis, the defects that arise during the drilling process of carbon fiber reinforced polymers and aluminum foams are examined. First, a literature review is made on the drilling of carbon fiber reinforced polymers and aluminum foams, in which the defects that arise during their drilling are analyzed, as well as the effect of machining parameters on drilling. Secondly, experimental tests were conducted with the aim of analyzing the effect of cutting parameters (cutting speed, feed) on Axial Force and Torque, as well as on the wear of cutting tools and the deviation from circularity at the entrance of the hole with optical observations.

The first part focuses on the phenomenon of delamination formation (debonding of layers) during the drilling process but also on other important defects such as surface roughness, hole size and circularity. Also, the effect of the machining parameters, more specifically the cutting speed v_c and the feed f , on the active parameters such as Axial Force and Torque and on the inactive parameters which are the quality characteristics of the hole are analyzed. The main objective is to optimize the drilling process of carbon fiber reinforced polymers.

Then, reference is made to some quality characteristics of the hole and their dependence on the cutting parameters (feed, cutting speed, diameter of the cutting tool), during the drilling process of aluminum foams. In particular, the deviation from the circularity of the hole is a defect due to the dynamic instability of the cutting tool when it first enters the hole. The effect of feed and cutting speed on Axial Force were also examined.

Finally, in the second part, the effect of the feed and the cutting speed on the Axial Force and the wear of the cutting tools as well as the deviation from the circularity at the entrance of the hole was experimentally investigated. The machined piece used in the drilling tests is aluminum foam where it was fabricated by wet metallurgy using AlSi10 as matrix material. The plate created from the obtained foam, had an average porosity of about 70% and a thickness of 30 mm and was drilled at different combinations of cutting speeds and feed with 6 mm diameter drills.

Key words: foams, aluminum, metal, carbon, fiber, delamination, machining, tools, drilling, Axial Force, cutting parameters, wear.

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xv
Λίστα Συμβόλων	xvi
Κεφάλαιο 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	1
1.1 Ελαφριές Κατασκευές (Lightweight structures)	1
1.2 Σύνθετα Υλικά (Composite Materials)	4
1.2.1 Εισαγωγή	4
1.2.2 Μήτρα (Matrix)	5
1.2.3 Ενίσχυση (Reinforcement)	9
1.2.4 Αρχιτεκτονική Δομή των Σύνθετων Υλικών	14
1.3 Πορώδη Υλικά	17
1.3.1 Εισαγωγή	17
1.3.2 Μεταλλικοί Αφροί (Metal Foams)	18
1.4 Κατεργασία Διάτρησης	24
1.4.1 Εισαγωγή	24
1.4.2 Το δράπανο	25
1.4.3 Το τρυπάνι	25
1.4.4 Δυνάμεις κοπής και Ροπή στρέψεις στη διάτρηση	27
1.4.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά οπών από διάτρηση	28
Κεφάλαιο 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	30
2.1 Σύνθετα Υλικά.....	30
2.1.1 Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες (FRP).....	30
2.1.2 Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP)	30
2.1.3 Διάτρηση των CFRP.....	31
2.1.4 Ελαττώματα που προκύπτουν κατά τη διάτρηση των CFRP	31
2.1.5 Παράμετροι κατεργασίας διάτρησης	33
2.2 Πορώδη Υλικά	35
2.2.1 Μεταλλικοί Αφροί	35
2.2.2 Αφροί Αλουμινίου	36
2.2.3 Διάτρηση Μεταλλικών Αφρών	37
Κεφάλαιο 3. ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	39
3.1 Σκοπός Πειραμάτων	39
3.2 Προγραμματισμός του Πειράματος	39
3.3 Πειραματικός Εξοπλισμός.....	42
3.3.1 Ενισχυτής Φόρτισης 5019A	42
3.3.2 Δυναμόμετρο Quartz 4 συστατικών τύπου 9272	43
3.3.3 Σύστημα Απόκτησης Δεδομένων για Μέτρηση Δύναμης της KISTLER τύπου 5697A	44
3.3.4 Στερεοσκόπιο της Leica τύπου WILD M3Z/ κάμερα Canon EOS 600D	46
3.4 Αφρός Αλουμινίου.....	47
3.5 Ανάκτηση Δεδομένων.....	48
3.5.1 Δημιουργία του διαγράμματος F_z-t και M_z-t	48
3.5.2 Γραφήματα $F_{z,avg}-N$ και $M_{z,avg}-N$	50
Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	53
4.1 Εισαγωγή	53

4.2	Αποτελέσματα Μετρήσεων της Δύναμης για όλες τις συνθήκες κοπής	53
4.2.1	Διαγράμματα Μέσων Τιμών της Αξονικής Δύναμης $F_{z,avg}-N$	55
4.2.2	Διαγράμματα Αξονικής Δύναμης $F_z^{avg} - f$	62
4.2.3	Διάγραμμα Ροπής $M_z^{avg} - f$	64
4.2.4	Φθορά Κοπτικών Εργαλείων	66
4.2.5	Ανάλυση Κυκλικότητας στην Είσοδο της Οπής	73
Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		79
5.1	Συμπεράσματα	79
5.1.1	Συμπεράσματα για τη διάτρηση των CFRP	79
5.1.2	Συμπεράσματα για τη διάτρηση του αφρού αλουμινίου	80
5.2	Μελλοντικό Πεδίο Έρευνας	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		82

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Συνολική κατανομή των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη Boeing 787 [5].	2
Σχήμα 1-2: Αυξανόμενη χρήση ελαφρών υλικών στη σχεδίαση οχημάτων σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ το 2013 [1].	3
Σχήμα 1-3: Δομές διαστημικού πλαισίου. Πηγή: Audi AG [1]	3
Σχήμα 1-4: Τα υλικά μέρη (συστατικά) που σχηματίζουν ένα σύνθετο πολυμερές ενισχυμένο με ίνες (FRP) [11].	4
Σχήμα 1-5: Διάφοροι τύποι σύνθετων μεταλλικής μήτρας [38].	5
Σχήμα 1-6: Δίσκος συμπλέκτη αυτοκινήτου με χρήση MMC (metal matrix composite) από κράμα αλουμινίου (Al) ενισχυμένο με TiB ₂ [13].	6
Σχήμα 1-7: Σχηματική αναπαράσταση των (α) συνεχής και ευθυγραμμισμένων, (β) ασυνεχής και ευθυγραμμισμένα, και (γ) ασυνεχής και σύνθετα υλικά με τυχαία προσανατολισμό ενισχυμένα με ίνες [15].	11
Σχήμα 1-8: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει αριστερά τη κάθε στρώση με την κατεύθυνση των ινών και δεξιά το τελικό ινώδες πολυστρωματικό σύνθετο υλικό [17].	15
Σχήμα 1-9: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη διατομή ενός πάνελ τύπου sandwich [15].	16
Σχήμα 1-10: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την κατασκευή πάνελ τύπου sandwich με πυρήνα κηρήθρας [15].	16
Σχήμα 1-11: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικής μορφολογίας πόρων [18].	18
Σχήμα 1-12: Σχήμα εφαρμογών μεταλλικών αφρών [21].	19
Σχήμα 1-13: Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής αφρού αλουμινίου με τη μέθοδο έγχυσης αερίου τήγματος [23].	20
Σχήμα 1-14: Τα στάδια της διαδικασίας σχηματισμού αφρού αλουμινίου με αφριστικό παράγοντα [23].	21
Σχήμα 1-15: Διαδικασία αφρισμού από μεταλλικές σκόνες [23].	22
Σχήμα 1-16: Είδος δράπανου και τα εξαρτήματά του [25].	25
Σχήμα 1-17: Βασική γεωμετρία ελικοειδούς τρυπανιού [10].	26
Σχήμα 1-18: Δυνάμεις κοπής κατά τη λειτουργία διάτρησης - εμφανίζονται οι συνιστώσες της ορθογώνιας δύναμης, F _c , F _f και F _p [26].	27

Σχήμα 1-19: Ποιοτικά χαρακτηριστικά οπής [10].	28
Σχήμα 2-1: Κατηγοριοποίηση της αποκόλλησης [28].	32
Σχήμα 3-1: Πειραματική Διάταξη όπου φαίνονται το δράπανο, ο σφικτήρας, το τεμάχιο, το δυναμόμετρο και η οθόνη του υπολογιστή.	41
Σχήμα 3-2: Ενδεικτικές εικόνες των κοπτικών ακμών Α) $N = 1$ Οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 10$ Οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 20$ Οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής Δ) $N = 1$ Οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Ε) $N = 10$ Οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, ΣΤ) $N = 20$ Οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.	42
Σχήμα 3-3: Ενισχυτής φορτίου 5019A.	43
Σχήμα 3-4: Δυναμόμετρο Quartz 4 συστατικών της KISTLER τύπου 9272 [39].	44
Σχήμα 3-5: Σύστημα Απόκτησης Δεδομένων KISTLER τύπου 5697A [40].	45
Σχήμα 3-6: Τυπική αλυσίδα σύνδεσης με σύστημα DAQ τύπου 5697A1 [40].	46
Σχήμα 3-7: Μικροσκόπιο Leica τύπου Wild M3Z StereoZoom.	47
Σχήμα 3-8: Κάμερα Canon EOS 600D.	47
Σχήμα 3-9: Μακροδομή και μικροδομή του παραγόμενου πορώδους Al.	48
Σχήμα 3-10: Γραφική αναπαράσταση ενδεικτικής μέτρησης της Δύναμης συναρτήσει του χρόνου.	49
Σχήμα 3-11: Γραφική αναπαράσταση ενδεικτικής μέτρησης της Ροπής συναρτήσει του χρόνου.	50
Σχήμα 3-12: Γραφική αναπαράσταση της Μέσης Δύναμης κάθε οπής, για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev, συναρτήσει του αριθμού των οπών.	51
Σχήμα 3-13: Γραφική αναπαράσταση της Μέσης Ροπής κάθε οπής, για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev, συναρτήσει του αριθμού των οπών.	51
Σχήμα 4-1: Τυπική κωδικοποίηση των συνθηκών κοπής.	53
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα της μέσης δύναμης για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev.	56
Σχήμα 4-3: Διάγραμμα της μέσης δύναμης για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev.	57
Σχήμα 4-4: Διάγραμμα της μέσης δύναμης για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev.	58
Σχήμα 4-5: Διάγραμμα της μέσης δύναμης για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev.	59
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα της μέσης δύναμης για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev.	60
Σχήμα 4-7: Διάγραμμα της μέσης δύναμης για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev.	61
Σχήμα 4-8: Γραφικές παραστάσεις των συνολικών Μέσων Τιμών της Αξονικής Δύναμης F_z^{avg} συναρτήσει της πρόωσης f , για διαφορετικές ταχύτητες κοπής.	63

Σχήμα 4-9: Γραφικές παραστάσεις των συνολικών Μέσων Τιμών της Ροπής Mz^{avg} συναρτήσει της πρόωσης f , για διαφορετικές ταχύτητες κοπής.	65
Σχήμα 4-10: Αναπαράσταση των κοπτικών ακμών σε μεγέθυνση $\times 6,5$ A) Κύρια κόψη 1 B) Κύρια κόψη 2.	66
Σχήμα 4-11: Αρχική Κατάσταση των κοπτικών ακμών A) 1 ^η κοπτική ακμή B) 2 ^η κοπτική ακμή.	67
Σχήμα 4-12: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev. A) $N = 10$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, B) $N = 20$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.....	67
Σχήμα 4-13: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev. A) $N = 10$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, B) $N = 20$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.....	68
Σχήμα 4-14: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev. A) $N = 10$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, B) $N = 20$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.....	69
Σχήμα 4-15: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev. A) $N = 10$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, B) $N = 20$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.....	70
Σχήμα 4-16: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev. A) $N = 10$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, B) $N = 20$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.....	71
Σχήμα 4-17: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev. A) $N = 10$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, B) $N = 20$ οπές της 1 ^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2 ^{ης} κοπτικής ακμής.....	72
Σχήμα 4-18: Κατεργαζόμενο Τεμάχιο μετά το πέρας των πειραμάτων.	74
Σχήμα 4-19: Οπές για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev A) $N=1$ οπή, B) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.	75
Σχήμα 4-20: Οπές για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev A) $N=1$ οπή, B) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.	75
Σχήμα 4-21: Οπές για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev A) $N=1$, B) $N=10$, Γ) $N=20$	76
Σχήμα 4-22: Οπές για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev A) $N=1$ οπή, B) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.	77

Σχήμα 4-23: Οπές για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.	77
Σχήμα 4-24: Οπές για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.	78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Ιδιότητες συνεχών και ευθυγραμμισμένων σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου με εποξειδική μήτρα σε διαμήκη και εγκάρσια κατεύθυνση. Σε όλες τις περιπτώσεις το κλάσμα όγκου ινών είναι 0,60 [15].	12
Πίνακας 1-2: Χαρακτηριστικά πολλών υλικών ενίσχυσης ινών [15].	14
Πίνακας 1-3: Ιδιότητες αφρών αλουμινίου σε σύγκριση με συμπαγές αλουμίνιο (τυπικές τιμές, μετρημένες σε 20 °C) [24].	23
Πίνακας 3-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά Κοπτικού Εργαλείου και παράμετροι κοπής.	40
Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα μετρήσεων της Δύναμης για όλες τις οπές για κάθε συνθήκη κοπής.	54
Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα μετρήσεων της Ροπής για όλες τις οπές για κάθε συνθήκη κοπής.	55

Λίστα Συμβόλων

N	Αριθμός Οπής
M_z	Ροπή Στρέψης
F_z	Αξονική Δύναμη
$M_{z,avg}$	Μέση Τιμή της Ροπής Στρέψης στο εύρος 2-7 δευτερολέπτων της Δυναμομέτρησης
$F_{z,avg}$	Μέση Τιμή της Αξονικής Δύναμης στο εύρος 2-7 δευτερολέπτων της Δυναμομέτρησης
M_z^{avg}	Μέση Τιμή της $M_{z,avg}$ για τις 20 οπές
F_z^{avg}	Μέση Τιμή της $F_{z,avg}$ για τις 20 οπές

Κεφάλαιο 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

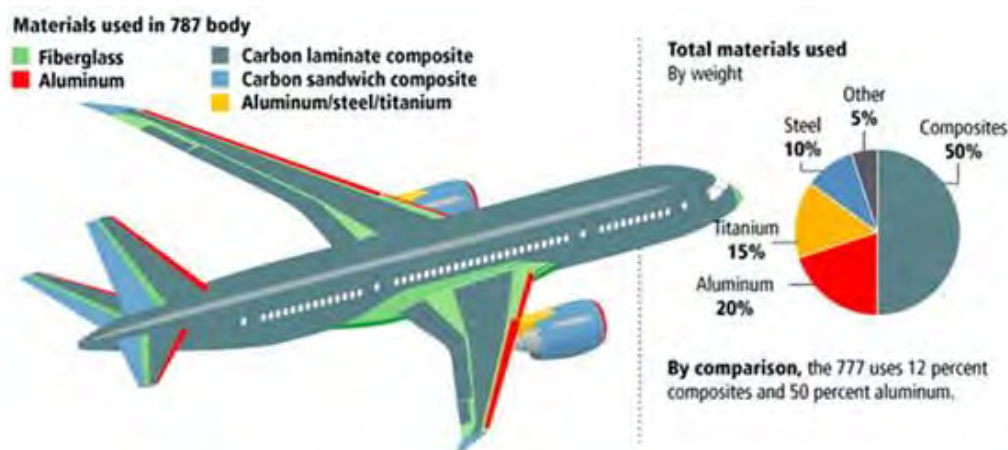
1.1 Ελαφριές Κατασκευές (Lightweight structures)

Τα φυσικά αντικείμενα ή εξαρτήματα που επιτρέπουν μια καθορισμένη τεχνική λειτουργικότητα με χαμηλότερο βάρος από αυτό που είναι συνήθως δυνατό με άλλα μέσα είναι γνωστά ως ελαφριές κατασκευές. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό ή προσφέροντας περισσότερη λειτουργικότητα μέσω της χρήσης ελαφρύτερων κατασκευών [1]. Η αναλογία ακαμψίας προς βάρος, είναι μια προσέγγιση για τον χαρακτηρισμό της σχέσης μεταξύ τεχνικής απόδοσης και βάρους.

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της σύγχρονης μηχανικής, οι ελαφριές κατασκευές γίνονται όλο και πιο απαραίτητες. Πολλές τεχνολογίες απαιτούν τα ελαφρύτερα και πιο συμπαγή εξαρτήματα που διατηρούν το φορτίο. Αυτή η ανάγκη είναι ιδιαίτερα σημαντική στον τομέα των μεταφορών, αφού το βάρος σχετίζεται άμεσα με την αυτονομία και την οικονομία καυσίμου. Η αντιστάθμιση μεταξύ κόστους κατασκευής και απόδοσης, η οποία εμφανίζεται ως παράγοντας αξίας, καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα εφαρμοστεί μια ιδέα [2].

Εφαρμογές Αεροσκαφών

Ένας από τους κύριους τρόπους βελτίωσης της απόδοσης ενός αεροπλάνου είναι η μείωση του δομικού βάρους [3]. Σημαντικές μειώσεις βάρους στα δομικά εξαρτήματα του αεροσκάφους είναι πλέον εφικτές λόγω καινοτομιών όπως αυτές που συνδέονται με τη δημιουργία ελαφριών κραμάτων αλουμινίου που σκληραίνονται με κατακρήμνιση, κραμάτων τιτανίου που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία και σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες (FRP) [3], όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1-1**. Μεγαλύτερη εμβέλεια πτήσης και υψηλότερη ταχύτητα καθίστανται δυνατά από ελαφρύτερα και/ή ισχυρότερα υλικά, τα οποία μπορεί επίσης να βοηθήσουν στη μείωση των λειτουργικών εξόδων, κάνοντας έτσι, τις εμπορικές πτήσεις πιο οικονομικές [3]. Επίσης, το ελαφρύ βάρος βελτιώνει την απόδοση των μαχητικών αεροσκαφών, διότι δίνει τη δυνατότητα επίτευξης μεγαλύτερης ταχύτητας, κινητικότητας, ευελιξίας, εμβέλειας και χωρητικότητας ωφέλιμου φορτίου [4]. Η ανάπτυξη αεροσκαφών επόμενης γενιάς, τόσο όσον αφορά την εξέλιξη του πλαισίου του αεροσκάφους όσο και του κινητήρα, αναμένεται να συνεχίσει να επηρεάζεται σημαντικά από την εμφάνιση ακόμη ελαφρύτερων, πιο άκαμπτων, ισχυρότερων, λιγότερο ευαίσθητων στην κόπωση, πιο ανθεκτικών στη ζημιά και ανθεκτικών στη θερμότητα υλικών [5].



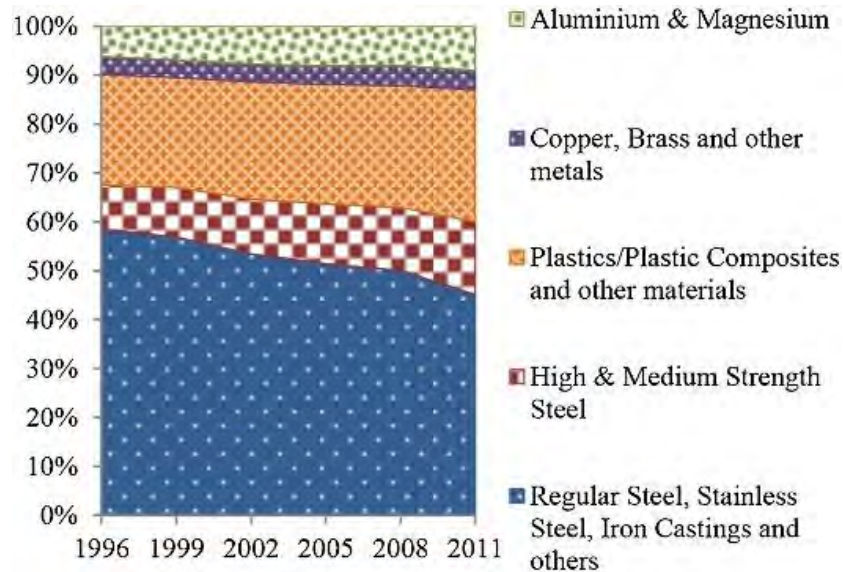
Σχήμα 1-1: Συνολική κατανομή των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη Boeing 787 [5].

Εφαρμογές αυτοκινήτων

Λόγω των αυστηρών κριτηρίων άνεσης και ασφάλειας, το μέσο βάρος των επιβατικών οχημάτων έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Ως αποτέλεσμα, τόσο το βάρος του συστήματος μετάδοσης κίνησης όσο και η ισχύς εξόδου του οχήματος έχουν αυξηθεί. Τον τελευταίο καιρό, οι βασικές αγορές για τις αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν επιβάλει αυστηρότερους κανονισμούς για τις εκπομπές καυσαερίων. Η οδηγία 443/2009 της ΕΕ είναι μια τέτοια. Ως αποτέλεσμα, οι αυτοκινητοβιομηχανίες μείωσαν τα βάρη των αυτοκινήτων για τις τρέχουσες γενιές οχημάτων στην ΕΕ, **Σχήμα 1-2**, μεταξύ άλλων [1]. Τα ελαφρά μέταλλα αυξάνουν σημαντικά την αξία βελτιώνοντας την απόδοση, την ικανότητα ελιγμών και την απόδοση καυσίμου. Ένας μηχανικός προϊόντων πρέπει πρώτα να αντιμετωπίσει μια σειρά από προκλήσεις προτού προσδιορίσει ένα νέο υλικό, όπως πώς θα επηρεάσει τη δυναμική του οχήματος, την ανθεκτικότητα (εγγύηση), τη δυνατότητα ζημιάς, την ικανότητα επισκευής και την ικανότητα σύγκρουσης. Αυτές οι ιδιότητες έχουν να κάνουν με το πώς οι μεταλλουργικές ιδιότητες και οι μέθοδοι κατασκευής επηρεάζουν την καλή απόδοση των υλικών και των προϊόντων [6].

Οι ελαφριές δομές έχουν υιοθετηθεί συχνά στην κατασκευή αυτοκινήτων μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούν σχέδια αιχμής με βάση τον χάλυβα. Αυτό καλύπτει νέα κράματα, τροποποιημένες τεχνικές κατασκευής και νέες τοπολογίες. Η αναλογία πολυμερών και FRP στο μείγμα υλικών αυτοκινήτων έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Μια άλλη εξέλιξη είναι η χρήση χαλκού σε εσωτερικά εξαρτήματα, όπως αερόσακοι, ταμπλό και ηλεκτρονικά. Μόνο η κατασκευή μικρής κλίμακας είναι κατάλληλη από οικονομική και τεχνική άποψη για την εκτεταμένη χρήση FRP σε δομικά στοιχεία. Η μεγαλύτερη χρήση αλουμινίου, μαγνησίου και των μεταλλικών αφρών τους είναι μια άλλη σημαντική πρόοδος. Οι κατασκευές διαστημικών πλαισίων είναι ένα εξέχον παράδειγμα αμαξώματος αυτοκινήτου από πλήρες αλουμίνιο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1-3**. Το μαγνήσιο έχει

χρησιμοποιηθεί ως επί το πλείστον σε δομικά εξαρτήματα (καπό, στέγη) [1]. Οι μεταλλικοί αφροί έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν την απορρόφηση δύναμης του οχήματος, κατά την σύγκρουση [7].



Σχήμα 1-2: Αυξανόμενη χρήση ελαφρών υλικών στη σχεδίαση οχημάτων σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ το 2013 [1].

Η εισαγωγή κατασκευών πολλαπλών υλικών σε αμαξώματα αυτοκινήτων ήταν πιο δημοφιλής τα τελευταία δέκα χρόνια. Η θεμελιώδης ιδέα είναι η χρήση μιας σειράς υλικών για την εφαρμογή διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων σε διαφορετικά φορτία [1].



Σχήμα 1-3: Δομές διαστημικού πλαισίου. Πηγή: Audi AG [1] .

Εφαρμογές Αεροδιαστημικής

Οι ελαφριές κατασκευές ήταν ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες πίσω από την κατασκευή αεροσκαφών από την αρχή. Λόγω της μοναδικής αναλογίας ακαμψίας προς αντοχή και των τεράστιων δυνατοτήτων πολυλειτουργικότητας, τα σύνθετα υλικά έχουν αναδειχθεί ως βασικά υλικά για την εκπλήρωση συγκεκριμένων στόχων για τον

αεροδιαστημικό τομέα [1]. Η υψηλή δομική απόσβεση, η ικανότητα ενσωμάτωσης αισθητήρων ή ενεργοποιητών, καθορισμένη ανισότροπη συμπεριφορά και βελτιωμένη απόδοση κόπωσης είναι μερικά από αυτά. Ως αποτέλεσμα, τα τελευταία 25 χρόνια, η χρήση σύνθετων υλικών στον αεροδιαστημικό τομέα έχει αυξηθεί από 15% σε περισσότερο από 50% της συνολικής δομικής μάζας. Λόγω των ειδικών για τη βιομηχανία και των αυστηρών κανονισμών ασφαλείας, καθώς και των απαιτήσεων αντοχής, συντήρησης και επισκευής που το συνοδεύουν, η χρήση σύνθετων υλικών απαιτεί νέες προσεγγίσεις για το σχεδιασμό και το σέρβις δομικών εξαρτημάτων [1].

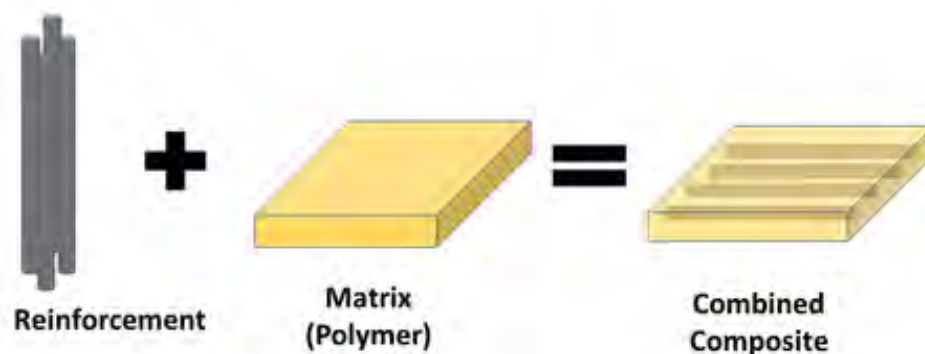
1.2 Σύνθετα Υλικά (Composite Materials)

1.2.1 Εισαγωγή

Οι υψηλές απαιτήσεις των στοχευμένων εφαρμογών μπορεί περιστασιακά να υπερβαίνουν τις δυνατότητες των ιδιοτήτων ενός μεμονωμένου υλικού. Για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών σε πολλούς κλάδους μηχανικής, έχει καταστεί απαραίτητη η χρήση υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες [8].

Ένα σύνθετο είναι ένας ειδικός τύπος δομής υλικού που αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά υλικά που μπορούν να διακριθούν σε μακροσκοπικό επίπεδο και τα οποία συνεργάζονται για να παρέχουν ένα ανώτερο αποτέλεσμα [9].

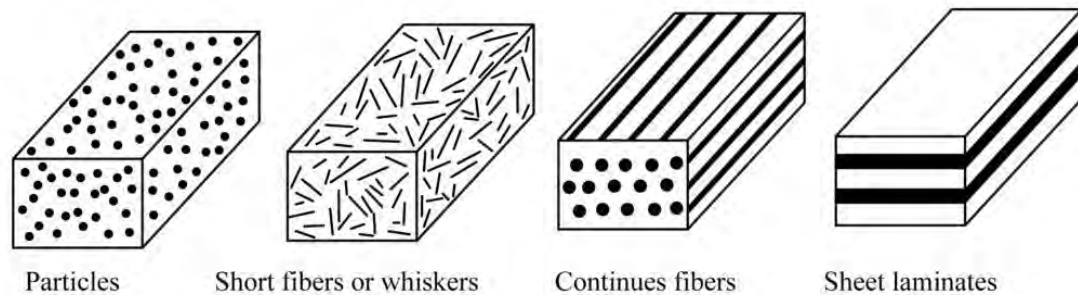
Ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από το υλικό της μήτρας και το ενισχυτικό υλικό, **Σχήμα 1-4**, που συνεργάζονται για να παρέχουν χαρακτηριστικά που συνδυάζουν εκείνα όλων των συστατικών υλικών. Τα σύνθετα υλικά οργανώνονται σύμφωνα με τους τύπους ενίσχυσης και μήτρας που χρησιμοποιούν [10].



Σχήμα 1-4: Τα υλικά μέρη (συστατικά) που σχηματίζουν ένα σύνθετο πολυμερές ενισχυμένο με ίνες (FRP) [11].

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας, τα σύνθετα υλικά χωρίζονται ως σύνθετα μεταλλικής μήτρας, σύνθετα κεραμικής μήτρας (ανόργανη μήτρα) και ως σύνθετα πολυμερικής μήτρας (οργανική μήτρα) [9]. Επιπροσθέτως, μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση των σύνθετων με

βάση τη μορφή τους και με τη μορφή του ενισχυτικού υλικού, χωρίζοντας τα έτσι σε ινώδη σύνθετα (με κοντές ή μακριές, συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες), σύνθετα υλικά με διασπορά σωματιδίων, πολυστρωματικά σύνθετα που αποτελούνται από σύνθετες στρώσεις και σύνθετα υλικά που μπορούν να κατασκευαστούν με τον συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων [9], όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1-5**.



Σχήμα 1-5: Διάφοροι τύποι σύνθετων μεταλλικής μήτρας [38].

Τα σύνθετα υλικά από πολυμερή και μεταλλικές μήτρες έχουν αποδειχθεί ότι προσφέρουν εξαιρετικές αντοχές, ανθεκτικότητα, ελαφρύτερα βάρη, υψηλή αντοχή στη διάβρωση, αυξημένη ακαμψία, ικανότητα απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και μειωμένη θερμική διαστολή [8]. Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τεχνικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, της ναυτιλίας, της πυρηνικής και της βιοϊατρικής βιομηχανίας, λόγω του ευρέος φάσματος των ιδιοτήτων τους [8].

1.2.2 Μήτρα (Matrix)

1.2.2.1 Εισαγωγή

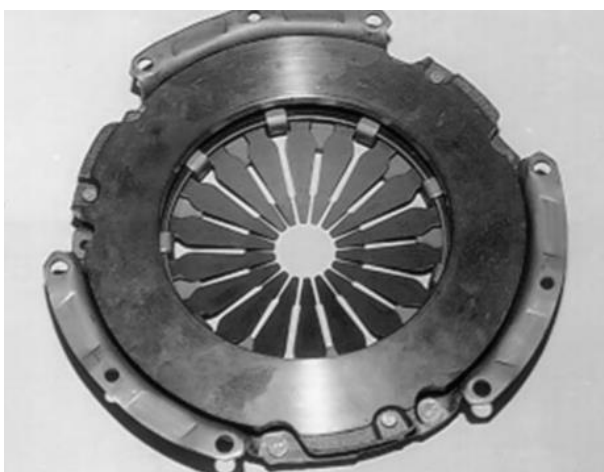
Μήτρα ονομάζεται η συνεχής φάση του σύνθετου υλικού. Το συστατικό της μήτρας έχει τρεις κύριους σκοπούς: συγκρατεί το συνδυασμένο σύνθετο υλικό στο κατάλληλο σχήμα εξαρτήματος, βοηθά στη κατανομή φορτίου μεταξύ του σπλισμού και συνδέει τον σπλισμό μεταξύ τους. Η μήτρα εξυπηρετεί επίσης τους σκοπούς της θωράκισης του σπλισμού από το περιβάλλον και, ανάλογα με τη μορφή, την υποστήριξη του κάτω από συνθήκες συμπίεσης [12]. Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή του συστατικού της μήτρας είναι μεταλλικά, κεραμικά και πολυμερή.

1.2.2.2 Μεταλλική Μήτρα (Metal Matrix)

Οι μεταλλικές μήτρες έχουν ευρεία χρήση σε περιπτώσεις όπου η μεγάλη αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία είναι απαιτούμενη. Σε σχέση με τα άλλα είδη μήτρας, οι μεταλλικές, εμφανίζουν υψηλότερες τιμές του ορίου διαρροής και του μέτρου ελαστικότητας καθώς και καλύτερη θλιπτική αντοχή. Περαιτέρω, μπορούν να υποστούν διαμόρφωση μέσα από ένα

πλήθος θερμικών αλλά και μηχανικών κατεργασιών. Ωστόσο, το υψηλό κόστος παραγωγής, το υψηλό ειδικό βάρος τους και η επιρρέπεια τους σε επιλεκτική διάβρωση, στα σύνορα μήτρας-ίνας, περιορίζουν τη χρήση τους [9].

Για τις μεταλλικές μήτρες χρησιμοποιούνται κυρίως κράματα χαλκού, νικελίου, τιτανίου και αλουμινίου. Το αλουμίνιο βρίσκει μεγάλη εφαρμογή εξαιτίας της υψηλής αντοχής σε σχέση με το χαμηλό βάρος του αλλά και εξαιτίας της υψηλής αντίστασης σε διάβρωση. Ένα παράδειγμα σύνθετου υλικού μεταλλικής μήτρας φαίνεται στο **Σχήμα 1-6**. Τα κράματα τιτανίου έχουν ακόμα υψηλότερο λόγο αντοχής-βάρους από τα κράματα αλουμινίου, αλλά ένα βασικό προτέρημά τους από τα άλλα διαθέσιμα μεταλλικά κράματα, είναι ότι ο συντελεστής θερμικής παραμόρφωσης τους προσεγγίζει αυτό των ινών, προκαλώντας έτσι ομοιομορφία στη συμπεριφορά του τελικού σύνθετου κάτω από υψηλές θερμοκρασίες [9]. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για κατασκευαστικά εξαρτήματα προηγμένης τεχνολογίας.



Σχήμα 1-6: Δίσκος συμπλέκτη αυτοκινήτου με χρήση MMC (metal matrix composite) από κράμα αλουμινίου (Al) ενισχυμένο με TiB₂ [13].

1.2.2.3 Κεραμική Μήτρα (Ceramic Matrix)

Τα κεραμικά υλικά είναι εξαιρετικά εύθραυστα. Συχνά περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα μέταλλα και ένα αμέταλλο όπως το οξυγόνο, τον άνθρακα ή το άζωτο. Σε σύγκριση με τα μέταλλα, έχουν πολύ λίγους μηχανισμούς ολίσθησης και ισχυρούς ομοιοπολικούς και ιοντικούς δεσμούς. Τα κεραμικά έχουν συχνά χαμηλή ενέργεια θραύσης και χαμηλή σκληρότητα ή τάσεις αστοχίας. Δεν είναι συνεπή στα χαρακτηριστικά τους, είναι εύθραυστα, έχουν χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και χαμηλή αντοχή σε θερμικές και μηχανικές κρούσεις. Από την άλλη πλευρά, έχουν χαμηλές πυκνότητες, εξαιρετικά υψηλούς συντελεστές ελαστικότητας και μπορούν να αντισταθούν σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Το τελευταίο σημείο είναι κρίσιμο και είναι η κύρια ώθηση στην προσπάθεια δημιουργίας ανθεκτικών κεραμικών [9]. Όμως, ακόμη και τα πιο μικρά εσωτερικά

ελαττώματα (εγκλεισμοί, πόροι ή μικρορωγμές) ή ατέλειες της επιφάνειας (εγκοπές ή γρατσουνιές) μπορεί να έχουν καταστροφικά αποτελέσματα. Η ενίσχυση με ίνες των εύθραυστων κεραμικών είναι μια κρίσιμη στρατηγική για τη σκλήρυνση των κεραμικών [9].

Οι κεραμικές μήτρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Αυτές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία οικοδομικών υλικών και είναι κατασκευασμένα από τσιμέντο ή γύψο. Οι μήτρες τσιμέντου συνήθως ενισχύονται με σιδερένιες ράβδους, ενώ οι γύψινες μήτρες, με φυσικές ή τεχνητές ίνες τρίχας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει κεραμικά καλούπια σχεδιασμένα για υψηλές θερμοκρασίες, η οποία περιλαμβάνει προηγμένες τεχνολογικά μήτρες. Τα κεραμικά έχουν υψηλή αντοχή σε θλίψη. Αντίθετα, υπό εφελκυστικές τάσεις, το σημείο θραύσης τους είναι χαμηλό. Η ενίσχυση με ίνες, τους εμποδίζει να ραγίσουν εύκολα κάτω από φορτία εφελκυσμού. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αντοχή τους σε εφελκυσμό χωρίς να μειώνεται η θλιπτική τους αντοχή. Συνήθως, η κεραμική μήτρα είναι ενισχυμένη με ίνες γυαλιού, ενώ για εφαρμογές προηγμένης τεχνολογίας όπως η αεροδιαστημική, η ενίσχυση είναι κατασκευασμένη από άνθρακα [9].

1.2.2.4 Πολυμερική Μήτρα (Polymeric Matrix)

Σε σύγκριση με τα μέταλλα ή τα κεραμικά, τα πολυμερή έχουν μια σημαντικά πιο περίπλοκη δομική σύνθεση [14]. Είναι φθηνά και απλά στην επεξεργασία. Τα πολυμερή, από την άλλη πλευρά, έχουν μειωμένους περιορισμούς στη χρήση αντοχής, μέτρο ελαστικότητας και θερμοκρασία. Τα χαρακτηριστικά των πολυμερών μπορεί να επιδεινωθούν ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία και ορισμένους διαλύτες. Τα πολυμερή είναι συνήθως κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού λόγω της υπεροχής των ομοιοπολικών δεσμών τους. Ωστόσο, τα πολυμερή συνήθως υπερτερούν των μετάλλων όσον αφορά τη χημική αντοχή. Όσον αφορά τη δομή, τα πολυμερή είναι τεράστια μόρια που μοιάζουν με αλυσίδες (γι' αυτό το όνομα μακρομόρια), με ομοιοπολικά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα που χρησιμεύουν ως η ραχοκοκαλιά της αλυσίδας. Ο πολυμερισμός είναι η διαδικασία σύνδεσης πολλών μονομερών, τα οποία είναι τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία, μαζί για την παραγωγή πολυμερών. Ο πολυμερισμός είναι η διαδικασία δημιουργίας τεράστιων μορίων από μικρά [14].

Υπάρχουν δύο σημαντικές κατηγορίες πολυμερισμού:

1. Πολυμερισμός συμπύκνωσης: Σε αυτή τη διαδικασία, τα μόρια αντιδρούν σταδιακά, με κάθε βήμα να παράγει ένα υποπροϊόν που είναι συνήθως ένα μόριο νερού [14].

2. Πολυμερισμός προσθήκης: Σε αυτή τη μέθοδο, τα μονομερή ενώνονται για να παράγουν πολυμερή χωρίς να δημιουργούνται υποπροϊόντα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο πολυμερισμός προσθήκης λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια καταλυτών. Η συνολική μάζα του πολυμερούς είναι ίση με το άθροισμα των μαζών των μονομερών. Μόρια αιθυλενίου (CH_2) προστίθενται γραμμικά για να δημιουργηθεί πολυαιθυλένιο, το οποίο είναι μια αλυσίδα μορίων αιθυλενίου [14].

Τα δύο κύρια είδη πολυμερών, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά πολυμερή, σχηματίζονται μέσω συμπύκνωσης ή πολυμερισμού προσθήκης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους [14].

1.2.2.4.1 Θερμοπλαστικά

Τα θερμοπλαστικά είναι πολυμερή που ρέουν όταν θερμαίνονται και υπό πίεση, μαλακώνουν ή μετατρέπονται σε πλαστικό ως αποτέλεσμα. Τα θερμοπλαστικά γίνονται πιο σκληρά όταν ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, οι διαφορές στη συμπεριφορά τους οφείλονται σε διαφορές στο μοριακό τους μέγεθος, μάζα και είδος δεσμού (ομοιοπολικό ή van der Waals), καθώς και στο μοριακό τους σχήμα και δομή [14].

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα των θερμοπλαστικών μητρών είναι η αυξημένη αντοχή στην κρούση. Τυπικά, έχουν υψηλότερη δυνατότητα καταπόνησης σε θραύση από τα θερμοσκληρυνόμενα, μια ιδιότητα που τα καθιστά πιο ανθεκτικά στις μικρορωγμές και επομένως πιο ανθεκτικά σε αστοχίες. Άλλα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν τον απεριόριστο χρόνο αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου, τους σύντομους χρόνους παραγωγής, την καταλληλότητα για την παραγωγή δομικών στοιχείων, την εύκολη επισκευή και φυσικά την ανακυκλωσιμότητα. Ωστόσο, το κόστος των προηγμένων θερμοπλαστικών εξακολουθεί να είναι πολύ υψηλό, επομένως η χρήση τους είναι περιορισμένη [9].

1.2.2.4.2 Θερμοσκληρυνόμενα

Οι θερμοσκληρυντές περνούν από μια διαδικασία σκλήρυνσης κατά την οποία οι πολυμερείς αλυσίδες συνδέονται σταυρωτά. Γίνονται πιο σκληρά μετά τη σκλήρυνση, επομένως το όνομα θερμοσκληρυνόμενο. Με τη χρήση των κατάλληλων χημικών παραγόντων, την εφαρμογή θερμότητας και πίεσης ή με την έκθεση του μονομερούς σε μια δέσμη ηλεκτρονίων, μπορεί να ξεκινήσει η αντίδραση σκλήρυνσης [14].

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως σύνθετες μήτρες. Οι ίνες τοποθετούνται στο υλικό πριν από τον πολυμερισμό. Για αυτά τα υλικά, ο πολυμερισμός λαμβάνει χώρα κατά τη διαμόρφωση του υλικού στο προϊόν που θέλουμε να παράγουμε. Τα άλλα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν τη θερμική σταθερότητα και την καλή χημική αντοχή. Επιδεικνύουν επίσης πολύ λιγότερο ερπυσμό και χαλάρωση από τα θερμοπλαστικά. Τα μειονεκτήματά τους είναι ο περιορισμένος χρόνος διατήρησης σε θερμοκρασία δωματίου, ο αυξημένος χρόνος παραμονής στο καλούπι και η χαμηλή τάση θραύσης, με αποτέλεσμα τη χαμηλή κρουστική αντοχή. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι επίσης το γεγονός ότι η πολυμερής μήτρα και τα σύνθετα υλικά με τη μήτρα πολυμερούς πρακτικά είναι μη ανακυκλώσιμα. Η θερμοσκληρυνόμενη πολυμερής μήτρα μπορεί να είναι εποξειδική, πολυεστερική ή βινυλεστερική [9].

1.2.2.4.2.1 Έποξειδική Μήτρα

Η πρώτη ύλη της μήτρας εποξειδικής ρητίνης είναι μια οργανική ρητίνη χαμηλού μοριακού βάρους που περιέχει έναν ορισμένο αριθμό εποξειδικών ομάδων, δηλαδή ενός δακτυλίου που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα άνθρακα. Οι ιδιότητες των πολυμερών ρητινών εξαρτώνται κυρίως από την πυκνότητα του δεσμού. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μήτρας εποξειδικής ρητίνης είναι η ποικιλία των ιδιοτήτων και η χαμηλή συρρίκνωση κατά τη διαδικασία του πολυμερισμού, η αυξημένη χημική αντοχή και η υψηλή ικανότητα σύνδεσής της με πολλούς τύπους ινών. Το κύριο μειονέκτημα είναι ο μεγάλος χρόνος πολυμερισμού [9].

1.2.2.4.2 Πολυεστερική Μήτρα

Για τις πολυεστερικές μήτρες, τα αρχικά υλικά είναι μονομερή ή олиγομερή που περιέχουν έναν ορισμένο αριθμό διπλών δεσμών άνθρακα. Ο πολυμερισμός των πολυεστερικών ρητινών ξεκινά με την προσθήκη μικρής ποσότητας καταλύτη στο ρευστό μίγμα. Ανάλογα με τα συστατικά από τα οποία παρασκευάζονται, οι πολυεστερικές ρητίνες μπορούν να επιτύχουν ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων, αλλά γενικά είναι κατώτερες από τις εποξειδικές ρητίνες. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ο γρήγορος πολυμερισμός και το χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά τους σε σχέση με τα εποξικά είναι η υψηλός βαθμός συρρίκνωσή τους [9].

1.2.2.4.3 Βινυλεστερική Μήτρα

Η πρώτη ύλη για τη μήτρα βινυλεστέρα είναι η ρητίνη βινυλεστέρα. Κατά τον πολυμερισμό τους, σχηματίζονται σχετικά λίγοι δεσμοί μεταξύ των μοριακών αλυσίδων, επομένως είναι πιο εύκαμπτες και έχουν μεγαλύτερη αντοχή στη θραύση από τους πολυεστέρες. Η μήτρα βινυλεστέρα διατηρεί τις καλές ιδιότητες των εποξειδικών και πολυεστερικών ρητινών, όμως εμφανίζει μεγάλο βαθμό συρρίκνωσης. Οι βινυλεστερικές μήτρες παρουσιάζουν υψηλή πρόσφυση με τις ίνες [9].

1.2.3 Ενίσχυση (Reinforcement)

1.2.3.1 Εισαγωγή

Το ενισχυτικό μέσω έχει ως κύριο στόχο τη μεταφορά των φορτίων που ασκούνται στο σύνθετο υλικό. Τα ενισχυτικά μέσα μπορούν να έχουν τη μορφή σωματιδίων, νιφάδων, νηματιδίων. Επειδή τα υλικά είναι πιο ισχυρά και περισσότερο άκαμπτα στην ινώδη μορφή από κάθε άλλη μορφή, και επειδή η ύλη σε ινώδη μορφή μπορεί να είναι αρκετά εύκαμπτη, έχει αποδειχθεί ότι η πλειονότητα των οπλισμών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά έχουν ινώδη μορφή [14].

1.2.3.2 Σωματίδια

Η σωματιδιακή φάση της πλειονότητας αυτών των σύνθετων υλικών είναι πιο άκαμπτη και σκληρότερη από τη μήτρα. Η κίνηση της φάσης της μήτρας τείνει να περιορίζεται γύρω από καθένα από αυτά τα ενισχυτικά σωματίδια. Ουσιαστικά, τα σωματίδια λαμβάνουν ένα μέρος της ασκούμενης τάσης από τη μήτρα, η οποία μεταφέρει μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Ισχυρή σύνδεση στη διεπιφάνεια μήτρας-σωματιδίου είναι απαραίτητη για να ενισχυθεί ή να βελτιωθεί σε κάποιο βαθμό η μηχανική συμπεριφορά [15].

Τα σωματίδια για σύνθετα υλικά ενισχυμένα με διασπορά έχουν τυπικά μεγέθη μεταξύ 0,01 και 0,1 μm . (10 και 100 nm). Οι ατομικές ή μοριακές αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων και μητρών έχουν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση. Τα ελάχιστα κατανεμημένα σωματίδια αναστέλλουν ή εμποδίζουν την κίνηση των εξαθρώσεων ενώ η μήτρα φέρει το μεγαλύτερο μέρος του επιβαλλόμενου φορτίου [15].

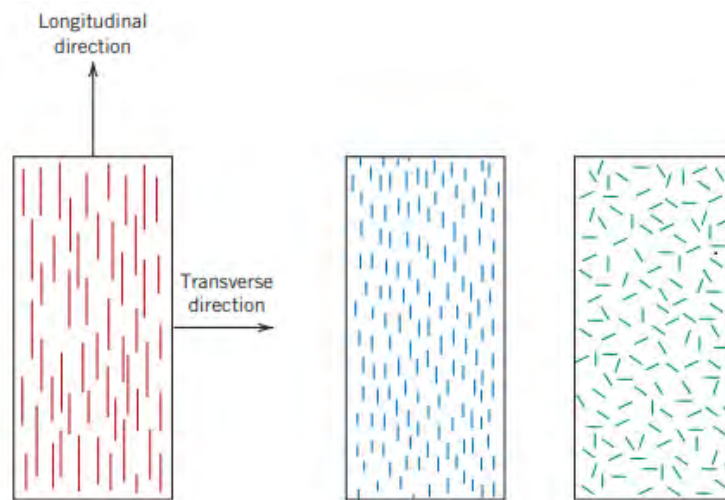
1.2.3.3 Ίνες

Ο βασικός ρόλος των ινών είναι η μεταφορά των φορτίων που ασκούνται στο σύνθετο υλικό. Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά των ινών είναι το μεγάλο ειδικό βάρος τους καθώς και η μικρή διάμετρός τους [9]. Η μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία σε εφελκυσμό χαρακτηρίζουν τις ίνες, ιδιότητες που οφείλονται στη διαμήκη διεύθυνση προσανατολισμού των μορίων τους, καθώς και στο μικρό μέγεθος των διατομών τους ελαττώνοντας έτσι τη πιθανότητα ύπαρξης αξιοσημείωτων ελαττωμάτων [16].

Η κατηγοριοποίηση των ινών γίνεται σε κοντές ίνες (ασυνεχείς, μικρού μήκους) και μεγάλου μήκους (συνεχείς). Αν με την αύξηση του μέσου μήκους της ίνας, ενός συγκεκριμένου τύπου ίνας, βελτιωθούν οι μηχανικές της ιδιότητες, τότε αυτή χαρακτηρίζεται ως ίνα μικρού μήκους, διαφορετικά ως μεγάλου μήκους. Οι ίνες μικρού μήκους εμφανίζονται με λόγους διαστάσεων από 20 έως 60, ενώ οι ίνες μεγάλου μήκους από 200-500 [16].

Η αντοχή και οι άλλες ιδιότητες των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών επηρεάζονται σημαντικά από την κατανομή, τη συγκέντρωση και τη διάταξη των ινών σε σχέση μεταξύ τους. Δύο περιπτώσεις είναι εφικτές όσον αφορά τον προσανατολισμό: μια παράλληλη ευθυγράμμιση του διαμήκους άξονα των ινών σε μία κατεύθυνση και μια εντελώς τυχαία ευθυγράμμιση. Οι ασυνεχείς ίνες μπορούν να είναι ευθυγραμμισμένες, τυχαία προσανατολισμένες ή μερικώς προσανατολισμένες, ενώ οι συνεχείς ίνες είναι συχνά

ευθυγραμμισμένες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1-7**. Όταν η κατανομή των ινών είναι ομοιόμορφη, οι συνολικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού βελτιώνονται [15].



Σχήμα 1-7: Σχηματική αναπαράσταση των (α) συνεχής και ευθυγραμμισμένων, (β) ασυνεχής και ευθυγραμμισμένα, και (γ) ασυνεχής και σύνθετα υλικά με τυχαία προσανατολισμό ενισχυμένα με ίνες [15].

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται ευρύτερα για την ενίσχυση των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας είναι από άνθρακα, γυαλί, αραμίδια, βόριο και κεραμικά [16].

1.2.3.3.1 Ίνες Γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού, είναι η πιο οικονομική επιλογή για την ενίσχυση των σύνθετων πολυμερών, επομένως η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη. Το τελικό σύνθετο προϊόν, περιέχει ένα ποσοστό (κατ' όγκο) από 30% έως και 60% και ονομάζεται ενισχυμένο με ίνες γυαλιού πλαστικό. Για την κατασκευή των ινών, τηγμένο γυαλί έλκεται μέσα από μικρές οπές και καταλήγει σε μήτρα από λευκόχρυσο, μέσω της κατεργασίας της ολκής. Έπειτα, αυτές οι ίνες επιμηκύνονται και αφού ψυχθούν, τυλίγονται σε ρολά. Τέλος, οι ίνες γυαλιού υφίστανται επεξεργασία με σιλάνιο (υδρίδιο του πυριτίου), ώστε να αποκτήσουν καλύτερη διαβροχή και ισχυρότερη σύνδεση ίνας-μήτρας. Οι κυριότεροι τύποι ινών γυαλιού είναι E-τύπου, S-τύπου και E-CR-τύπου [16]. Η ενίσχυση με ίνες γυαλιού E-τύπου υπερτερούν σε ορισμένες μηχανικές ιδιότητες, έναντι άλλων υλικών, όπως φαίνεται στον **Πίνακας 1-1**.

Πίνακας 1-1: Ιδιότητες συνεχών και ευθυγραμμισμένων σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου με εποξειδική μήτρα σε διαμήκη και εγκάρσια κατεύθυνση. Σε όλες τις περιπτώσεις το κλάσμα όγκου ινών είναι 0,60 [15].

<i>Property</i>	<i>Glass (E-glass)</i>	<i>Carbon (High Strength)</i>	<i>Aramid (Kevlar 49)</i>
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa (10^6 psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa (10^6 psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

1.2.3.3.2 Ίνες Άνθρακα

Αν και οι ίνες άνθρακα είναι πιο ακριβές από τις ίνες γυαλιού, έχουν τα χαρακτηριστικά της χαμηλής πυκνότητας, της υψηλής αντοχής και της υψηλής ακαμψίας. Τα μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή κρουστική αντοχή και το υψηλό τους κόστος το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την περιορισμένη χρήση τους σε συνηθισμένες εφαρμογές, αλλά κυρίως στην αεροναυπηγική όπου η ελάττωση του βάρους είναι ο κυριότερος παράγοντας μείωσης του κόστους [9]. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει ονομάζεται πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP). Οι ίνες άνθρακα περιέχουν τουλάχιστον 90% άνθρακα, ενώ οι ίνες γραφίτη περισσότερο από 99%. Οι τυπικές ίνες άνθρακα περιέχουν άμορφο άνθρακα και γραφίτη. Αυτές οι ίνες ταξινομούνται σε χαμηλό, μεσαίο, υψηλό και πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας (που κυμαίνεται από 35 έως 800 GPa) [16]. Όλες οι ίνες άνθρακα παράγονται με πυρόλυση οργανικών προδρόμων. Το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) χρησιμοποιείται συχνά ως πρόδρομος λόγω του χαμηλού κόστους του. Η πυρόλυση είναι η διαδικασία των χημικών αλλαγών που προκαλούνται από τη θερμότητα. Για παράδειγμα, η καύση μιας ορισμένης ποσότητας νήματος προκαλεί το υλικό να ανθρακωθεί και να αλλάξει το χρώμα του σε μαύρο. Όταν χρησιμοποιείται PAN, οι ίνες είναι διασταυρώνονται μερικώς και ταυτόχρονα επιμηκύνονται σε μέτριες θερμοκρασίες. Σε αυτό το στάδιο οι ίνες ενανθρακώνονται, δηλαδή εκτίθενται σε υψηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποβληθεί το υδρογόνο και το άζωτο από το PAN [16].

1.2.3.3.3 Ίνες από πολυμερή

Οι πολυμερικές ίνες μπορούν να κατασκευαστούν από αραμίδια, νάιλον, ρεγίον (τεχνητή μέταξα) ή ακρυλικό, με τις ίνες αραμιδίου να είναι οι πιο διαδεδομένες σήμερα. Τα αραμίδια, με παράδειγμα το Kevlar, είναι μια από τις ισχυρότερες ίνες με πολύ υψηλή ειδική

αντοχή. Λόγω της σχετικής πλαστικής παραμόρφωσης που μπορούν να υποστούν πριν σπάσουν, τα αραμίδια έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα από τις εύθραυστες ίνες. Ωστόσο, τα αραμίδια υπόκεινται σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους, εξαιτίας της τάσης τους για απορρόφηση υγρασίας [16].

1.2.3.3.4 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες προσφέρουν πλεονεκτήματα σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Εκτός του ότι είναι κατάλληλα για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες, έχουν επίσης χαμηλή επιμήκυνση, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και καλή χημική αντοχή. Η σειρά κεραμικών ινών που διατίθεται στο εμπόριο με την εμπορική ονομασία Nextel έχει ίνες με οβάλ διατομή και αποτελείται από αλουμίνα, πυρίτιο και βόριο [16].

1.2.3.3.5 Ίνες Βορίου

Αποτελούνται από έναν πυρήνα βολφραμίου στον οποίο εναποτίθεται ένα στρώμα βορίου με χημική εναπόθεση ατμών. Το βόριο μπορεί επίσης να αποτεθεί σε ίνες άνθρακα. Οι ίνες βορίου έχουν σημαντικές ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή και δυσκαμψία υπό τάση εφελκυσμού και θλίψης όπως και αυξημένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης ειδικής πυκνότητας του βολφραμίου, αυτές οι ίνες έχουν αυξημένο βάρος και κόστος [16]. Στον **Πίνακα 1-2** φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών ινών ενίσχυσης.

Πίνακας 1-2: Χαρακτηριστικά πολλών υλικών ενίσχυσης ινών [15].

<i>Material</i>	<i>Specific Gravity</i>	<i>Tensile Strength [GPa (10⁶ psi)]</i>	<i>Specific Strength (GPa)</i>	<i>Modulus of Elasticity [GPa (10⁶ psi)]</i>	<i>Specific Modulus (GPa)</i>
Whiskers					
Graphite	2.2	20 (3)	9.1	700 (100)	318
Silicon nitride	3.2	5–7 (0.75–1.0)	1.56–2.2	350–380 (50–55)	109–118
Aluminum oxide	4.0	10–20 (1–3)	2.5–5.0	700–1500 (100–220)	175–375
Silicon carbide	3.2	20 (3)	6.25	480 (70)	150
Fibers					
Aluminum oxide	3.95	1.38 (0.2)	0.35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49™)	1.44	3.6–4.1 (0.525–0.600)	2.5–2.85	131 (19)	91
Carbon ^a	1.78–2.15	1.5–4.8 (0.22–0.70)	0.70–2.70	228–724 (32–100)	106–407
E-glass	2.58	3.45 (0.5)	1.34	72.5 (10.5)	28.1
Boron	2.57	3.6 (0.52)	1.40	400 (60)	156
Silicon carbide	3.0	3.9 (0.57)	1.30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900™)	0.97	2.6 (0.38)	2.68	117 (17)	121
Metallic Wires					
High-strength steel	7.9	2.39 (0.35)	0.30	210 (30)	26.6
Molybdenum	10.2	2.2 (0.32)	0.22	324 (47)	31.8
Tungsten	19.3	2.89 (0.42)	0.15	407 (59)	21.1

1.2.4 Αρχιτεκτονική Δομή των Σύνθετων Υλικών

1.2.4.1 Εισαγωγή

Ένα δομικό σύνθετο συνήθως κατασκευάζεται τόσο από ομοιογενή όσο και από σύνθετα υλικά, οι ιδιότητες των οποίων επηρεάζονται τόσο από τη γεωμετρική διάταξη των διαφόρων δομικών μερών όσο και από τις ιδιότητες των υλικών που αποτελούν. Οι δομές τύπου sandwich και τα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά είναι δύο από τους πιο δημοφιλείς τύπους δομικών σύνθετων υλικών [15].

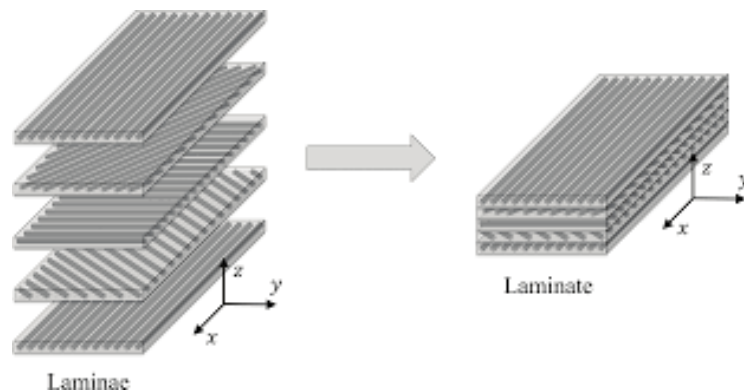
1.2.4.2 Ινώδη πολύστρωτα σύνθετα υλικά

Οι βασικές δομικές μονάδες των ινωδών πολύστρωτων σύνθετων υλικών, είναι τα στρώματα, τα οποία είναι συνήθως επίπεδα και σπάνια καμπυλωμένα. Αυτό το στρώμα περιλαμβάνει μια μήτρα και ίνες διατεταγμένες παράλληλα ή υφασμένες. Τα σύνθετα πολυστρωματικά ενισχυμένα μονής κατεύθυνσης αποτελούνται από μονόδρομα ενισχυμένα στρώματα που στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο. Αυτό το στρώμα αποτελείται από

παράλληλες ίνες του ίδιου ή διαφορετικού υλικού. Κάθε στρώμα είναι ένα ορθότροπο υλικό με τρεις κύριες κατευθύνσεις: τη κατεύθυνση της ίνας (διαμήκης), τη κατεύθυνση μήτρας (εγκάρσια) και τη κατακόρυφη κατεύθυνση [9].

Προκειμένου να σχηματιστεί μια πλάκα πολλαπλών στρώσεων, στοιβάζονται διαφορετικοί αριθμοί και κατευθύνσεις στρωμάτων ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες της πλάκας που απαιτούνται, **Σχήμα 1-8**. Η αναγνώριση μιας πολυστρωματικής πλάκας, βασίζεται στην κωδικοποίηση της ακολουθίας στρωμάτων της, η οποία καθορίζει τις γωνίες που υποδεικνύουν τον προσανατολισμό των ινών σε σχέση με τη διαμήκη κατεύθυνση της πλάκας [9].

Τα πλεκτά σύνθετα δεν κωδικοποιούνται. Ωστόσο, χαρακτηρίζονται από γεωμετρίες πλέγματος, οι οποίες μπορεί να είναι δισδιάστατες ή τρισδιάστατες. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα δισδιάστατα πλεκτά υφάσματα στη βιομηχανία είναι αυτά με απλή δισδιάστατη πλέξη, πλέξη με διαγώνιες ραβδώσεις και αυτά με σατινένια πλέξη [9].

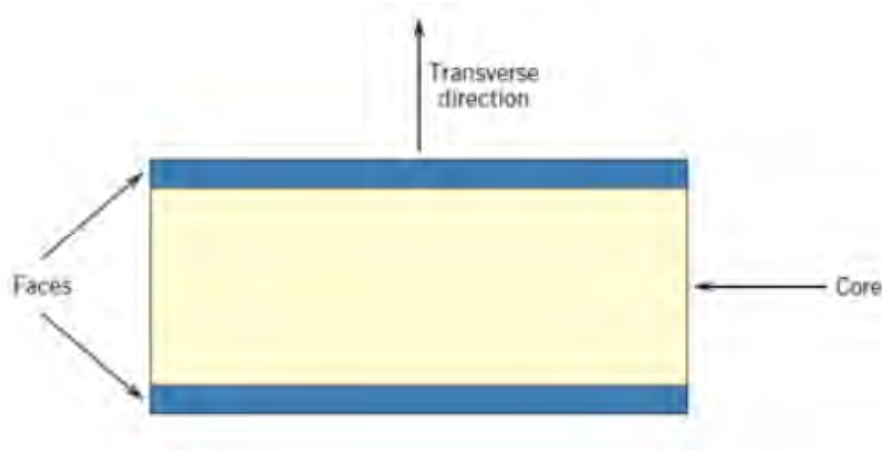


Σχήμα 1-8: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει αριστερά τη κάθε στρώση με την κατεύθυνση των ινών και δεξιά το τελικό ινώδες πολυστρωματικό σύνθετο υλικό [17].

Δομές τύπου sandwich

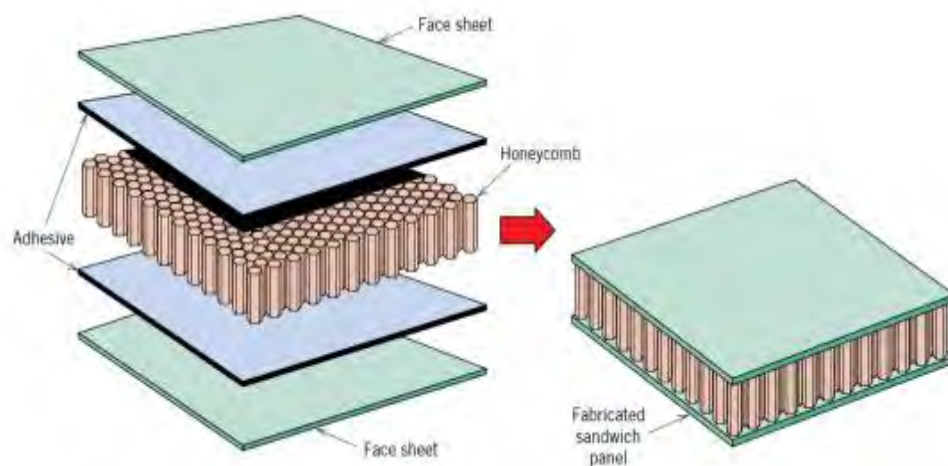
Οι πλάκες τύπου sandwich, οι οποίες θεωρούνται ως μια μορφή δομικών σύνθετων υλικών, δημιουργούνται για να είναι ελαφριές δοκοί ή πάνελ με αρκετά υψηλές αντοχές και ακαμψίες. Ένα πάνελ τύπου sandwich αποτελείται από έναν παχύτερο πυρήνα που προσκολλάται σε δύο εξωτερικά φύλλα ή επιφάνειες, **Σχήμα 1-9**. Τα εξωτερικά φύλλα πρέπει να είναι αρκετά παχιά ώστε να αντέχουν τις τάσεις εφελκυσμού και συμπίεσης που προκύπτουν από τη φόρτωση επειδή είναι κατασκευασμένα από ένα σχετικά άκαμπτο και ισχυρό υλικό, συνήθως κράματα αλουμινίου, πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, τιτάνιο και χάλυβα. Ως αποτέλεσμα, δίνουν στη δομή υψηλό βαθμό ακαμψίας και αντοχής. Ελαφρύ και τυπικά με χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας είναι το υλικό του πυρήνα. Οι τρεις κύριοι τύποι υλικών πυρήνα είναι οι σκληροί πολυμερικοί αφροί (όπως φαινολικά, εποξειδικά και πολυουρεθάνες), το ξύλο (όπως το ξύλο μπάλας) και οι κηρήθρες (honeycombs). Ο πυρήνας έχει διάφορους δομικούς σκοπούς. Τα εξωτερικά φύλλα πρώτα και κύρια υποστηρίζονται συνεχώς από αυτό. Πρέπει επίσης να είναι αρκετά παχύ, ώστε να παρέχει υψηλή ακαμψία

διάτμησης, και αρκετά ισχυρό σε διάτμηση, ώστε να αντέχει σε εγκάρσιες δυνάμεις διάτμησης [15].



Σχήμα 1-9: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη διατομή ενός πάνελ τύπου sandwich [15].

Ένας άλλος πολύ δημοφιλής πυρήνας έχει μια δομή "κηρήθρας", η οποία είναι κατασκευασμένη από λεπτά φύλλα που έχουν διαμορφωθεί σε αλληλοσυνδεόμενα εξαγωνικά κελιά με άξονες παράλληλους στα κάθετα επίπεδα της όψης, **Σχήμα 1-10**. Συνήθως, το πολυμερές αραμίδιο ή ένα κράμα αλουμινίου αποτελεί τη σύνθεση της κηρήθρας. Το μέγεθος των κυψελών, το πάχος των τοιχωμάτων των κυψελών και το υλικό που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της κηρήθρας επηρεάζουν την αντοχή και την ακαμψία των δομών της κηρήθρας. Τα πάνελ σάντουιτς χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής και των αεροσκαφών, καθώς και στις στέγες, τα δάπεδα και τους τοίχους κατασκευών [15].



Σχήμα 1-10: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει την κατασκευή πάνελ τύπου sandwich με πυρήνα κηρήθρας [15].

1.3 Πορώδη Υλικά

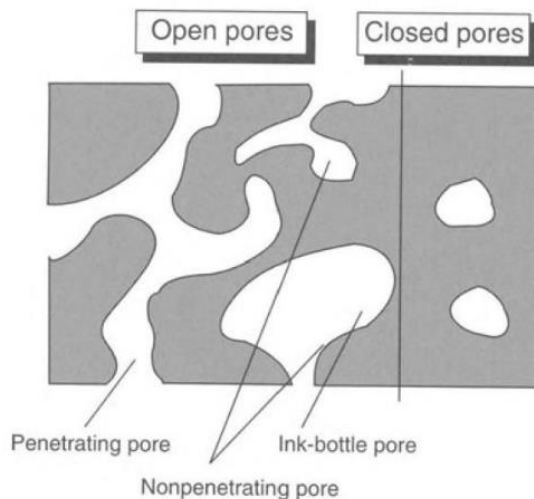
1.3.1 Εισαγωγή

Τα στερεά με πόρους αναφέρονται ως πορώδη υλικά. Το εύρος πορώδους για πορώδη υλικά είναι μεταξύ 0,2-0,95. Το πορώδες ορίζεται ως η αναλογία του όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο. Τα πορώδη υλικά έχουν ένα ευρύ φάσμα χρήσεων, από καθημερινές ανάγκες όπως ο καθαρισμός του πόσιμου νερού με τη χρήση πορωδών κεραμικών με ενεργό άνθρακα έως τη χρήση σε σύγχρονες βιομηχανίες, όπως η αφαίρεση σκόνης από αέρια διεργασίας υψηλής ποιότητας για την κατασκευή ημιαγωγών [18].

Οι πόροι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: οι ανοιχτοί πόροι, που συνδέονται με το εξωτερικό του υλικού και οι κλειστοί πόροι, οι οποίοι είναι απομονωμένοι από το εξωτερικό και πιθανώς περιέχουν ένα υγρό, **Σχήμα 1-11**. Οι ανοιχτοί πόροι με τουλάχιστον δύο ανοίγματα και στις δύο πλευρές ενός πορώδους υλικού είναι γνωστοί ως διεισδυτικοί πόροι [18].

Ιδιαίτερα ζωτικής σημασίας για βιομηχανικές εφαρμογές στη χημεία, τη μηχανολογία, τη βιολογία και την ηλεκτρονική είναι τα πορώδη μέταλλα, τα κεραμικά και τα γυαλιά. Οι ανοιχτοί πόροι είναι απαραίτητοι για τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές πορωδών υλικών. Είναι απαραίτητο να υπάρχει υψηλό κλάσμα ανοιχτού πορώδους σε πορώδη υλικά που χρησιμοποιούνται ως φίλτρα, φορείς για καταλύτες και βιοαντιδραστήρες. Για βιομηχανικές χρήσεις όπως φίλτρα ή διανομή αερίου, απαιτούνται διεισδυτικοί ανοιχτοί πόροι [18].

Τα κλειστά πορώδη υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως για δομικά στοιχεία με χαμηλό ειδικό βάρος ή ως ηχητικά και θερμικά μονωτικά [18].



Σχήμα 1-11: Σχηματική απεικόνιση διαφορετικής μορφολογίας πόρων [18].

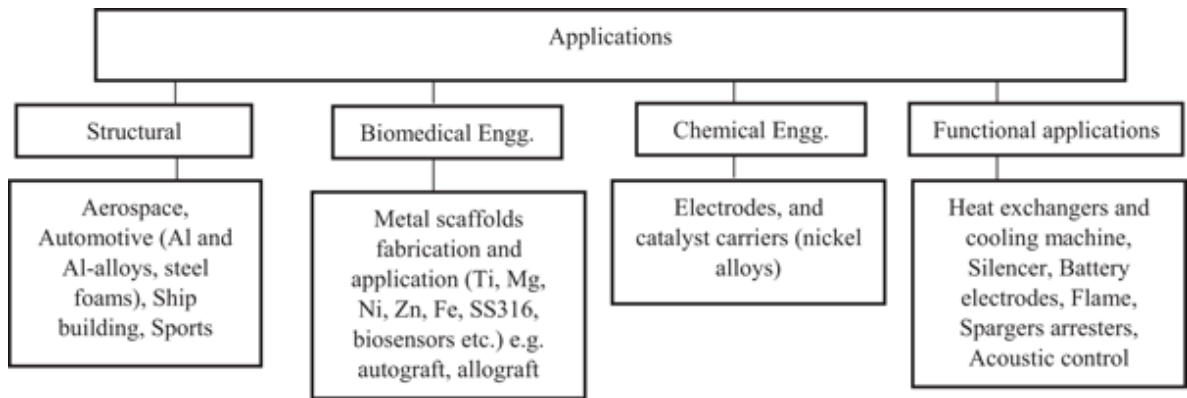
1.3.2 Μεταλλικοί Αφροί (Metal Foams)

1.3.2.1 Εισαγωγή

Ένα λιωμένο κράμα που συνδυάζεται με φυσαλίδες αερίου οδηγεί στο σχηματισμό υγρών μεταλλικών αφρών. Μετά τη στερεοποίηση, δημιουργείται ένα εξαιρετικά πορώδες μεταλλικό υλικό που μπορεί να εμφανίσει αξιόλογους συνδυασμούς χαρακτηριστικών [19].

Οι αφροί μετάλλων είναι πολύ πορώδεις στο εσωτερικό της δομής τους και έχουν σημαντικά χαμηλότερη πυκνότητα από το στερεό μέταλλο. Η κυτταρική του δομή δημιουργεί ειδικά χαρακτηριστικά όπως η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, οι ιδιότητες απορρόφησης ήχου και οι θερμικές ιδιότητες [20].

Έτσι, οι ελαφριοί μεταλλικοί αφροί (όπως το Al και το Mg) προσέλκυσαν πρόσφατα μεγάλο ενδιαφέρον για χρήση στη βιομηχανία μεταφορών, όπως την αυτοκινητοβιομηχανία, τους σιδηρόδρομους και την αεροδιαστημική, όπου απαιτείται μείωση βάρους και βελτίωση της άνεσης [7]. Στο **Σχήμα 1-12** απεικονίζεται το εύρος εφαρμογής των μεταλλικών αφρών.



Σχήμα 1-12: Σχήμα εφαρμογών μεταλλικών αφρών [21].

1.3.2.2 Μέθοδοι Κατασκευής Μεταλλικών Αφρών

Οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας δύο βασικές μεθόδους [19].

Με τεχνικές άμεσου αφρισμού, οι οποίες ξεκινούν με ένα προσεκτικά προετοιμασμένο λιωμένο μέταλλο που έχει μη μεταλλικά σωματίδια ομοιόμορφα διασκορπισμένα, στα οποία στη συνέχεια εγχέονται φυσαλίδες αερίου για να παραχθεί αφρός. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με έναν αριθμό μεθόδων, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ενός τριχοειδούς ή πορώδους τήγματος, της προσθήκης ενός χημικού παράγοντα που διασπάται στο τήγμα ή της χρήσης αερίου που διαλύεται στο μέταλλο και καθιζάνει σε φυσαλίδες ελέγχοντας τη θερμοκρασία ή την πίεση [19].

Με τεχνικές έμμεσου αφρισμού, οι οποίες ξεκινούν με έναν στερεό πρόδρομο που είναι μια μεταλλική μήτρα με ομοιόμορφα διάσπαρτα σωματίδια διογκωτικού παράγοντα (για κράματα με βάση το Al, αυτό είναι συνήθως υδρίδιο ζirkονίου ή τιτανίου). Αυτός ο πρόδρομος διογκώνεται και δημιουργεί αφρό όταν λιώνει η μήτρα [19].

1.3.2.3 Αφροί αλουμινίου

1.3.2.3.1 Εισαγωγή

Οι αφροί αλουμινίου έχουν αυξηθεί σε σημασία τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης επιθυμίας του τομέα των μεταφορών για μειωμένο λειτουργικό κόστος, μεγαλύτερα ωφέλιμα φορτία, βελτιωμένη περιβαλλοντική συμβατότητα και περισσότερη ασφάλεια και άνεση των επιβατών. Λόγω του ασυνήθιστου μείγματος χαρακτηριστικών που προκαλεί η κυτταρική δομή και η μεταλλική τους συμπεριφορά, έχουν αναγνωριστεί ως μια νέα κατηγορία υλικών μεγάλου ενδιαφέροντος [22].

Η χρήση αφρών αλουμινίου σε ελαφριές κατασκευές, για την απορρόφηση ενέργειας από κρούσεις και τη διαχείριση του θορύβου, είναι ιδιαίτερα ελκυστική για την

αυτοκινητοβιομηχανία. Οι αφροί αλουμινίου βρίσκουν επίσης μεγάλη εφαρμογή σε τομείς όπως οι βιομηχανίες κτιρίων, βιοϊατρικής, αεροδιαστημικής, πλοίων και σιδηροδρόμων, καθώς και σε φίλτρα, εναλλάκτες θερμότητας, σιγαστήρες και απαγωγείς φλόγας [22].

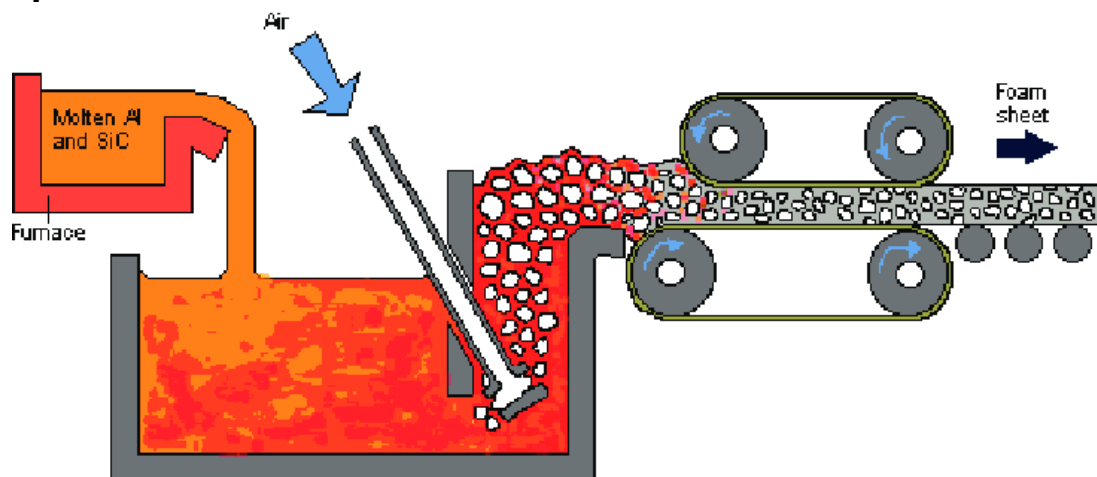
1.3.2.3.2 Μέθοδοι Παραγωγής Μεταλλικού Αφρού Αλουμινίου

Οι αφροί αλουμινίου μπορούν να παραχθούν με τις μεθόδους που συζητήθηκαν παραπάνω, δηλαδή με τεχνικές άμεσου αφρισμού οι οποίες ξεκινούν από ένα λιωμένο μέταλλο και με τεχνικές έμμεσου αφρισμού, οι οποίες ξεκινούν από μεταλλική σκόνη. Έτσι λοιπόν, έχουμε την εξής κατηγοριοποίηση: (1) αφροί που έχουν παραχθεί από μεταλλικά τήγματα (LM foams) και (2) αφροί που έχουν παραχθεί από σκόνες μετάλλων (PM foams).

1.3.2.3.2.1 Αφροί που έχουν παραχθεί από μεταλλικά τήγματα (LM foams)

1.3.2.3.2.1.1 Λιώσιμο αφρού με έγχυση αερίου

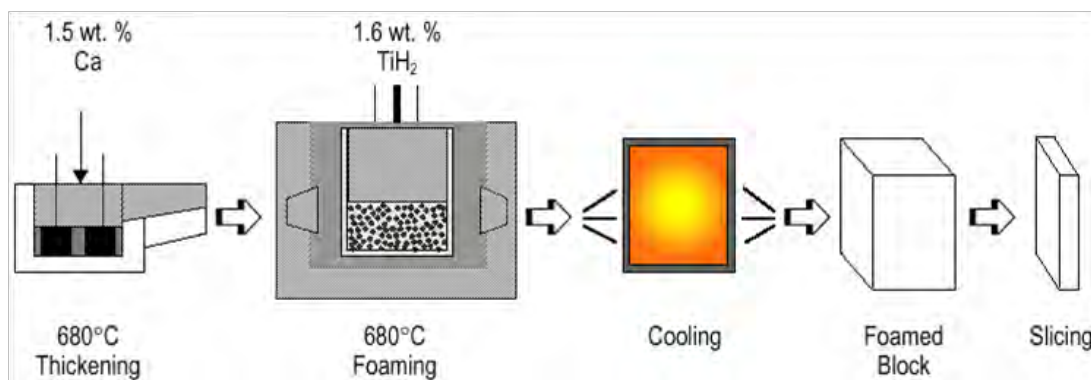
Η έγχυση αερίου χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο για την τήξη αφρώδους αλουμινίου και κράματος αλουμινίου, **Σχήμα 1-13**. Τα σωματίδια οξειδίου του αργιλίου ή οξειδίου του μαγνησίου χρησιμοποιούνται για την αλλαγή των ιδιοτήτων αφρισμού με την προσθήκη καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Τα μέσα μεγέθη σωματιδίων θα κυμαίνονται μεταξύ 5 μm και 20 μm , ενώ το κλάσμα όγκου των σωματιδίων που σχηματίζονται από την έγχυση αερίου κυμαίνεται από 20% έως 100%. Μια παραγωγή αφρού με κλειστούς πόρους αποτελείται από πλάκες πλάτους περίπου 1 m και πάχους 0,2 m, με τις διαμέτρους των πόρων να κυμαίνονται μεταξύ 5 και 20 mm, με αφρό να έχει σχετική πυκνότητα 0,03-0,1 kg/m^3 [23].



Σχήμα 1-13: Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής αφρού αλουμινίου με τη μέθοδο έγχυσης αερίου τήγματος [23].

1.3.2.3.2.1.2 Λιώσιμο αφρού με αφριστικούς παράγοντες

Η προσθήκη ενός αφριστικού παράγοντα στο τήγμα αλουμινίου είναι απαραίτητη για αυτή τη διαδικασία. Ο παράγοντας διογκώσης διασπάται όταν εκτίθεται σε θερμότητα και αέριο απελευθερώνεται από αυτό. Στο **Σχήμα 1-14**, απεικονίζεται η διαδικασία. Ένα αρχικό στάδιο της σύνθεσης αφρού, που περιλαμβάνει 1,5% κατά βάρος ασβέστιο, συμβαίνει στους 680 °C. Μια τυπική προσθήκη υδριδίου τιτανίου είναι 1,6 τοις εκατό κατά βάρος. Μετά την αντίδραση, το τήγμα διαστέλλεται αργά πριν γεμίσει αμέσως το δοχείο με αφρό. Για δημιουργία αφρού μετά από αυτή τη διαδικασία αφρισμού, θα χρειαστούν περίπου 15 λεπτά. Με την ψύξη του δοχείου κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του κράματος, ο υγρός αφρός στερεοποιείται για να σχηματίσει αφρό αλουμινίου [23].

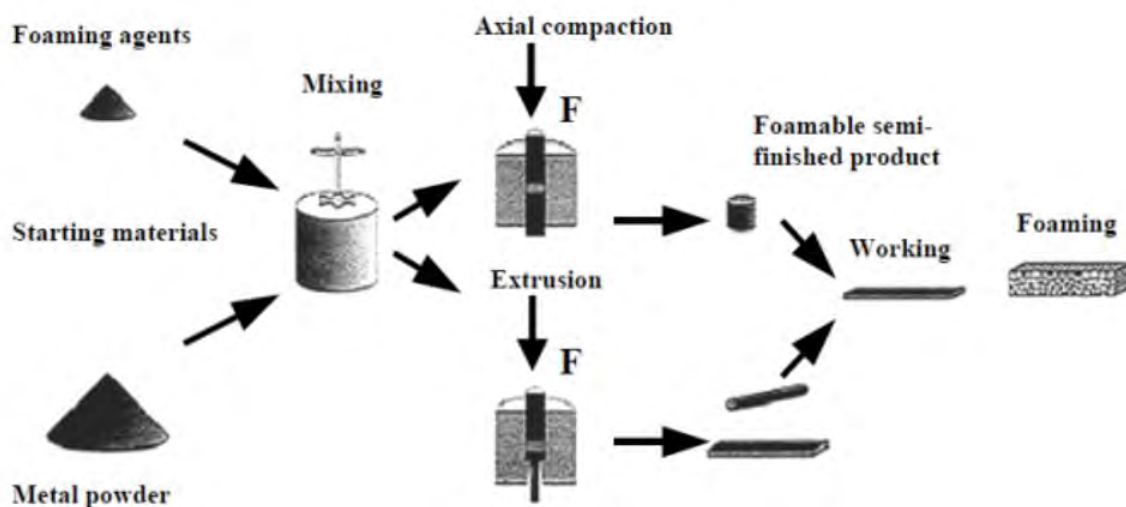


Σχήμα 1-14: Τα στάδια της διαδικασίας σχηματισμού αφρού αλουμινίου με αφριστικό παράγοντα [23].

1.3.2.3.2.2 Αφροί που έχουν παραχθεί από μεταλλικές σκόνες (PM foams)

Η διαδικασία ξεκινά με την ανάμειξη μεταλλικών σκονών, της σκόνης κράματος και ενός κονιοποιημένου διογκωτικού παράγοντα. Μια πολύ πορώδης δομή δημιουργείται κατά τη διαδικασία θέρμανσης (350°C–450°C) και μετά την εισαγωγή του αφριστικού παράγοντα, το αφριστικό υλικό διογκώνεται ως αποτέλεσμα της πίεσης του αερίου. Το στερεό μεταλλικό υλικό που περιέχει μια σύνθεση κονιοποιημένου αφριστικού παράγοντα παρέχεται από το υλικό ψυχρής συμπίεσης. Μόλις αυτό το στερεό υλικό θερμανθεί στη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου, η αντίδραση παράγοντα αφρισμού αρχίζει να σχηματίζεται όταν αέριο έχει προστεθεί στο υγρό τηγμένο μέταλλο [23]. Το **Σχήμα 1-15** παρουσιάζει τη διαδικασία σε σχηματική μορφή.

Μια μικρή ποσότητα αφριστικού παράγοντα προστίθεται σε έναν συνδυασμό μεταλλικών σκονών στην αρχή της διαδικασίας. Το μείγμα συνθλίβεται για να παραχθεί ένα πυκνό, ημικατεργασμένο προϊόν χωρίς παρατεταμένο ανοιχτό πορώδες, αφού ο παράγοντας αφρισμού έχει διασπαρθεί ομοιόμορφα στα σωματίδια της μήτρας [23].



Σχήμα 1-15: Διαδικασία αφρισμού από μεταλλικές σκόνες [23].

Μια σχετικά συμπαγής μικροδομή κλειστών πόρων και μια κλασματική πυκνότητα τόσο χαμηλή όσο το 1 προς 200 του εντελώς πυκνού αλουμινίου ($2,7 \text{ g/cm}^3$) είναι χαρακτηριστικά των αφρισμένων συστατικών που παράγονται με αυτήν τη μέθοδο σκόνης. Στην περίπτωση του αφρού χάλυβα επετεύχθη μια κάτω πυκνότητα του 1 προς 400ης της πυκνότητας εντελώς πυκνού χάλυβα ($7,8 \text{ g/cm}^3$). Η υψηλή ειδική ποσοτική αναλογία ακαμψίας προς βάρος (SWR) του αφρού αποδίδεται σε αυτόν τον τύπο της πορώδους δομής. Η εντοπισμένη κατάρρευση των πόρων και η γρήγορη διασπορά της ενέργειας συμπίεσης κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης παρέχουν στο υλικό την ικανότητα να απορροφά ενέργεια [23].

Βεβαίως υπάρχουν και άλλοι μέθοδοι παραγωγής μεταλλικών αφρών όπως η παραγωγή μεταλλικών αφρών με μεθόδους χύτευσης, με τη μέθοδο της ηλεκτροαπόθεσης, κατασκευή αφρού μετάλλου αλουμινίου από «Sand Ball» και η παραγωγή αφρού αλουμινίου με χρήση χλωριούχου νατρίου (NaCl) ως θήκη χώρου, οι οποίες δε θα συζητηθούν περαιτέρω στα πλαίσια αυτής της εργασίας [23].

1.3.2.3.3 Ιδιότητες αφρών αλουμινίου

Οι αφροί αλουμινίου εξαιτίας της πορώδους δομής τους και του εξαιρετικού συνδυασμού ιδιοτήτων, βρίσκουν εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος βιομηχανιών. Οι αφροί μετάλλων αναμειγνύουν τη μορφολογικά καθοδηγούμενη συμπεριφορά με τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τη μεταλλική σύνθεση της μήτρας. Τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των αφρών αλουμινίου που είναι μεγάλης σημασίας για τους χρήστες σε εφαρμογές μεταφοράς περιλαμβάνονται στην παρακάτω λίστα [24].

- Σχεδόν κλειστό πορώδες
- Υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την πλαστική παραμόρφωση
- Αυξημένη ειδική ακαμψία
- Μειωμένη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- Καλή μηχανική και ακουστική απόσβεση
- Μη εύφλεκτο
- Ανακυκλώσιμο
- Καλή κατεργασιμότητα

Η πλειονότητα των ιδιοτήτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην πυκνότητα του αφρού και στα χαρακτηριστικά του υλικού της μήτρας του. Οι αφροί υψηλότερης πυκνότητας, για παράδειγμα, έχουν μεγαλύτερη αντοχή στη συμπίεση από τους αφρούς χαμηλότερης πυκνότητας, όπως και οι αφροί που αποτελούνται από αλουμίνιο υψηλής αντοχής σε αντίθεση με το αλουμίνιο χαμηλής αντοχής [24].

Ο **Πίνακας 1-3** παρέχει ένα παράδειγμα ορισμένων ιδιοτήτων αφρού αλουμινίου για δύο αφρούς με διαφορετικές πυκνότητες και συνθέσεις κραμάτων.

Πίνακας 1-3: Ιδιότητες αφρών αλουμινίου σε σύγκριση με συμπαγές αλουμίνιο (τυπικές τιμές, μετρημένες σε 20 °C) [24].

Alloy		Al99.5 foam	AlCu4 foam	Al99.5 massive
General data				
Foaming agent	—	TiH ₂	TiH ₂	—
Heat treatment of foam	—	None	Hardened	—
Density	gcm ⁻³	0.4	0.7	2.7
Mean pore diameter	mm	4	3	—
Mechanical properties				
Compression strength	MPa	3	21	—
Energy absorption at 30% strain	MJm ⁻³	0.72	5.2	—
	kJkg ⁻¹	1.8	7.4	—
Young's modulus	GPa	2.4	7	67
Dynamical loss factor (1 kHz)	1	25·10 ⁻⁴	—	<5·10 ⁻⁴
Electrical and thermal properties				
Electrical conductivity	m(Ω·mm ⁻²)	2.1	3.5	34
Specific electrical resistivity	μΩ·cm ⁻¹	48	29	2.9
Thermal conductivity	W(m·K) ⁻¹	12	—	235
Thermal expansion coefficient	1/K	23·10 ⁻⁶	24·10 ⁻⁶	23.6·10 ⁻⁶

1.4 Κατεργασία Διάτρησης

1.4.1 Εισαγωγή

Η δημιουργία οπών με διάτρηση είναι μια από τις παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες διαδικασίες κατεργασίας. Οι σημερινές οπές παράγονται επίσης με πολλές άλλες διεργασίες, συμπεριλαμβανομένων μη συμβατικών, όπως ακτίνες λέιζερ, δέσμες ηλεκτρονίων κ.λπ. Η διάτρηση είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία μηχανικής κατεργασίας, επειδή τα περισσότερα μηχανικά εξαρτήματα έχουν οπές διαφόρων σχημάτων και μεγεθών και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία οπών σε μεταλλικά ή μη μεταλλικά αντικείμενα. Οι επεξεργασμένες οπές μπορούν να έχουν διαφορετικά σχήματα, όπως διαμπερείς οπές, κωνικές και τυφλές οπές. Ένα εργαλείο για τη διάνοιξη οπών σε στερεά υλικά έχει δύο κοπτικές ακμές και η διάτρηση απαιτεί δύο ταυτόχρονες κινήσεις του κοπτικού εργαλείου [10].

Η κύρια κίνηση κοπής είναι η **περιστροφή του κοπτικού εργαλείου** (τρυπάνι). Η **ταχύτητα κοπής** εξαρτάται από τον αριθμό των στροφών του εργαλείου και εκφράζεται σε μέτρα ανά λεπτό (m/min), παίρνοντας την υψηλότερη τιμή στην περιφέρεια του τρυπανιού καθώς ελαττώνεται προς το κέντρο του [10].

Η μέγιστη ταχύτητα κοπής v_c που εμφανίζεται στην περιφέρεια ενός εργαλείου διαμέτρου D [mm] που περιστρέφεται με ταχύτητα n περιστροφών ανά λεπτό [rpm] προκύπτει από αυτή τη σχέση:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000$$

Εξίσωση 1.1

όπου $\pi=3.14159265359$.

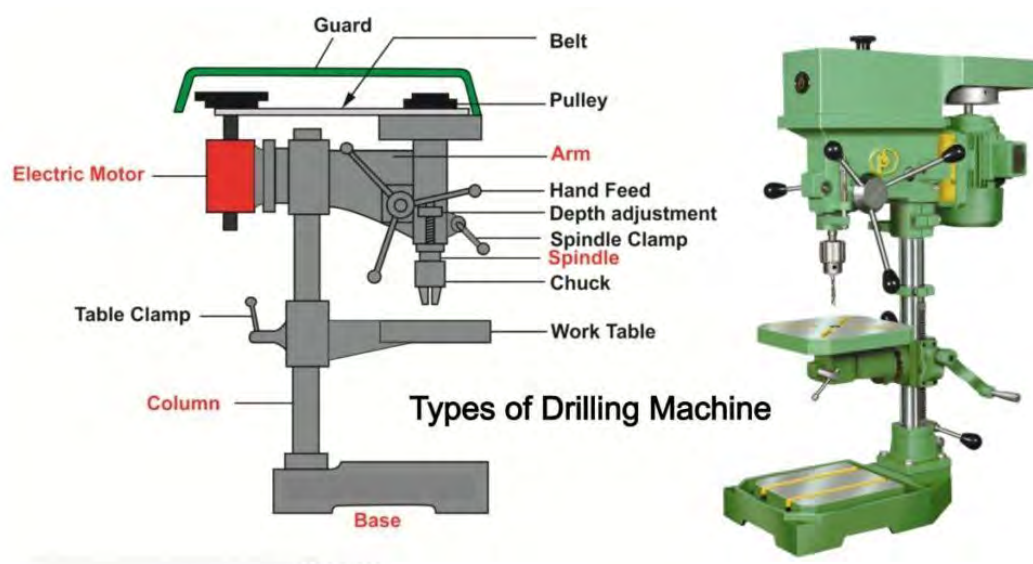
Η δεύτερη κίνηση για τη διάτρηση είναι η **γραμμική κίνηση του τρυπανιού** προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο (ΤΕ). Αυτή η κίνηση ορίζεται ως η προώθηση του εργαλείου και ελέγχει το πάχος του παραγόμενου αποβλίττου και συνεπώς τις αντίστοιχες παραγόμενης δυνάμεις κοπής. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα πρόωσης, τόσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του αποβλίττου και τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις κοπής. Η ταχύτητα της πρόωσης εκφράζεται σε χιλιοστά ανά περιστροφή (mm/rev), εκφρασμένη σε f ή f_{min} , ως συνάρτηση του χρόνου σε χιλιοστά ανά λεπτό (mm/min) [10]. Η σχέση ανάμεσά τους είναι:

$$f_{min} = f \cdot n$$

Εξίσωση 1.2

1.4.2 Το δράπανο

Μια εργαλειομηχανή που κινεί και περιστρέφει ένα τρυπάνι και χρησιμοποιείται για διάτρηση, ονομάζεται δράπανο. Σε ένα δράπανο, η άτρακτος περιστρέφει ένα εργαλείο κοπής που προωθείται, είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα, προς ένα τεμάχιο εργασίας που τοποθετείται σε ένα τραπέζι και συγκρατείται από μια κατάλληλη συσκευή σύσφιξης. Σύμφωνα με διαφορετικά πρότυπα, τα τρυπάνια διακρίνονται από το μέγεθος ή το βάρος τους, τη θέση της ατράκτου, τον αριθμό των ατράκτων, την κίνηση της ατράκτου και την ακρίβεια μηχανικής κατεργασίας. Τα εξαρτήματα που συνθέτουν ένα δράπανο είναι η βάση, η στήλη, η τράπεζα, η σταθερή κεφαλή όπου βρίσκεται το κιβώτιο ταχυτήτων, η κύρια άτρακτος που παρέχει την κύρια κίνηση για τη διάτρηση και η κινούμενη κεφαλή που περιλαμβάνει το κιβώτιο πρόωσης, **Σχήμα 1-16**. Το κάτω άκρο της ατράκτου έχει μια τυπική κωνικότητα για την τοποθέτηση κοπτικών εργαλείων [10].



Σχήμα 1-16: Είδος δράπανου και τα εξαρτήματά του [25].

1.4.3 Το τρυπάνι

Υπάρχουν πολλοί τύποι εργαλείων διάτρησης, όπως τα ελικοειδή τρυπάνια, τρυπάνια ευθείας αυλάκωσης, τρυπάνια βαθιάς οπής και κεντρικά τρυπάνια. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο τρυπάνι είναι το ελικοειδές τρυπάνι, του οποίου η γεωμετρία φαίνεται στο **Σχήμα 1-17**. Ένα τρυπάνι χαρακτηρίζεται από το ελικοειδές σχήμα του επειδή έχει ελικοειδείς αυλούς στο ωφέλιμο μήκος του. Οι ελικοειδείς αυλοί που διαθέτει το τρυπάνι σχηματίζουν τις απαραίτητες κοπτικές ακμές για να οδηγήσουν τα απόβλητα έξω από την τρυπημένη οπή, να επιτρέψουν στο υγρό κοπής να φτάσει στο σημείο κοπής και να

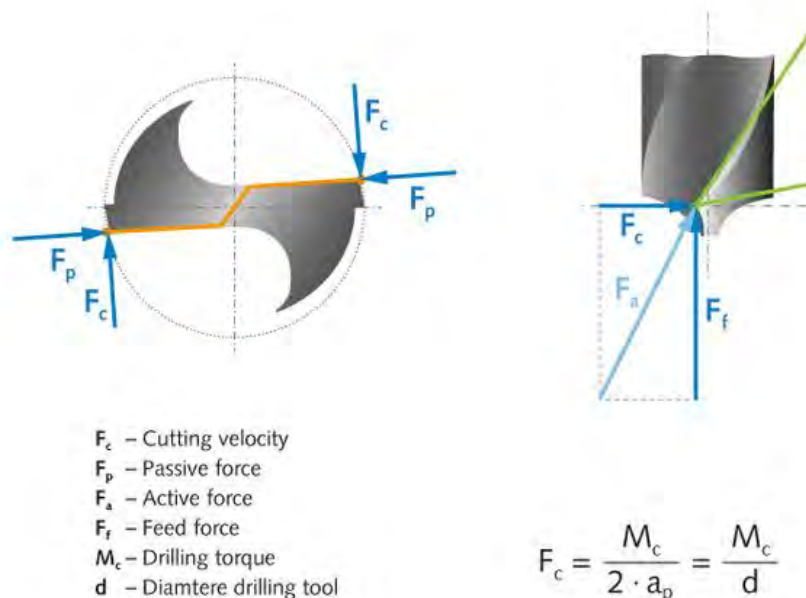
0.6 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 4.0 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 5.0 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 6.0 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 7.0 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 7.9 8.0 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 8.7 8.8 8.9 9.0 9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.6 9.7 9.8 9.9 10.0

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2}$$

εξαρτώνται από το υλικό του τεμαχίου εργασίας. Όσο πιο σκληρό είναι το τεμάχιο εργασίας, τόσο μικρότερη είναι η γωνία ελίκωσης και τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία σφήνας [10].

1.4.4 Δυνάμεις κοπής και Ροπή στρέψεις στη διάτρηση

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1-18**, κατά τη διάρκεια της διάτρησης, δημιουργούνται δυνάμεις στο κοπτικό εργαλείο. Σε ένα τρυπάνι με ιδανική γεωμετρία, αρκετές από αυτές τις δυνάμεις αλληλοεξουδετερώνονται, όπως φαίνεται. Σε κάθε σημείο της κοπτικής ακμής, δημιουργούνται τρεις συνιστώσες δυνάμεις F_c , F_p και F_f που δρουν σε αμοιβαία κάθετες κατευθύνσεις ή ενεργούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν τις συνιστώσες της δύναμης κοπής. Η οριζόντια απωθητική δύναμη δρα και στις δύο κοπτικές ακμές, ακυρώνοντας η μία την άλλη και η προς τα πάνω δύναμη δρα ως αντίθετη δύναμη στο κοπτικό εργαλείο που προσπαθεί να διεισδύσει στο υλικό [10].



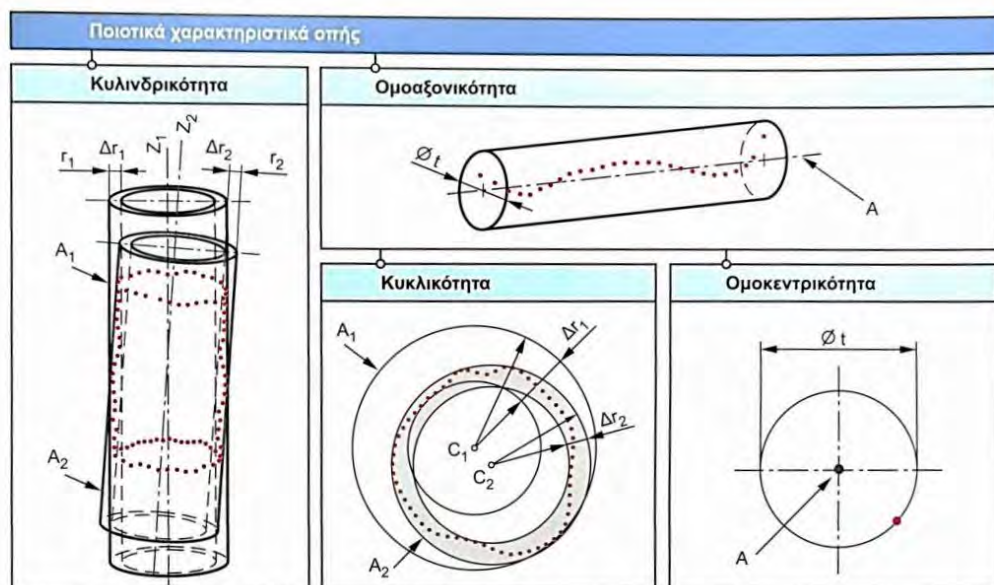
Σχήμα 1-18: Δυνάμεις κοπής κατά τη λειτουργία διάτρησης - εμφανίζονται οι συνιστώσες της ορθογώνιας δύναμης, F_c , F_f και F_p [26].

Η ισχύς που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διάτρησης είναι το γινόμενο της ροπής πολλαπλασιαζόμενη με την ταχύτητα περιστροφής, η οποία είναι επίσης ίση με το γινόμενο της ειδικής ενέργειας πολλαπλασιαζόμενη με τον ρυθμό έγχυσης του υλικού. Η γνώση της ροπής κατά τη διάτρηση είναι το κλειδί για την εκτίμηση των απαιτήσεων ισχύος, αλλά μπορεί να είναι δύσκολο να υπολογιστεί λόγω των πολλών παραγόντων που εμπλέκονται [16].

Η φθορά που εμφανίζεται στα τρυπάνια επηρεάζει την ικανότητα κοπής τους και μπορεί να γίνει αντιληπτή από την ακτίνα καμπυλότητας που σχηματίζεται στην εξωτερική γωνία της κύριας κοπτικής ακμής του ρύγχους του εργαλείου. Εάν το εργαλείο κοπής συνεχίσει να κόβει, ειδικά στην διάνοιξη τυφλών οπών, το εργαλείο θερμαίνεται σημαντικά λόγω της αυξημένης τριβής και τελικά σπάει. Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων, τα τρυπάνια πρέπει να ακονιστούν την κατάλληλη στιγμή. Το τρόχισμα του κοπτικού εργαλείου μπορεί να γίνει με το χέρι, αλλά για να αποφευχθούν λάθη, ειδικά στις γωνίες κοπής, είναι καλύτερο να γίνεται με τη βοήθεια ειδικών εργαλείων επανατροχισμού και κατά τη διαδικασία λείανσης πρέπει να χρησιμοποιείται ψυκτικό υγρό για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση της κοπτικής άκρης [10].

1.4.5 Ποιοτικά χαρακτηριστικά οπών από διάτρηση

Ένα από τα πιο σημαντικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της οπής είναι η κυλινδρικότητα της. Ταυτόχρονα, μπορούν επίσης να μετρηθούν και άλλες ανοχές όπως η κυκλικότητα, η ομοκεντρικότητα και η ομοαξονικότητα [10], όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1-19**.



Σχήμα 1-19: Ποιοτικά χαρακτηριστικά οπής [10].

Η **κυλινδρικότητα** ανήκει στην ανοχή σχήματος, η οποία ορίζεται ως η ελάχιστη ακτινική διαφορά μεταξύ δύο ομοαξονικών κυλίνδρων που περιβάλλουν όλα τα σημεία της μετρούμενης επιφάνειας της οπής, έτσι ώστε $\Delta r_2 < \Delta r_1$. Ο άξονας του κυλίνδρου προκαλείται από την παρεμβολή των διαφόρων κέντρων των διαφόρων επιπέδων της οπής και η πραγματική απόκλιση από το σχήμα του κυλίνδρου οφείλεται κυρίως σε σφάλματα στη διαδικασία μηχανικής κατεργασίας, παραμόρφωση που προκαλείται από θερμικά φορτία, κραδασμούς και φθαρμένα εργαλεία [10].

Η **ομοαξονικότητα** είναι μια ανοχή θέσης και αναφέρεται στη διάμετρο ενός κυλίνδρου που είναι ομοαξονικός με μια γραμμή αναφοράς εντός της οποίας πρέπει να βρίσκονται όλα τα σημεία του άξονα. Η **ομοκεντρότητα** αναφέρεται στη διάμετρο ενός κύκλου, ομόκεντρου προς ένα σημείο αναφοράς, μέσα στον οποίο πρέπει να βρίσκεται το πραγματικό κέντρο [10].

Η **κυκλικότητα** ανήκει στις ανοχές μορφής και αναφέρεται στη διαφορά ακτίνας δύο ομοεπίπεδων ομόκεντρων κύκλων, όπου όλα τα σημεία του μετρημένου προφίλ οπής πρέπει να βρίσκονται μέσα στους κύκλους αυτούς. Αυτοί οι κύκλοι πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε η διαφορά ακτίνας τους να είναι η μικρότερη $\Delta r_2 < \Delta r_1$. Το πρότυπο ISO 4291 αναφέρει τρεις μεθόδους για την αξιολόγηση της κυκλικότητας. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στον προσδιορισμό του κέντρου δύο ομόκεντρων κύκλων και στη συνέχεια στον υπολογισμό της τιμής της κυκλικότητας. Οι διαθέσιμες μεθοδολογίες περιλαμβάνουν τη μέθοδο προσδιορισμού του κέντρου ελαχίστων τετραγώνων (LSC), τη μέθοδο κέντρου ελάχιστης ζώνης (MZC), τη μέθοδο κέντρου ελάχιστου εγγεγραμμένου κύκλου (MCC) και τη μέθοδο κέντρου ελάχιστου περιγεγραμμένου κύκλου (MIC) [10].

Τα παραπάνω ποιοτικά χαρακτηριστικά των μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας ειδικές μηχανές CMM ή ακόμα και με εργαλειομηχανές CNC που χρησιμοποιούν ανιχνευτές ακμών [10].

Κεφάλαιο 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Σύνθετα Υλικά

2.1.1 Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες (FRP)

Στις κατασκευές αεροσκαφών, τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRPs) είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα σύνθετα υλικά. Αποτελούν μια επιθυμητή επιλογή για αεροπορικές εφαρμογές λόγω των χαρακτηριστικών τους ιδιοτήτων, οι οποίες περιλαμβάνουν υψηλή απόδοση, χαμηλό βάρος, αυξημένη ακαμψία και βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση. Οι ίνες οπλισμού στα FRP είναι συνήθως σκληρές, άκαμπτες και διάσπαρτες σε όλες τις φάσεις της σύνθετης μήτρας. Επιπλέον, ο οπλισμός χρησιμεύει ως το κύριο φέρον στοιχείο αφού, σε περίπτωση θραύσης μιας ίνας, το φορτίο μπορεί να ανακατανεμηθεί σε κοντινές ίνες μέσω της μήτρας. Ως αποτέλεσμα, η μήτρα περιβάλλει τον οπλισμό και χρησιμεύει ως συνδετικό υλικό. Η μήτρα δεν φέρει μεγάλο βάρος, αλλά προστατεύει τη δομή από συνθήκες φθοράς, όπως υψηλή υγρασία και θερμοκρασία, καθώς και ζημιές στην επιφάνεια. Επιπλέον, η μήτρα προσφέρει ολκιμότητα και αναστέλλει την εξάπλωση των ρωγμών από τη μια ίνα στην άλλη. Ως αποτέλεσμα, η μήτρα αντιστέκεται στη διάτμηση, οι ίνες αντιστέκονται στην τάση και μαζί λειτουργούν για να αντιστέκονται στη συμπίεση, αντανakλώντας τα γενικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών [27].

2.1.2 Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP)

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, ιδιαίτερα τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα πολυμερή, έχουν βρει ευρεία χρήση σε ποικίλες εφαρμογές. Αυτά τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες μπορούν περαιτέρω να χωριστούν σε πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βασάλτη (BFRP), πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP), πλαστικά ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου (AFRP) και πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) [28].

Η εξαιρετική απόδοση των πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα τα καθιστά ακόμη πιο μοναδικά στους τομείς της πολιτικής μηχανικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, του αθλητικού εξοπλισμού, της ναυτιλίας και της αεροδιαστημικής. Τα CFRP έχουν εξαιρετικές ιδιότητες που προσελκύουν περισσότερες βιομηχανίες, όπως καλή αντοχή στη διάβρωση, υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, χαμηλή θερμική διαστολή, υψηλή αντοχή σε κόπωση και υψηλή αναλογία ακαμψίας προς βάρος. Αρκετά από τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις βιομηχανίες αντικαταστάθηκαν από CFRP [28].

2.1.3 Διάτρηση των CFRP

Η διάτρηση είναι μια αναγκαιότητα για τη συναρμολόγηση υποεξαρτημάτων προκειμένου να κατασκευαστεί το τελικό προϊόν λόγω κατασκευαστικών παραμέτρων και υψηλού βαθμού πολυπλοκότητας στο σχεδιασμό των εξαρτημάτων. Πολλές τεχνικές παραγωγής οπών, όπως η συμβατική διάτρηση, η διάτρηση με υπερήχους, η διάτρηση με δέσμη λέιζερ, η διάτρηση με πίδακα νερού και άλλες, έχουν προταθεί για μια σειρά οικονομικών και ποιοτικών λόγων [29].

Ο σημερινός βιομηχανικός τομέας εξακολουθεί να χρησιμοποιεί τις συμβατικές διατρήσεις περισσότερο. Ωστόσο, λόγω ορισμένων θεμάτων, η συμβατική διάτρηση σύνθετων υλικών ήταν πάντα προβληματική. Είναι πλέον κατανοητό ότι ο μηχανισμός αυτής της κατεργασίας διαφέρει από αυτόν της ομογενούς και ισοτροπικής αφαίρεσης μετάλλων από συνηθισμένα υλικά. Η διάτρηση προκαλεί επίσης μια σειρά από δυσμενείς μορφές ζημιάς, συμπεριλαμβανομένης της ρωγμής της μήτρας, της αποκόλλησης και της θραύσης των ινών, η οποία μειώνει σημαντικά την αντοχή έναντι της κόπωσης και βλάπτει την ανθεκτικότητα των σύνθετων ελασμάτων [29].

Λόγω της απαίτησης για σύνδεση δομής, η διάτρηση με περιστρεφόμενο τρυπάνι (twist drill) είναι η κατεργασία που χρησιμοποιείται πιο συχνά για δευτερογενή κατεργασία σύνθετων υλικών. Η διάτρηση είναι υπεύθυνη για περίπου το 40% όλων των εργασιών αφαίρεσης μετάλλων στον αεροδιαστημικό τομέα. Στη βιομηχανία της κατασκευής οπών, η φθορά του τρυπανιού είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς πρέπει να αποφεύγεται για την προστασία των τεμαχίων εργασίας, των εργαλειομηχανών και των κοπτικών εργαλείων [30].

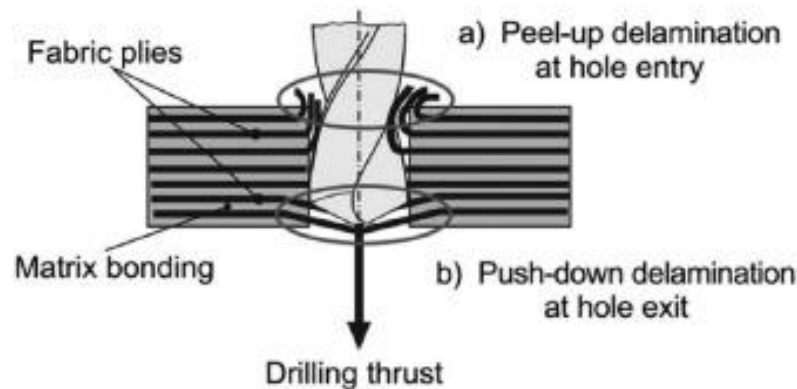
2.1.4 Ελαττώματα που προκύπτουν κατά τη διάτρηση των CFRP

Απαιτούνται αυστηρές κατευθυντήριες γραμμές σε όλες τις βιομηχανίες για την κατασκευή υψηλής ποιότητας κατεργασμένων εξαρτημάτων με τα λιγότερα δυνατά ελαττώματα. Κατά συνέπεια, ο τύπος του υλικού, οι συνθήκες διάτρησης και οι επιθυμητές ανοχές σε μια βιομηχανία επηρεάζουν την ποιότητα των οπών. Η αποκόλληση, η κυκλικότητα, το μέγεθος της οπής, η ανάπτυξη απολήξεων και η τραχύτητα της επιφάνειας είναι μερικά από τα πιο σημαντικά ελαττώματα [27].

2.1.4.1 Αποκόλληση/Αποελασματοποίηση

Τα θέματα διάτρησης περιλαμβάνουν μια σειρά ζητημάτων, αλλά η αποκόλληση πιστεύεται ότι είναι το πιο σημαντικό. Η αποκόλληση είναι μια διαδικασία που συμβαίνει όταν η ισχυρότερη δύναμη κοπής προκαλεί τον διαχωρισμό των δεσμών του στρώματος ινών. Όταν η καταπόνηση που δημιουργείται από τη δύναμη κοπής υπερβαίνει την αντοχή συγκόλλησης των ινών άνθρακα, πραγματοποιείται αποκόλληση σαν αυτή, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2-1**. Η αποκόλληση με ώθηση προς τα πάνω και η αποκόλληση με ώθηση προς τα κάτω είναι δύο όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ζημιά που προκαλείται

από τη διάτρηση στην είσοδο και την έξοδο της οπής, αντίστοιχα [28]. Σύμφωνα με μια έρευνα, έως και το 60% των σύνθετων ελασματοποιημένων εξαρτημάτων στον τομέα των αεροσκαφών απορρίφθηκαν κατά τη διάρκεια της τελικής συναρμολόγησης λόγω ζημιών αποκόλλησης λόγω διάτρησης. Η διάτρηση είναι συχνά η τελευταία κατεργασία που εκτελείται κατά τη συναρμολόγηση εξαρτημάτων που κατασκευάζονται από σύνθετα ελάσματα, επομένως οποιαδήποτε αποκόλληση που προκαλείται από τη διάτρηση που προκαλεί την απόρριψη των εξαρτημάτων συνιστά δαπανηρή απώλεια [31].



Σχήμα 2-1: Κατηγοριοποίηση της αποκόλλησης [28].

2.1.4.2 Επιφανειακή τραχύτητα, μέγεθος οπής και κυκλικότητα

Η τραχύτητα επιφάνειας, η οποία χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της υφής ή των φινιρισμάτων της επιφάνειας κοιτάζοντας την ακανόνιστη επιφάνεια του τεμαχίου εργασίας, είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά στη διαδικασία διάτρησης. Κάθε τεμάχιο εργασίας με τρυπημένες οπές με υψηλή τραχύτητα επιφάνειας έχει μειωμένη ικανότητα αντίστασης στη διάβρωση, καθώς και οδηγεί σε υπερβολική φθορά και κόπωση [27].

Μαζί με την τραχύτητα της επιφάνειας, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το πόσο καλά επεξεργασμένα εξαρτήματα λειτουργούν περιλαμβάνουν την απόκλιση της τρυπημένης οπής από την ονομαστική διάμετρο και την κυκλικότητά της. Θεωρείται ως ένα από τα κύρια σχέδια για τεχνικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ποιότητας των διανοιγμένων οπών. Λόγω της υψηλής ταχύτητας κοπής, η διάμετρος της οπής διάτρησης ποικίλλει από το αρχικό της μέγεθος και περιστασιακά μεγεθύνεται. Αυτό οφείλεται στον αυξημένο “θόρυβο τρυπήματος” και στη δόνηση σε υψηλές ταχύτητες κοπής, γεγονός που μειώνει την ακρίβεια των οπών. Επιπλέον, επειδή η δόνηση μπορεί να είναι στο μέγιστο όταν το τρυπάνι συναντά το τεμάχιο εργασίας, η δυναμική του συμπεριφορά προκαλεί επίσης μεγαλύτερη διάμετρο στην έξοδο της οπής [27].

2.1.5 Παράμετροι κατεργασίας διάτρησης

Η σωστή επιλογή των παραμέτρων κατεργασίας είναι απαραίτητη για υψηλής ποιότητας διάτρηση σύνθετων υλικών. Οι παράμετροι μηχανικής κατεργασίας και οι παράμετροι του εργαλείου είναι παραδείγματα παραμέτρων διεργασίας. Ο ρυθμός πρόωσης και η ταχύτητα κοπής είναι παραδείγματα παραμέτρων μηχανικής κατεργασίας, ενώ οι τύποι, οι γεωμετρίες, τα υλικά και οι επικαλύψεις των εργαλείων είναι παραδείγματα παραμέτρων του εργαλείου. Οι παράμετροι του εργαλείου και οι παράμετροι κατεργασίας συνδέονται και επηρεάζουν άμεσα τις ενεργές (online) και ανενεργές (offline) παραμέτρους. Η δύναμη πρόωσης και η ροπή είναι παραδείγματα ενεργών παραμέτρων, ενώ η αποκόλληση, η τραχύτητα επιφάνειας, το μέγεθος οπής, το σφάλμα κυκλικότητας και η φθορά του εργαλείου είναι παραδείγματα ανενεργών παραμέτρων. Ως εκ τούτου, η επιλογή των σωστών παραμέτρων διεργασίας είναι απαραίτητη για τις κατεργασίες διάτρησης, επειδή συμβάλλουν στην καλύτερη απόδοση διάτρησης, στη χαμηλότερη συχνότητα αποκόλλησης και στην κατάλληλη στίλβωση επιφάνειας [27].

Πολλοί συγγραφείς έχουν βρει τη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων κοπής, των υλικών επεξεργασίας, των εργαλείων και των ελαττωμάτων μέσα από διάφορα πειράματα, με απώτερο στόχο τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας διάτρησης.

Οι C.C. Tsao, H. Hocheng (2007) [30] μελέτησαν την επίδραση της φθοράς του εργαλείου στην αποκόλληση κατά την διάτρηση σύνθετων υλικών. Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιήθηκε πολυστρωματικό σύνθετο υλικό κατασκευασμένο από υφασμένα προεμποτίσματα ανθρακονημάτων WFC200 με χύτευση σε αυτόκλειστο. Το πάχος της πλάκας ήταν 6 mm και αποτελούνταν από εικοσιτέσσερα ελάσματα με αλληλουχία στοίβαξης $[0/90]_{12s}$. Χρησιμοποιήθηκε ελικοειδής τρυπάνι από χάλυβα υψηλής ταχύτητας (HSS) με διάμετρο 6 mm και γωνία σημείου 118° . Όλα τα πειράματα διάτρησης πραγματοποιήθηκαν χωρίς ψυκτικό σε ταχύτητες ατράκτου 1000, 1500 και 2000 rpm και ρυθμούς τροφοδοσίας 10, 15 και 20 mm/min. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ενώ η πραγματική δύναμη ώσης αυξάνεται με τη φθορά σε μεγαλύτερο βαθμό, η αποκόλληση γίνεται πιο πιθανό να συμβεί ακόμη και όταν η κρίσιμη δύναμη ώσης αυξάνεται με την αύξηση της φθοράς, όπως φαίνεται από τον παράγοντα ώθησης (Z). Το φθαρμένο ελικοειδές τρυπάνι επιτρέπει χαμηλότερο ρυθμό τροφοδοσίας από ένα αιχμηρό τρυπάνι, κάτω από τον οποίο μπορεί να αποφευχθεί η ζημιά στην αποκόλληση.

Οι Jinyang_Xu, Chao Li, Sipei Mi, Qinglong An, Ming Chen (2018) [32] μελέτησαν τα πιο σημαντικά ελαττώματα, πιο συγκεκριμένα τα γρέζια (burrs), το σχίσιμο (tearing) και τις αποκολλήσεις (delamination), που προκαλούνται από διάτρηση για σύνθετα υλικά CFRP χρησιμοποιώντας νέα κριτήρια. Χρησιμοποιώντας ελάσματα CFRP T800/X850, διεξήχθησαν πειράματα διάτρησης με χρήση τριών διαφορετικών τύπων τρυπανιών, συμπεριλαμβανομένων των τρυπανιών brad spur, των ελικοειδών τρυπανιών (twist drills) και

των τρυπανιών με στιλέτο (dagger drills). Τα πειράματα γεώτρησης πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα πλήρες παραγοντικό σχέδιο με τέσσερα επίπεδα για τον ρυθμό τροφοδοσίας ($f = 0,010, 0,015, 0,020$ και $0,025$ mm/rev) και τέσσερα επίπεδα για την ταχύτητα περιστροφής του άξονα ($n = 1000, 1500, 2000$, και 2500 rpm). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες και οι παράμετροι κοπής του τρυπανιού έχουν υψηλή ευαισθησία στα ελαττώματα που προκαλούνται από τη διάτρηση. Πιο συγκεκριμένα το τρυπάνι brad spur πετυχαίνει την υψηλότερη απόδοση κοπής κατά τη διάτρηση ελασμάτων T800/X850 CFRP, ενώ το τρυπάνι στιλέτο την χειρότερη. Η απόδοση του ελικοειδούς τρυπανιού είναι παρόμοια με αυτή του τρυπανιού στιλέτο. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι ο πρωταρχικός παράγοντας που επηρεάζει την έκταση των διάτρητων ελαττωμάτων στα σύνθετα, καθορίζεται ως ο ρυθμός τροφοδοσίας.

Οι P. Mayuet κ.α. (2013) [33] μελέτησαν την κατεστραμμένη περιοχή των ελαττωμάτων στην είσοδο και έξοδο της οπής κατά τη ξηρή διάτρηση πλαστικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα. Για την επίτευξη αυτού έγιναν πειράματα πάνω σε πλάκες CFRP με χάλκινο πλέγμα στη μία επιφάνεια, ενισχυμένες με πλεγμένες ίνες με προσανατολισμό στις 0° και στις 90° , που είχαν στοιβαχθεί σε πάχος 200 mm με σκλήρυνση σε αυτόκλειστο. Διεξήχθησαν πενήντα πειράματα με διαφορετικό ζεύγος συνθηκών ταχύτητας κοπής, μεταξύ 5.000 rpm και 15.000 rpm, και πρόωσης, από 0.025 mm/rev έως 0.1 mm/rev, χρησιμοποιώντας ελικοειδή τρυπάνια καρβιδίου χωρίς επίστρωση (WC-Co). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί φθοράς του εργαλείου είναι η τριβή εξαιτίας των ινών και η πρόσφυση. Άρα η απώλεια των συνθηκών από το θρυμματισμό του κοπτικού εργαλείου είναι η κύρια αίτια εμφάνισης των ελαττωμάτων στην οπή. Αυτά τα ελαττώματα περιλαμβάνουν αποκολλήσεις ή ξεφλούδισμα στην είσοδο (Break-IN) και στην έξοδο (Break-OUT) των τρυπανιών. Τελικά, ανακαλύφθηκε ότι οι χαμηλότερες ταχύτητες κοπής και πρόωσεις, χρησιμοποιούνται για να ληφθούν οι μεγαλύτερες τιμές για σφάλματα B-IN/B-OUT. Μπορεί να συνδέεται με το πόσο διαρκεί η θερμομηχανική επίδραση στο τεμάχιο εργασίας.

Οι E. Eneyew, M. Ramulu (2014) [34] μελέτησαν πειραματικά τη ποιότητα επιφάνειας και ζημιάς κατά τη διάτρηση σύνθετων υλικών CFRP μονής κατεύθυνσης. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα πολυστρωματικό CFRP 6,35 mm, μονής κατεύθυνσης. Για τη δημιουργία αυτών των ελασμάτων CFRP χρησιμοποιούνται νήματα υψηλής αντοχής T800H της Toray Composites, ενδιάμεσου συντελεστή και εποξειδική ρητίνη 3900-2. Η διαδικασία διάτρησης χρησιμοποιεί ένα τρυπάνι οκτώ όψεων με μύτη από πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD) διαμέτρου 6,35 mm που παρέχεται με ακρίβεια STF. Δεν χρησιμοποιήθηκε ψυκτικό υγρό ενώ όλες οι διατρήσεις έγιναν σε ξηρό περιβάλλον. Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της πρόωσης η δύναμη ώσης αυξάνεται, ενώ με την αύξηση της ταχύτητας κοπής η δύναμη ώσης μειώνεται ελαφρώς. Γενικά, η πρόωση έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στη δύναμη ώσης από την ταχύτητα κοπής. Επίσης διαπιστώθηκε ότι σε όλη την περίμετρο της τρύπας και σε όλο το βάθος της, ήταν ορατές πιο τραχιές επιφάνειες. Η χρήση ενός συνδυασμού

μεγαλύτερης ταχύτητας κοπής και χαμηλότερης πρόωσης παρήγαγε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας οπών. Επίσης, η χαμηλότερη δύναμη ώσης, ο συντελεστής αποκόλλησης και οι χαμηλότερες τιμές τραχύτητας επιφάνειας (Rt) εντός των πειραματικών παραμέτρων συνδέθηκαν με ταχύτητα κοπής 4500–6000 rpm και ταχύτητα πρόωσης 64 mm/rev.

Οι V.N Gaitonde κ.α. (2011) [35] μελέτησαν τους τρόπους ελαχιστοποίησης του ελαττώματος της αποκόλλησης κατά τη διάτρηση σύνθετων CFRP. Χρησιμοποιήθηκαν οι μεθοδολογίες Taguchi, ANOM και ANOVA για τον προσδιορισμό των βέλτιστων επιπέδων παραμέτρων διεργασίας και για την ανάλυση της επίδρασης των παραμέτρων στον παράγοντα αποκόλλησης. Τα σύνθετα ελάσματα CFRP αποτελούνταν από εποξειδική μήτρα ενισχυμένη με 50% κατά βάρος υφασμένο ανθρακονήματα με προσανατολισμό 0/90°. Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν ελικοειδή τρυπάνια από τσιμεντοειδές καρβίδιο (K20), διαμέτρου 5 mm και γωνίας ελίκωσης 25°. Τα αποτελέσματα ANOM δείχνουν ότι για να ελαχιστοποιηθεί η αποκόλληση, απαιτείται συνδυασμός υψηλότερης ταχύτητας άξονα (40.000 rpm) με χαμηλές τιμές πρόωσης (1000 mm/min) και γωνία σημείου (85°). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ANOVA, η γωνία σημείου είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για την ελαχιστοποίηση της αποκόλλησης, ακολουθούμενη από την τροφοδοσία και την ταχύτητα. Ωστόσο, όλες οι αλληλεπιδράσεις δύο παραγόντων είναι ασήμαντες. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι μια μεθοδική και αποτελεσματική μεθοδολογία βελτιστοποίησης για τη μείωση της τάσης αποκόλλησης είναι ο σχεδιασμός Taguchi.

2.2 Πορώδη Υλικά

2.2.1 Μεταλλικοί Αφροί

Μια σχετικά νέα κατηγορία και ποικιλία μη ομοιογενών υλικού, που αναφέρεται ως "μεταλλικός αφρός", αποτελείται από μια βασική μεταλλική ουσία με ποικίλους αριθμούς φυσαλίδων αερίου διάσπαρτες σε όλο το μεταλλικό σώμα. Στην πραγματικότητα, αυτές οι φυσαλίδες είναι πόροι ή κοιλότητες βασικού μετάλλου [37]. Αν και οι πρώτοι αφροί μετάλλων αναπτύχθηκαν στα μέσα του 20ου αιώνα, εκτενής έρευνα για τα χαρακτηριστικά και τις προοπτικές βιομηχανικές χρήσεις τους έχει διεξαχθεί μόνο τα τελευταία δέκα χρόνια. Λόγω της δυσκολίας στην παραγωγή μεταλλικών αφρού με σταθερή ποιότητα και ομοιογένεια, καθώς και λόγω της έλλειψης κατανόησης της διαδικασίας αφρισμού, εξακολουθούν να μην χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι το υψηλό τους κόστος (15-25 Ευρώ/κιλό) και η ανεπαρκής γνώση όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών [37].

Οποιοδήποτε μέταλλο είναι διαθέσιμο ως σκόνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέταλλο θεμελίωσης για μεταλλικούς αφρούς. Το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος και το νικέλιο,

μαζί με τα κράματά τους, είναι τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στις μέρες μας για τη δημιουργία μεταλλικών αφρού. Ο τύπος του βασικού μετάλλου και οι συνθήκες επεξεργασίας συχνά επηρεάζουν τις ιδιότητες των μεταλλικών αφρού. Οι μεταλλικοί αφροί με κλειστούς πόρους έχουν υψηλό βαθμό ακαμψίας και αντοχής, καθώς και ανώτερες ιδιότητες απόσβεσης και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Οι αφροί αλουμινίου κλειστού πορώδους είναι υλικά χαμηλής πυκνότητας που μπορούν να επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού επειδή οι στρογγυλές φυσαλίδες αερίου σε αυτούς τους αφρούς διαχωρίζονται η μία από την άλλη από ένα λεπτό στρώμα μετάλλου αλουμινίου [37].

2.2.2 Αφροί Αλουμινίου

Το ΑΙ είναι ένας από τους μεταλλικούς αφρούς που είναι αρκετά σημαντικός. Αυτά τα υλικά προσελκύουν μεγάλη προσοχή σήμερα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μηχανικής. Οι αφροί ΑΙ είναι γνωστοί για την υψηλή θερμική αγωγιμότητα, την ακουστική μόνωση και την ικανότητα απορρόφησης ήχου και ενέργειας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικό σε προφίλ για την απορρόφηση ενέργειας. Η αυτοκινητοβιομηχανία και ο διαστημικός τομέας βρίσκονται στην πρώτη γραμμή των εφαρμογών τους, ιδιαίτερα όπου απαιτείται χαμηλότερη πυκνότητα. Κατά τη λειτουργία, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι ευαίσθητα σε δυναμικές καταπονήσεις και κραδασμούς. Τα υψηλά επίπεδα θορύβου και η φθορά του καλουπιού προκαλούνται από αυτά τα δυναμικά φορτία και τους κραδασμούς. Επομένως, οι αφροί αλουμινίου προτιμώνται στην κατασκευή μηχανών για την ελαχιστοποίηση αυτών των προβλημάτων λόγω των δυνατοτήτων απόσβεσης χαμηλής και υψηλής ενέργειας [36].

Μία από τις πιο πρόσφατες επιλογές είναι η συνένωση αφρού αλουμινίου με συμβατικά φύλλα ή σωλήνες από χάλυβα και αλουμίνιο λόγω των εξαιρετικών μηχανικών και φυσικών του δυνατοτήτων. Οι κατασκευές σάντουιτς από αφρό αλουμινίου και τα προφίλ σωλήνων γεμάτα με αφρό αλουμινίου είναι τα τελικά αποτελέσματα. Τέτοια προϊόντα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή αυτοφερόμενων τοίχων με καλή ηχοαπορρόφηση και αντοχή στη φωτιά, τυπικά ελαφρά δομικά εξαρτήματα για τις βιομηχανίες αυτοκινήτων και φορτηγών, καθώς και εξαρτήματα γρήγορης κίνησης για εξαιρετικά δυναμικές εργαλειομηχανές. Τέτοια εξαρτήματα μπορούν να στερεωθούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας βίδες ή με συγκόλληση [37].

Οι μηχανικές ιδιότητες των μεταλλικών αφρών μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με το μέγεθος, το σχήμα και την επιφάνεια των πόρων που αποτελούν τη δομή. Οι προδιαγραφές πυκνότητας και μεταλλικής μήτρας έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της δομής αφρού. Η μηχανική απόδοση των αφρών μήτρας αλουμινίου αξιολογείται με βάση τα μικροδομικά χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία των πόρων τους. Οι μικροδομικοί παράγοντες υπάρχουν στην πλευρική γεωμετρία και στο πάχος του τοιχώματος των πόρων. Το μέγεθος, το σχήμα, η κατανομή των πόρων και τα ελαττώματα στη δομή των πόρων είναι όλα παραδείγματα γεωμετρικών ιδιοτήτων [36].

2.2.3 Διάτρηση Μεταλλικών Αφρών

Λόγω των πορωδών δομών τους, οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιώντας μπουλόνια και πριτσίνια. Η ταχύτητα κοπής και η πρόωση συμβάλλουν στη διάσπαση ή την πλαστική παραμόρφωση των πορωδών κατά τη διάτρηση των αφρών. Ο σχηματισμός αποβλίττου κατά τη διάρκεια των εργασιών διάτρησης έχει αντίκτυπο στην ταχύτητα και τη θερμοκρασία κοπής εκτός από τον ίδιο τον σχηματισμό αποβλίττου. Ως αποτέλεσμα, η ακρίβεια του μετρητή της οπής και η ποιότητα της επιφάνειας ποικίλλουν [36].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η δυναμική αστάθεια του κοπτικού εργαλείου κατά την πρώτη είσοδο στην οπή είναι ο λόγος που η διάμετρος στην είσοδο της οπής και οι τιμές απόκλισης από την κυκλικότητα (DFC) είναι υψηλότερες από αυτές στην έξοδο της οπής. Σύμφωνα με ισχυρισμούς, αυτές οι τιμές μειώνονται στην είσοδο και την έξοδο της οπής και αυτό συμβαίνει διότι το τρυπάνι οδηγείται κατά μήκος της οπής μέχρι να εξέλθει [36].

Οι G. Uzun, U. Gokmen, H. Cinici, M. Turker (2017) [36] μελέτησαν την επίδραση των παραμέτρων κοπής στη διάτρηση των μεταλλικών αφρών AlSi7. Σκόνες Al και σκόνες Si 99,9% καθαρότητας χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές ως υλικό μήτρας και 98% καθαρές σκόνες TiH₂ ως παράγοντας αφρισμού. Παρασκευάστηκαν δείγματα μπλοκ με δυνατότητα δημιουργίας αφρού με εφαρμογή μονοαξονικής πίεσης (600 MPa) στις αναδευόμενες σκόνες Al, 7% Si και 1% TiH₂ σε ένα καλούπι, ακολουθούμενη από παραμόρφωση. Στους 710 °C, τα δείγματα μπλοκ πέρασαν από μια διαδικασία αφρισμού. Τα ληφθέντα δείγματα τρυπήθηκαν με μη επικαλυμμένα τρυπάνια HSS διαφόρων διαμέτρων (4, 5 και 6) mm σε διάφορες ταχύτητες κοπής (10, 30, 50, 70) mm/min και πρόωση (0,15, 0,225, 0,30) mm/rev. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την αύξηση της ταχύτητας κοπής, οι δυνάμεις τροφοδοσίας αυξήθηκαν επίσης, εξαιτίας της πιο σκληρής εκφόρτωσης του αποβλίττου. Με μια αύξηση στην πρόωση, η δύναμη ώσης παρουσίασε αυξήσεις στην περιοχή από 200–500%. Επίσης, η επίδραση της αφρισμένης δομής στα θραύσματα των αποβλίττων, οδήγησε σε μια αναλογική αύξηση στις προσφύσεις των αποβλίττων με την ταχύτητα κοπής. Χρησιμοποιώντας τρυπάνια 4 mm, μετρήθηκαν οι μεγαλύτερες δυνάμεις ώσης, ενώ τα τρυπάνια των 6 mm απέδωσαν τις χαμηλότερες δυνάμεις ώσης. Το εργαλείο στο οποίο σημειώθηκαν οι χαμηλότερες δυνάμεις ώσης χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των χαμηλότερων τιμών απόκλισης από τη κυκλικότητα (DFC) με τρυπάνια 6 mm. Για την απόκλιση από τη κυκλικότητα (DFC), η πρόωση αποδείχθηκε πιο χρήσιμη παράμετρος από την ταχύτητα κοπής. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι το DFC ήταν χαμηλότερο για όλα τα εργαλεία κοπής όταν η ταχύτητα κοπής και ο ρυθμός τροφοδοσίας αυξήθηκαν μαζί.

Οι Damir Ciglar, Toma Udiljak, Stephan Škorić (2006) [37] μελέτησαν την αξονική δύναμη στη κατεργασία διάτρησης αφρού αλουμινίου. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε αφρός αλουμινίου με μέσο μέγεθος κλειστών κυψελών 0,5-1,5 mm, κατασκευασμένος με έμμεσο αφρισμό από πρόδρομες ουσίες AlSi12. Το κοπτικό εργαλείο είναι τυπικά τρυπάνια χάλυβα υψηλής ταχύτητας (HSS) με διάμετρο 4,5 mm και τιμές γωνίας σημείου 80° και 120°. Η πρόωση ανά δόντι που χρησιμοποιήθηκε είναι 0,06 mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αξονική δύναμη που χρησιμοποιείται για τη διάτρηση της κρούστας αφρού αλουμινίου (crust) είναι σχεδόν διπλάσια από την αξονική δύναμη που χρησιμοποιείται για το τρύπημα της καρδιάς αλουμινίου (heart). Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η κρούστα του αφρού αλουμινίου δεν είναι πορώδης άρα θα αντιδρούσε πιο έντονα στη διεύθυνση του τρυπανιού κατά τη διάρκεια της διάτρησης. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι, εντός των ορίων του πειράματος, ούτε η ταχύτητα κοπής ούτε η γωνία άκρου του τρυπανιού επηρεάζουν σημαντικά την αξονική δύναμη διάτρησης κατά τη διάτρηση είτε της κρούστας αφρού αλουμινίου είτε της καρδιάς αφρού αλουμινίου.

Κεφάλαιο 3. ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.1 Σκοπός Πειραμάτων

Οι αφροί αλουμινίου βρίσκουν εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος μηχανικών εφαρμογών καθώς το χαμηλό τους βάρος και οι καλές φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες έχουν τραβήξει τη προσοχή πολλών βιομηχανιών. Η διάτρηση, είναι μία από τις σημαντικότερες μηχανουργικές κατεργασίες που χρησιμοποιείται για την ένωση των σύνθετων δομών. Στη συγκεκριμένη εργασία μέσα από τα πειράματα θα εξεταστεί η επίδραση των συνθηκών κοπής, συγκεκριμένα της ταχύτητας κοπής v_c και της πρόωσης f , στην Αξονική Δύναμη και τη Ροπή που αναπτύσσονται, καθώς και στη φθορά του κοπτικού εργαλείου, αλλά και στη ποιότητα της εισόδου της οπής.

3.2 Προγραμματισμός του Πειράματος

Τα πειράματα της διάτρησης, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ενώ η ανάλυση της ποιότητας των κοπτικών ακμών των εργαλείων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του ίδιου Τμήματος.

Οι πειραματικές δοκιμές έγιναν στο δράπανο στήλης IBARMIA 1-B-35-P με μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου τις 1274 στροφές ανά λεπτό (rpm) και μέγιστη πρόωση 0,3 χιλιοστά ανά περιστροφή (mm/rev). Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ελικοειδή τρυπάνια, από ταχυχάλυβα (HSS), με κυλινδρικό στέλεχος και διάμετρο 6 χιλιοστών (DIN 338), με επικάλυψη μπρούτζου, τα οποία κατασκευάστηκαν από την εταιρία κοπτικών εργαλείων WERKO. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κοπτικού εργαλείου καθώς και οι παράμετροι κοπής που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3-1**.

Πίνακας 3-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά Κοπτικού Εργαλείου και παράμετροι κοπής.

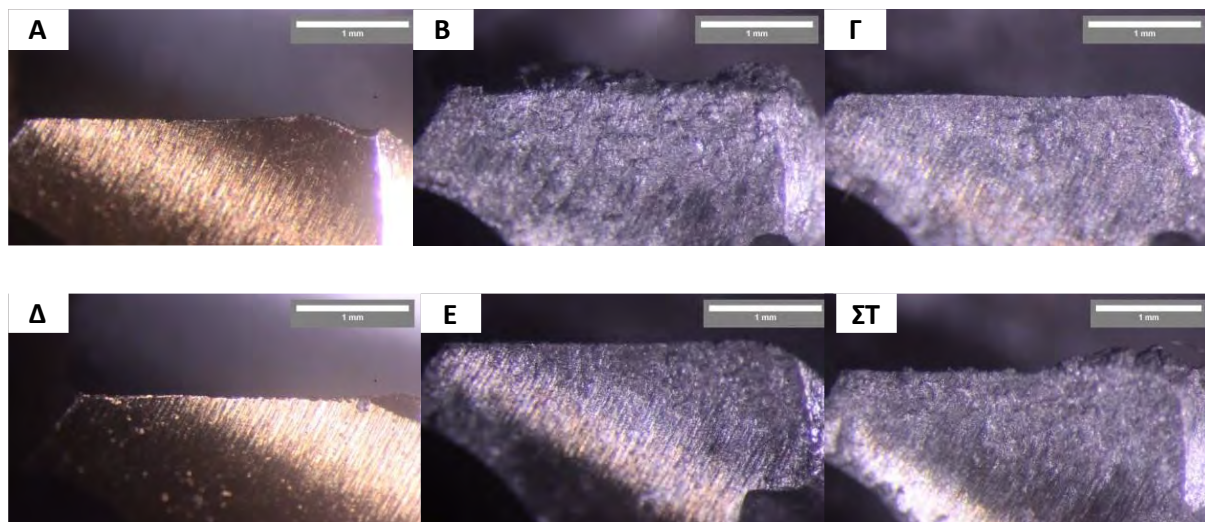
Υλικό Κοπτικού εργαλείου	HSS (Ταχυχάλυβας)
Πρότυπο	DIN 338
Επικάλυψη	Μπρούτζος
Γωνία αιχμής (point angle)	118°
Διάμετρος (D)	6 mm
Τύπος	Straight shank drill (κυλινδρικό στέλεχος)
Ταχύτητα Κοπής (v_c)	17, 24 m/min
Πρόωση (f)	0,1, 0,2, 0,3 mm/rev

Χρησιμοποιήθηκαν συνθήκες ξηρής κοπής για τη διεξαγωγή δοκιμών διάτρησης όπου διανοίχτηκαν διαμπερείς οπές βάθους 30 mm. Ο διαχωρισμός των αξόνων της οπής ορίστηκε στα 10 mm προκειμένου να ληφθεί υπόψη η κατανομή θερμότητας γύρω από τη διάνοιξη οπής. Δεδομένου ότι οι ακτινικές δυνάμεις και οι δυνάμεις κοπής σε μια κατεργασία διάτρησης είναι γενικά χαμηλές, λαμβάνεται υπόψη η τρίτη συνιστώσα δύναμης, η αξονική δύναμη πρόωσης (F_z) και η ροπή (M_z). Οι μετρήσεις της αξονικής δύναμης και της ροπής πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ενός δυναμόμετρου τύπου KISTLER 9272 που ήταν προσαρτημένο στη τράπεζα της εργαλειομηχανής με βίδες τύπου M10. Πάνω στο δυναμόμετρο στερεώθηκε με βίδες τύπου M8, ένας σφικτήρας, που χρησιμοποιήθηκε για τη σύσφιξη των τεμαχίων αφρού αλουμινίου, όπως απεικονίζεται και στο **Σχήμα 3-1**.



Σχήμα 3-1: Πειραματική Διάταξη όπου φαίνονται το δράπανο, ο σφικτήρας, το τεμάχιο, το δυναμόμετρο και η οθόνη του υπολογιστή.

Έπειτα, μετά το πέρας των 10 πρώτων σπών, τα 6 εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για να καλυφθούν όλοι οι συνδυασμοί των συνθηκών κοπής, απομακρύνθηκαν, ώστε να παρατηρηθεί η ποιότητα των κοπτικών ακμών τους, με τη χρήση ενός στερεοσκοπίου, διαδικασία που επαναλήφθηκε μετά το πέρας και των επόμενων 10 σπών. Στο **Σχήμα 3-2** εμφανίζονται η αρχική, η ενδιάμεση και η τελική κατάσταση ενός από τα κοπτικά εργαλεία, πιο συγκεκριμένα αυτό που χρησιμοποιήθηκε με ταχύτητα κοπής $v_c = 24 \text{ m/min}$ και πρόωση $f = 0,3 \text{ mm/rev}$.



Σχήμα 3-2: Ενδεικτικές εικόνες των κοπτικών ακμών Α) $N = 1$ Οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 10$ Οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 20$ Οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής Δ) $N = 1$ Οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Ε) $N = 10$ Οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, ΣΤ) $N = 20$ Οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

3.3 Πειραματικός Εξοπλισμός

3.3.1 Ενισχυτής Φόρτισης 5019A

3.3.1.1 Περιγραφή

Με πιεζοηλεκτρικά δυναμόμετρα ή πλάκες δύναμης, είναι δυνατόν να μετρηθεί η δύναμη και η ροπή χρησιμοποιώντας αυτόν τον γενικό εργαστηριακό ενισχυτή φόρτισης (Σχήμα 3-3). Όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο σε έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό φορτίο που αλλάζει άμεσα σε σχέση με αυτό το φορτίο. Αυτό το σήμα φόρτισης ενισχύεται και μετατρέπεται σε αναλογική τάση εξόδου.

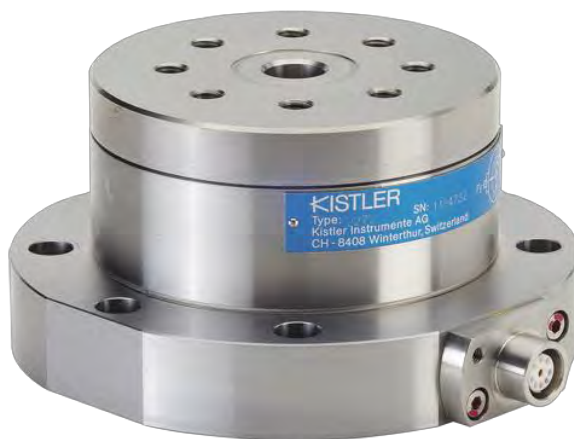
Όταν απαιτείται μεγάλο εύρος μέτρησης ή καλή ποιότητα σήματος, αυτό το όργανο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για γενικές μετρήσεις δύναμης, μετρήσεις δύναμης κοπής με δυναμόμετρα Kistler και μετρήσεις δύναμης τροχού σε βάσεις δοκιμών ελαστικών. Οι εφαρμογές για τον ενισχυτή φόρτισης τύπου 5019A μπορούν να βρεθούν στην έρευνα και την ανάπτυξη.



Σχήμα 3-3: Ενισχυτής φορτίου 5019A.

3.3.2 Δυναμόμετρο Quartz 4 συστατικών τύπου 9272

Πρόκειται για ένα δυναμόμετρο με τέσσερα στοιχεία που μπορεί να μετρήσει τις τρεις ορθογώνιες συνιστώσες μίας δύναμης και μια ροπή M_z (Σχήμα 3-4). Το δυναμόμετρο έχει υψηλή φυσική συχνότητα ως αποτέλεσμα της υψηλής ακαμψίας του. Λόγω της μεγάλης του ανάλυσης, είναι δυνατό να μετρηθούν ακόμη και οι παραμικρές δυναμικές αλλαγές σε ισχυρές δυνάμεις και ροπές. Συμπαγής και αξιόπιστη συσκευή μέτρησης δύναμης πολλαπλών συστατικών που είναι κατάλληλη για μετρήσεις κοπτικής δύναμης διάτρησης [39].



Σχήμα 3-4: Δυναμόμετρο Quartz 4 συστατικών της KISTLER τύπου 9272 [39].

3.3.2.1 Περιγραφή

Ένας αισθητήρας τεσσάρων συστατικών εγκαθίσταται κάτω από μεγάλη προφόρτιση μεταξύ μιας πλάκας βάσης και μιας άνω πλάκας για να σχηματίσει τη δυναμομέτρηση. Τα τέσσερα στοιχεία μετρώνται πρακτικά χωρίς μετατόπιση. Τα εύρη μέτρησης μπορεί να μειωθούν ως αποτέλεσμα συζευγμένων και έκκεντρων φορτίων. Ο αισθητήρας είναι εγκατεστημένος με γείωση-απομόνωση. Κατά συνέπεια, τα ζητήματα βρόχου γείωσης επιλύονται ουσιαστικά. Το δυναμόμετρο είναι αδιαπέραστο από τη σκουριά και θωρακισμένο από την επίδραση του νερού και τους ψυκτικούς παράγοντες. Ανταποκρίνεται στο επίπεδο προστασίας IP 67 όταν χρησιμοποιείται με το καλώδιο σύνδεσης Τύπου 1677A5/1679A5 [39].

3.3.3 Σύστημα Απόκτησης Δεδομένων για Μέτρηση Δύναμης της KISTLER τύπου 5697A

Χρησιμοποιώντας έναν ή περισσότερους αισθητήρες και δυναμόμετρα εξαρτημάτων, το σύστημα συλλογής δεδομένων (DAQ) (**Σχήμα 3-5**) διασυνδέει και ελέγχει τους ενισχυτές φόρτισης και τους ρυθμιστές σήματος γενικά, και τις εφαρμογές δύναμης κοπής. Το πρόγραμμα DynoWare διαχειρίζεται το σύστημα, το οποίο συνδέεται μέσω παράλληλης θύρας [40].

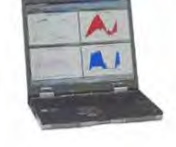


Σχήμα 3-5: Σύστημα Απόκτησης Δεδομένων KISTLER τύπου 5697A [40].

3.3.3.1 Περιγραφή

Το πλαίσιο σύνδεσης και το πρόγραμμα DynoWare αποτελούν το DAQ-System για το DynoWare. Το κουτί σύνδεσης μπορεί να φιλοξενήσει έως δύο πολυκάναλους ενισχυτές φόρτισης και, επομένως, έως δύο αλυσίδες μέτρησης. Τα δεδομένα αναλογικής εξόδου ψηφιοποιούνται με χρήση μετατροπέα A/D 16 bit. Το σύστημα συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω παράλληλης θύρας και το κουτί σύνδεσης ελέγχει τον ενισχυτή φόρτισης ή το μετατροπέα σήματος χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο RS-232C. Οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε ένα απλό στη χρήση σύστημα συλλογής δεδομένων με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας [40].

Στο **Σχήμα 3-6** μπορούμε να δούμε μία αναπαράσταση μίας τυπικής αλυσίδας σύνδεσης με σύστημα DAQ παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

					
Dynamometer	Connection cable, high impedance	Charge amplifier	Connecting cable	DAQ system	Notebook (from customer side) with DynoWare
Type 9272	Type 16xx	Type 5080A	Type 1700A111A2 Type 1200A27	Type 5697A1	

Σχήμα 3-6: Τυπική αλυσίδα σύνδεσης με σύστημα DAQ τύπου 5697A1 [40].

3.3.3.2 Λογισμικό DynoWare

Το DynoWare είναι το πρόγραμμα λογισμικού πίσω από το σύστημα μέτρησης. Συλλαμβάνει τα σήματα από τους αισθητήρες και τα δυναμόμετρα, τα μετατρέπει σε αναγνώσιμες πληροφορίες και εξάγει τα αποτελέσματα σε εμφανίσιμη μορφή. Το DynoWare είναι σε θέση να ελέγχει τους ενισχυτές φόρτισης ή τα κλιματιστικά σήματος από απόσταση [40].

3.3.4 Στερεοσκόπιο της Leica τύπου WILD M3Z/ κάμερα Canon EOS 600D

Το μικροσκόπιο Wild M3Z StereoZoom συνοδεύεται από διόφθαλμη κεφαλή, προσοφθάλμιο φακό 10x, αντικειμενικό φακό 1,5x και βάση μεταδιδόμενου φωτός με καθρέφτη. Το εύρος μεγέθυνσης είναι 6,5X έως 40X.

Αυτό το στερεοσκόπιο (Σχήμα 3-7) χρησιμοποιήθηκε για τη παρατήρηση και αξιολόγηση της ποιότητας της επιφάνειας των κοπτικών ακμών και συγκεκριμένα δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα στις δύο κύριες κόψεις των κοπτικών εργαλείων. Στη συνέχεια με τη χρήση της κάμερας Canon EOS 600D (Σχήμα 3-8) έγινε λήψη των εικόνων που αποτυπώνουν τις κύριες κόψεις των κοπτικών εργαλείων και με τη χρήση του πακέτου επεξεργασίας εικόνων Fiji πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες μετρήσεις.



Σχήμα 3-7: Μικροσκόπιο Leica τύπου Wild M3Z StereoZoom.



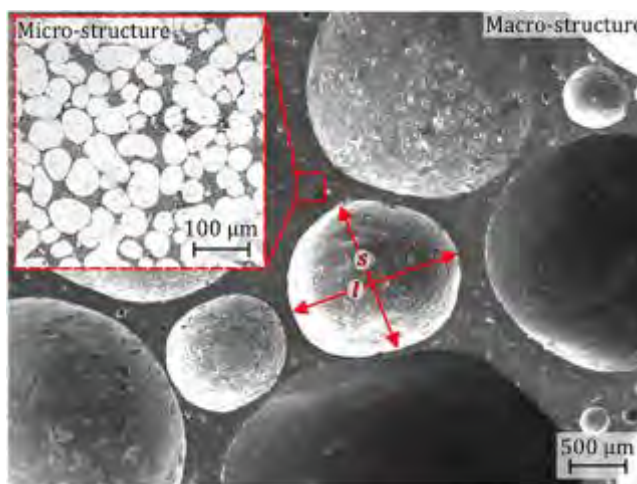
Σχήμα 3-8: Κάμερα Canon EOS 600D.

3.4 Αφρός Αλουμινίου

Ο αφρός αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές διάτρησης κατασκευάστηκε μέσω υγρής μεταλλουργίας χρησιμοποιώντας ως υλικό μήτρας το AlSi10, με προσθήκη 1,3

κ. β. % Ca (για αύξηση του ιξώδους) και 2 κ. β. % σωματίδια TiH_2 (ως αφριστικός παράγοντας) ενώ ταυτόχρονα το τήγμα αναδεύονταν σε 620-650 °C. Οι πλάκες που δημιουργήθηκαν από τον αποκτηθέντα αφρό Al, είχαν μέσο πορώδες περίπου 70% και πάχος 30 mm. Το μέσο μέγεθος των πόρων είναι 2,31 mm [41].

Το Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε. εμφανίζει φωτογραφίες του παραγόμενου αφρού που λήφθηκαν κάτω από οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, εμφανίζοντας τόσο τη μικροδομή και τη μακροδομή του, μετά από προσεκτική λείανση και στίλβωση για την προστασία των κυψελών [41].



Σχήμα 3-9: Μακροδομή και μικροδομή του παραγόμενου πορώδους Al [41].

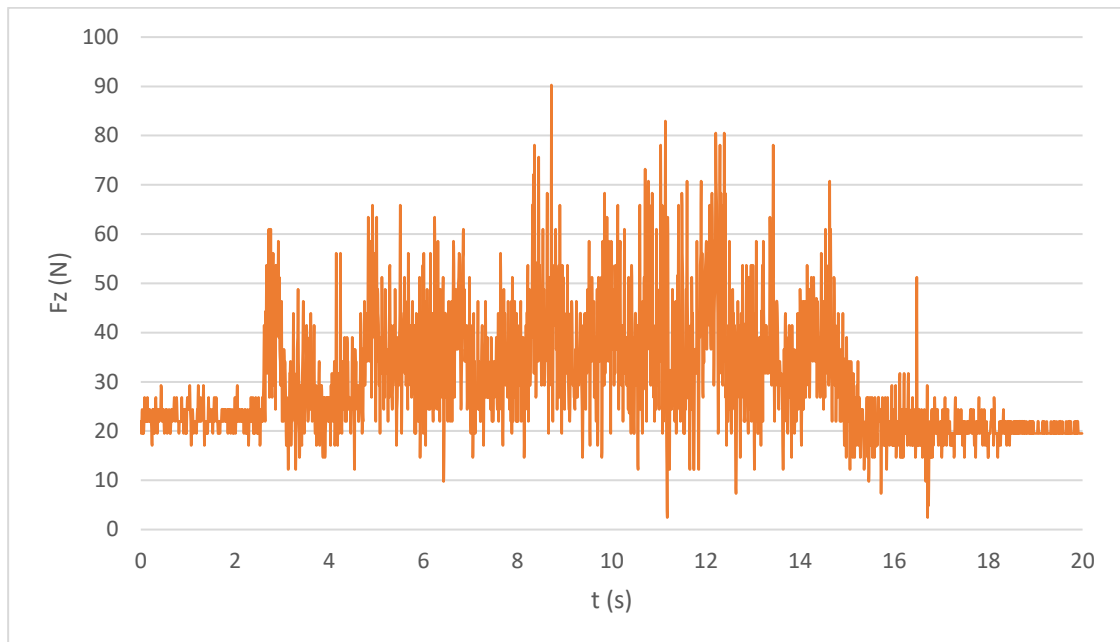
Όταν παρατηρούνται σε μεγαλύτερη κλίμακα, οι πόροι έχουν μια δομή σχεδόν εντελώς κλειστών κυττάρων και είναι ελλειψοειδείς. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, είναι δυνατό να δούμε την ευτηκτική δομή και το πρωτεύον στερεό διάλυμα - Δενδρίτες κόκκων α -Al. Η ευτηκτική αποτελείται από αραιοκατανεμημένες, μετρίως χονδροειδείς πλάκες πυριτίου σε μια μήτρα Al (φάση α). Τόσο το Ca όσο και το Ti που απελευθερώνονται από τον παράγοντα αφρισμού παραμένουν στο τήγμα Al-Si και κατακρημνίζονται ως Al_4Ca και $TiAl_3$ αντίστοιχα. Τα ιζήματα θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένα σε όλο τον όγκο του πορώδους μετάλλου επειδή δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι είναι εντοπισμένα πάνω ή κοντά στην επιφάνεια του πόρου [41].

3.5 Ανάκτηση Δεδομένων

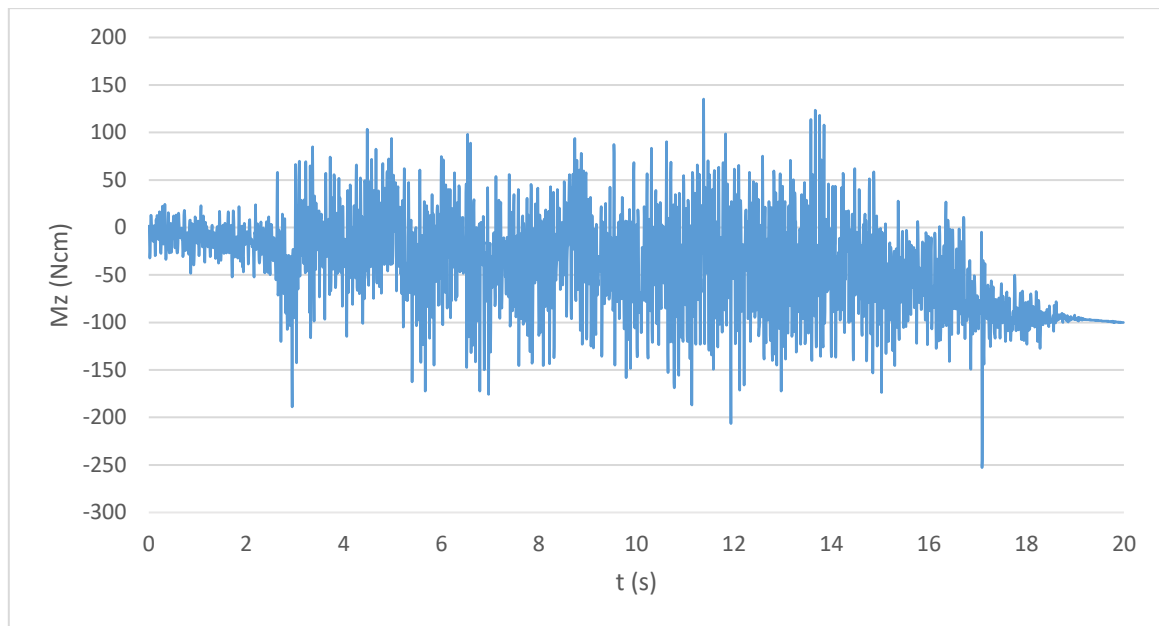
3.5.1 Δημιουργία του διαγράμματος F_z -t και M_z -t

Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων της Αξονικής Δύναμης και της Ροπής, συναρτήσει του χρόνου, τα δεδομένα της δυναμομέτρησης που ανακτήθηκαν με το

πρόγραμμα DynoWare, εισήχθησαν στο πρόγραμμα Microsoft Excel και με τη χρήση μιας απλής εντολής του λογισμικού, κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα που στον οριζόντιο άξονα είχαν τον Χρόνο (T) σε εύρος των 20 δευτερολέπτων και στον κατακόρυφο άξονα την Αξονική Δύναμη (Fz) και τη Ροπή Στρέψης (Mz) αντίστοιχα. Αυτά τα διαγράμματα μπορούν να φανούν στο **Σχήμα 3-9** και **Σχήμα 3-11** αντίστοιχα.



Σχήμα 3-10: Γραφική αναπαράσταση ενδεικτικής μέτρησης της Δύναμης συναρτήσει του χρόνου.

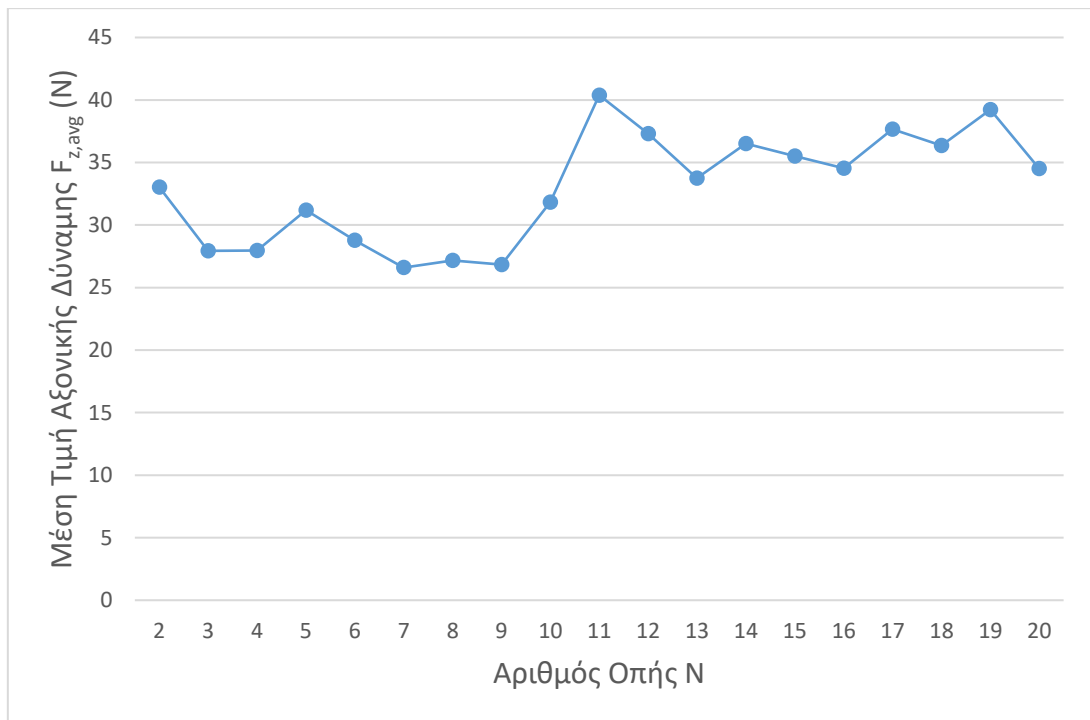


Σχήμα 3-11: Γραφική αναπαράσταση ενδεικτικής μέτρησης της Ροπής συναρτήσει του χρόνου.

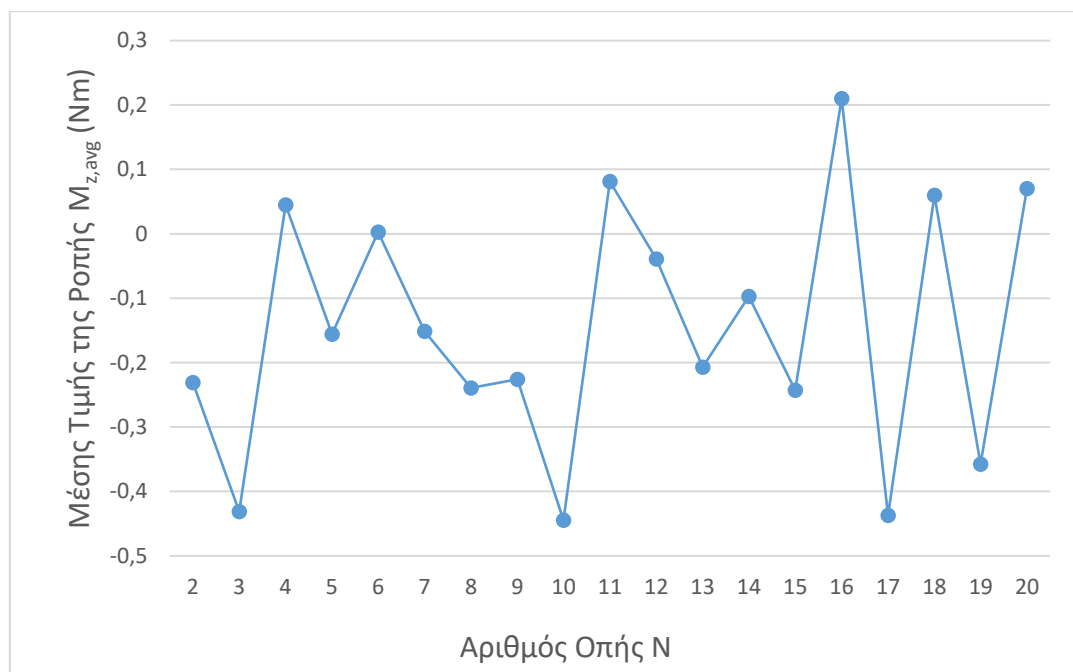
3.5.2 Γραφήματα $F_{z,avg}$ -N και $M_{z,avg}$ -N

Στη συνέχεια, διαπιστώθηκε πως από το εύρος των 20 δευτερολέπτων, στα δευτερόλεπτα 2 έως 7, φαίνονταν η μεγαλύτερη και ακριβέστερη πληροφορία όσον αφορά τις τιμές της Δύναμης και της Ροπής, καθώς εκεί αποκλείονταν οι νεκροί χρόνοι εισόδου και εξόδου του κοπτικού εργαλείου στο υλικό καθώς και άλλες ανακρίβειες. Επομένως, για κάθε οπή, με συγκεκριμένες παραμέτρους κοπής, υπολογίστηκε η Μέση τιμή της Αξονικής Δύναμης και της Ροπής στο εύρος 2 έως 7 δευτερολέπτων όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3-12** και στο **Σχήμα 3-13** αντίστοιχα. Η καταγραφή των δεδομένων ξεκίνησε από την 2^η οπή, καθώς με όλα τα κοπτικά εργαλεία, πραγματοποιήθηκε πρώτα μία δοκιμαστική οπή.

Έπειτα, αυτές οι τιμές συγκεντρώθηκαν σε έναν πίνακα, από τον οποίο έπειτα υπολογίστηκαν οι Μέσες Τιμές Δύναμης και Ροπής, για κάθε συνθήκη κοπής και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3-12: Γραφική αναπαράσταση της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης κάθε οπής, για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev, συναρτήσει του αριθμού των οπών.

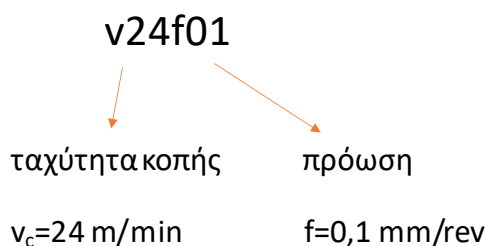


Σχήμα 3-13: Γραφική αναπαράσταση της Μέσης Τιμής της Ροπής κάθε οπής, για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev, συναρτήσει του αριθμού των οπών.

Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό έχουν συμπεριληφθεί τα πειραματικά ευρήματα. Μία τυπική κωδικοποίηση που έγινε για τις συνθήκες κοπής φαίνεται στο **Σχήμα 4-1**. Ξεχωριστά, για κάθε πειραματική δοκιμή που έγινε για κάθε σπή, όπως περιεγράφηκε παραπάνω, τα δεδομένα αντλήθηκαν με τη μορφή πινάκων και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν σε κοινά διαγράμματα έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν.



Σχήμα 4-1: Τυπική κωδικοποίηση των συνθηκών κοπής.

4.2 Αποτελέσματα Μετρήσεων της Δύναμης για όλες τις συνθήκες κοπής

Στον **Πίνακας 4-1** και **Πίνακας 4-2** είναι συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα κάθε δυναμομέτρησης για όλες τις σπές και όλες τις συνθήκες κοπής. Όπως έχει αναφερθεί, η τιμή κάθε κελιού του πίνακα είναι η μέση τιμή της δύναμης για το εύρος μέτρησης 2 έως 7 δευτερολέπτων του κάθε πειράματος. Σε αυτό το πίνακα έχει συμπεριληφθεί και η μέση τιμή της δύναμης για κάθε συνδυασμό των συνθηκών κοπής, μετά το πέρας και των 20 σπών. Παρακάτω φαίνονται και τα διαγράμματα αυτών των τιμών τα οποία χρησιμεύουν στη καλύτερη κατανόηση της πορείας των μετρήσεων. Το διάγραμμα των Μέσων Τιμών της Ροπής έχει παραληφθεί καθώς δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση της με την Αξονική Δύναμη, επομένως δεν είναι το αντικείμενο αυτής της εργασίας η εξέλιξη της Ροπής με τον αριθμό σπών. Ωστόσο, αξίζει να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της Μέσης Τιμής της Ροπής σε σχέση με τις συνθήκες κοπής, όπως αυτό γίνεται στο κεφάλαιο **4.2.3**.

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα μετρήσεων της Αξονικής Δύναμης για όλες τις οπές για κάθε συνθήκη κοπής.

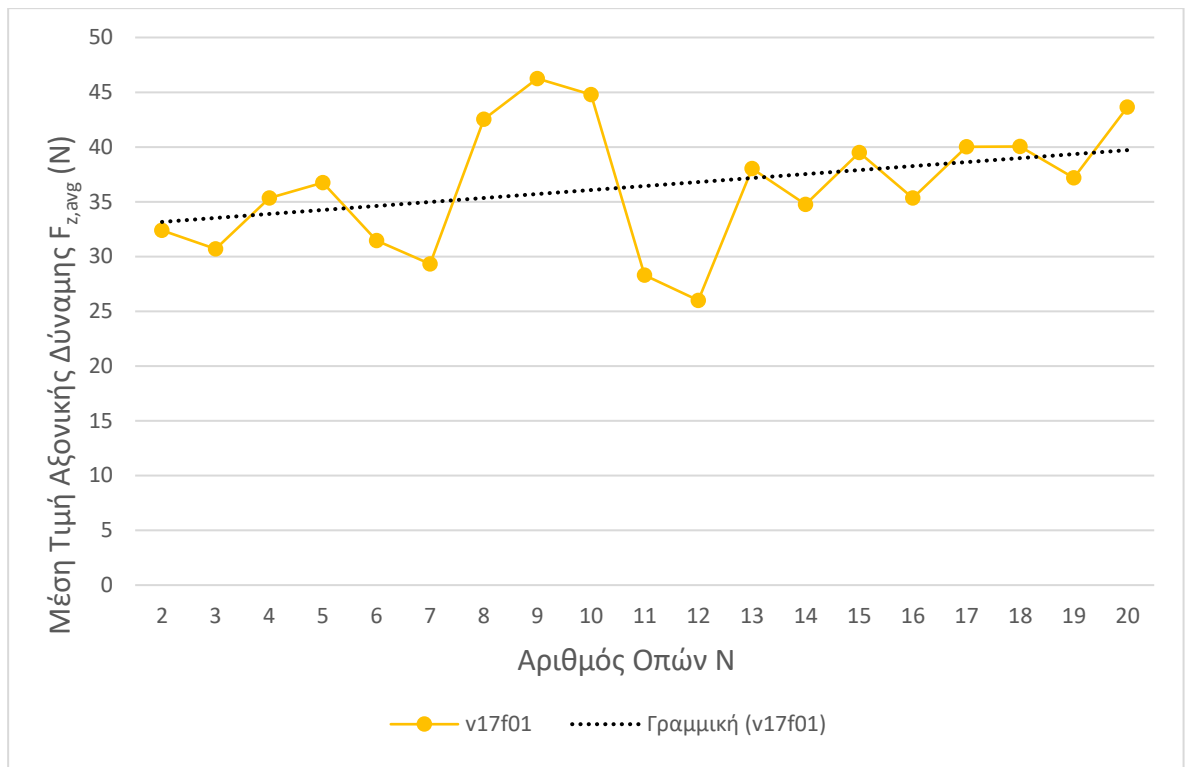
Οπή N/Fz	v24f01	v24f02	v24f03	v17f01	v17f02	v17f03
2	33,0	31,9	22,2	32,4	32,3	52,7
3	28,0	34,7	36,3	30,7	37,7	45,2
4	28,0	33,8	34,7	35,3	38,0	47,7
5	31,2	35,9	30,2	36,7	36,8	41,6
6	28,8	36,3	29,8	31,5	38,3	39,4
7	26,6	35,1	32,1	29,3	40,4	43,6
8	27,2	32,0	25,7	42,5	42,4	43,0
9	26,8	38,5	31,4	46,3	41,8	39,8
10	31,8	40,4	30,6	44,8	41,0	35,2
11	40,4	41,3	42,6	28,3	48,4	37,1
12	37,3	45,1	34,7	26,0	45,3	40,0
13	33,7	54,9	34,0	38,0	35,7	41,4
14	36,5	54,9	36,6	34,8	40,8	45,4
15	35,5	57,6	33,6	39,5	35,0	42,1
16	34,5	51,7	38,4	35,3	33,2	49,2
17	37,7	65,1	40,0	40,0	40,1	53,6
18	36,4	53,0	35,8	40,1	40,7	56,0
19	39,2	42,8	45,0	37,2	35,6	60,8
20	34,5	45,9	40,1	43,6	35,4	49,1
Μέση Τιμή Δύναμης (N)	33,0	43,7	34,4	36,4	38,9	45,4

Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα μετρήσεων της Ροπής Στέψης για όλες τις οπές για κάθε συνθήκη κοπής.

Οπή N/Mz	v24f01	v24f02	v24f03	v17f01	v17f02	v17f03
2	-0,231	-0,109	-0,028	-0,950	-0,337	0,046
3	-0,431	-0,155	-0,300	0,228	-0,315	-0,308
4	0,045	-0,350	0,257	-0,218	0,279	0,152
5	-0,156	-0,224	-0,031	-0,355	-0,602	0,506
6	0,003	-0,204	-0,273	-0,147	-0,064	-0,074
7	-0,151	-0,216	-0,142	-0,546	-0,128	-0,116
8	-0,239	0,092	0,117	0,277	-0,256	-0,416
9	-0,226	-0,100	-0,468	0,065	0,271	-0,260
10	-0,445	0,184	-0,175	-0,396	0,368	0,290
11	0,081	-0,385	-0,244	-0,095	0,268	-0,103
12	-0,039	-0,421	-0,144	-0,182	0,118	0,072
13	-0,207	0,423	-0,124	-0,355	-0,309	-0,017
14	-0,097	0,423	-0,276	0,092	0,132	0,197
15	-0,243	-0,096	-0,134	-0,239	-0,237	-0,475
16	0,210	0,064	0,035	-0,131	-0,419	-0,180
17	-0,437	-0,422	0,017	0,236	-0,146	-0,688
18	0,060	-0,029	0,042	-0,317	-0,048	0,099
19	-0,358	-0,116	0,193	-0,303	-0,326	-0,614
20	0,070	-0,151	-0,073	-0,118	0,002	-1,028
Μέση Τιμή Ροπής (Nm)	-0,147	-0,094	-0,092	-0,182	-0,092	-0,153

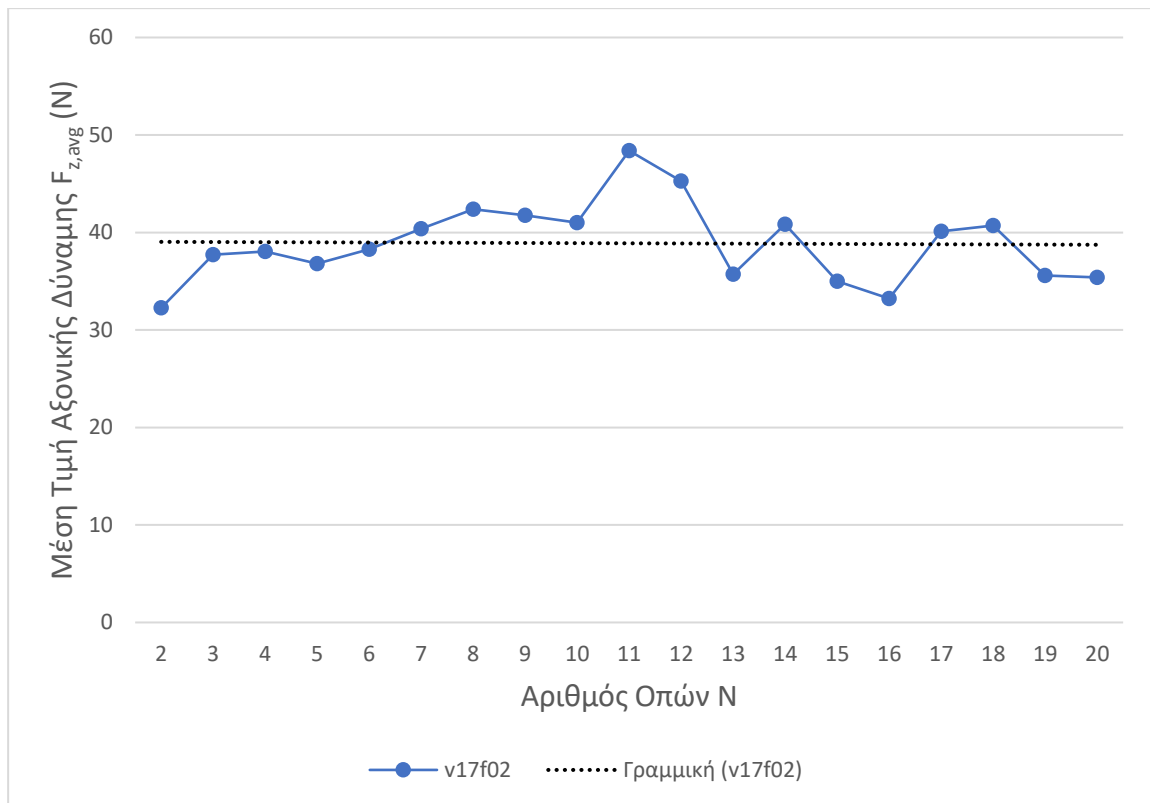
4.2.1 Διαγράμματα Μέσων Τιμών της Αξονικής Δύναμης $F_{z,avg}$ -N

Στο **Σχήμα 4-2** παρουσιάζεται η πορεία της Μέσης Αξονικής Δύναμης για κάθε οπή, για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev, καθώς και έχει συμπεριληφθεί μία γραμμική γραμμή τάσης. Φαίνεται πως η τιμή της Δύναμης αναμένεται να αυξηθεί για τις επόμενες μετρήσεις.



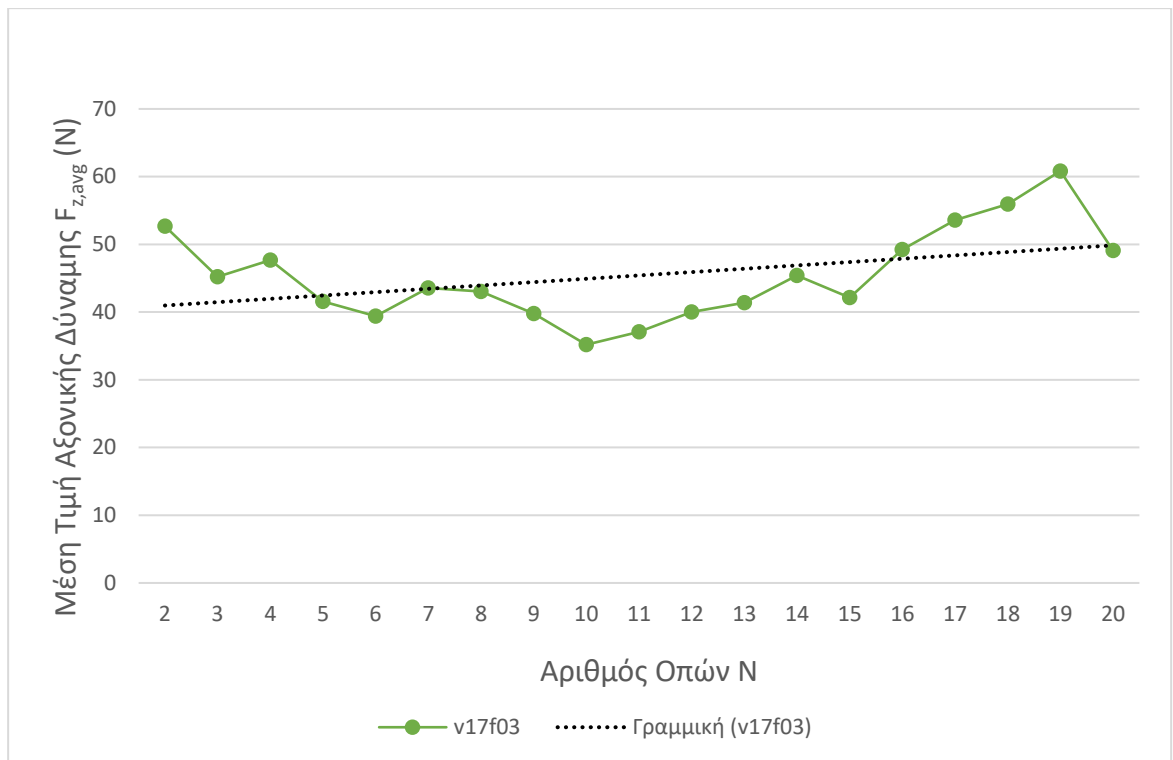
Σχήμα 4-2: Διάγραμμα της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev.

Στο **Σχήμα 4-3** παρουσιάζεται η πορεία της Μέσης Αξονικής Δύναμης για κάθε οπή, για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev, καθώς και έχει συμπεριληφθεί μία γραμμική γραμμή τάσης η οποία φαίνεται να παραμένει σταθερή.



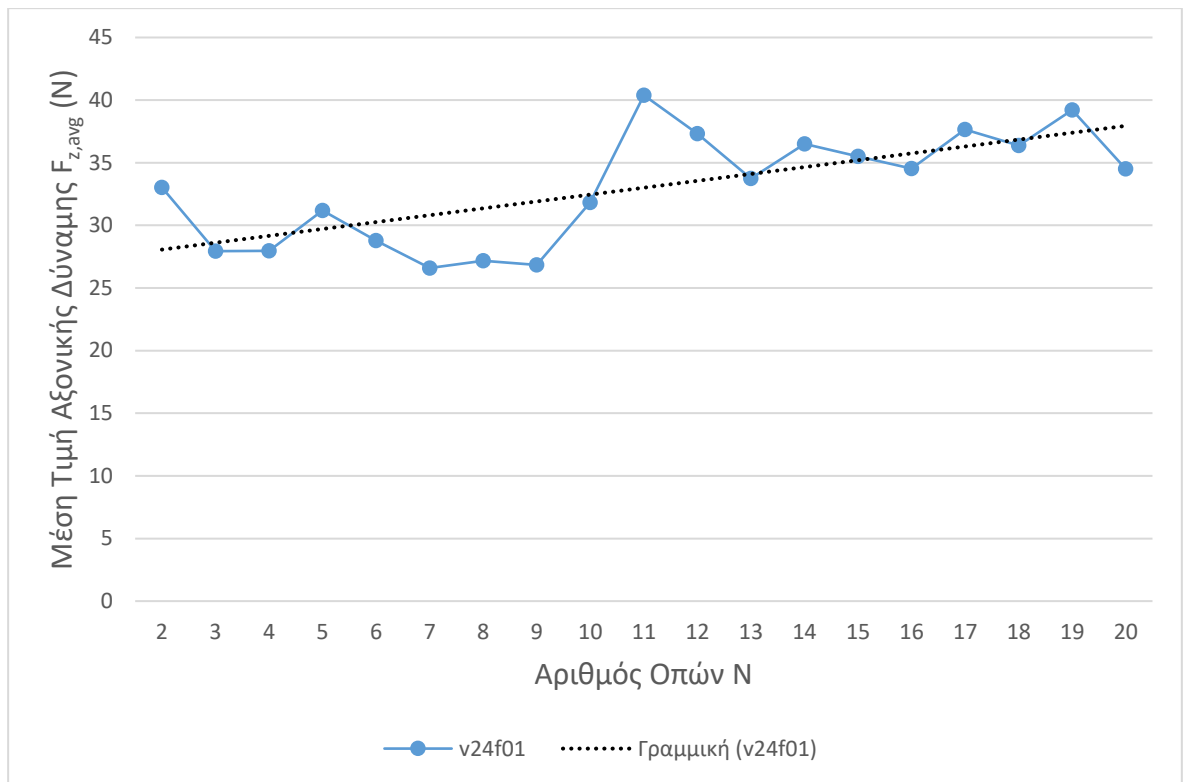
Σχήμα 4-3: Διάγραμμα της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev.

Στο **Σχήμα 4-4** παρουσιάζεται η πορεία της Μέσης Αξονικής Δύναμης για κάθε σπή, για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev, καθώς και έχει συμπεριληφθεί μία γραμμική γραμμή τάσης. Φαίνεται πως η τιμή της Δύναμης παραμένει σταθερή.



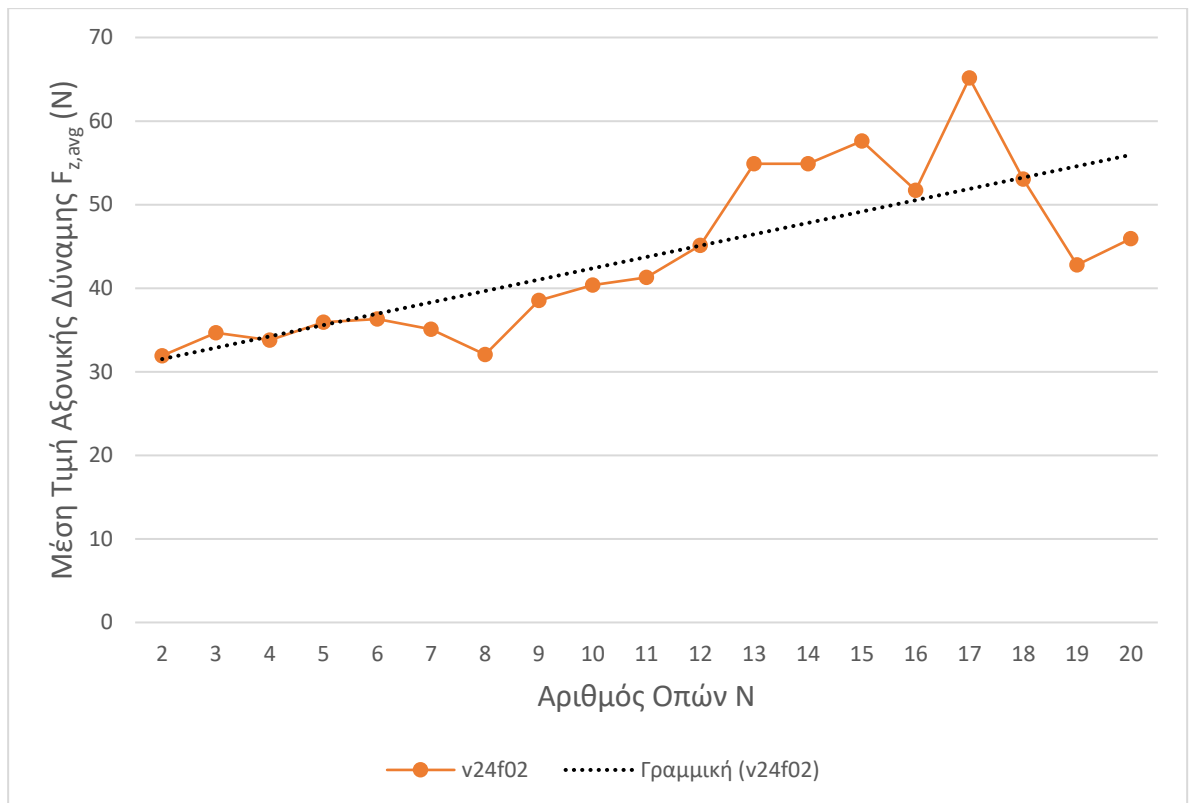
Σχήμα 4-4: Διάγραμμα της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$.

Στο **Σχήμα 4-5** παρουσιάζεται η πορεία της Μέσης Αξονικής Δύναμης για κάθε σπή, για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,1 \text{ mm/rev}$, καθώς και έχει συμπεριληφθεί μία γραμμική γραμμή τάσης. Φαίνεται πως η τιμή της Δύναμης αναμένεται να αυξηθεί για τις επόμενες μετρήσεις.



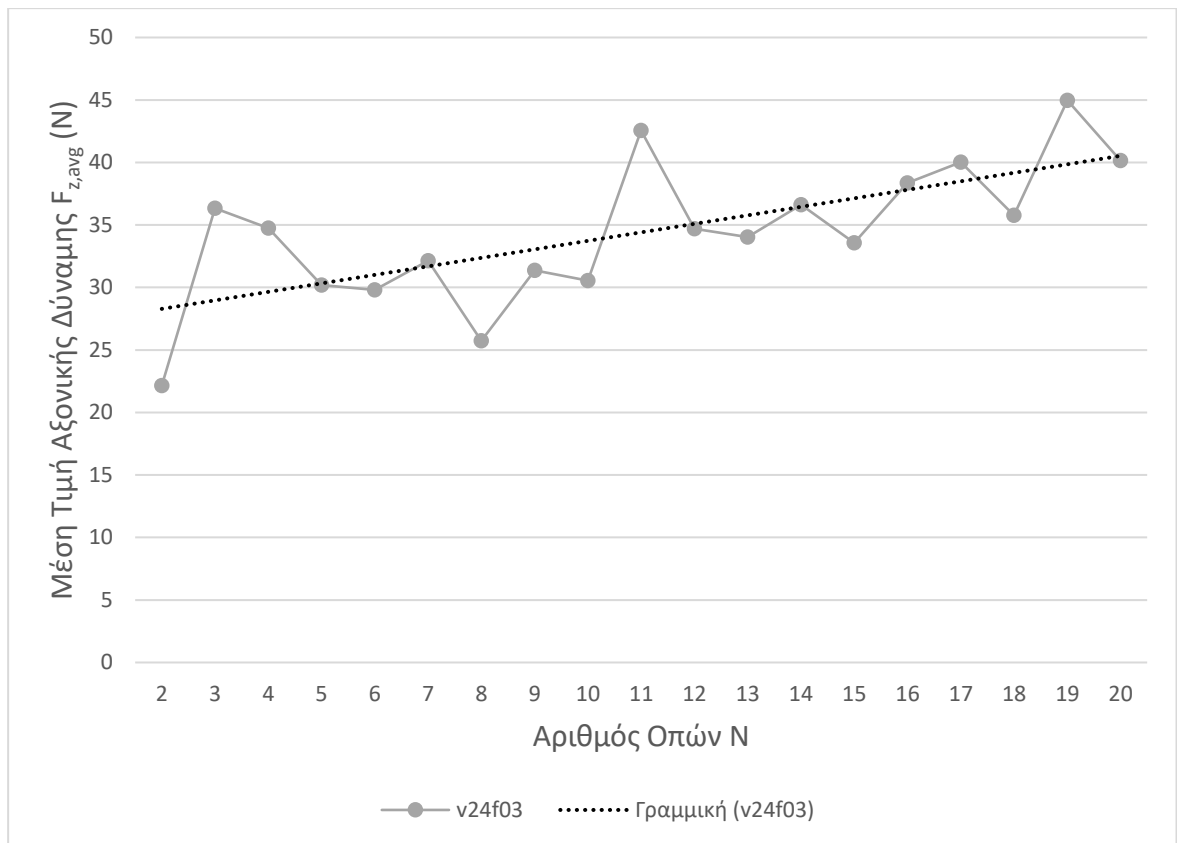
Σχήμα 4-5: Διάγραμμα της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev.

Στο **Σχήμα 4-6** παρουσιάζεται η πορεία της Μέσης Αξονικής Δύναμης για κάθε οπή, για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev, καθώς και έχει συμπεριληφθεί μία γραμμική γραμμή τάσης. Φαίνεται πως η τιμή της Δύναμης αναμένεται να αυξηθεί για τις επόμενες μετρήσεις.



Σχήμα 4-6: Διάγραμμα της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev.

Στο **Σχήμα 4-7** παρουσιάζεται η πορεία της Μέσης Αξονικής Δύναμης για κάθε οπή, για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev, καθώς και έχει συμπεριληφθεί μία γραμμική γραμμή τάσης. Φαίνεται πως η τιμή της Δύναμης αναμένεται να αυξηθεί για τις επόμενες μετρήσεις.



Σχήμα 4-7: Διάγραμμα της Μέσης Τιμής της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$.

4.2.1.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις βλέπουμε αυξομειώσεις στις Μέσες Τιμές των Αξονικών Δυνάμεων και αυτό οφείλεται στη τυχαία δομή του αφρού αλουμινίου, καθώς πρόκειται για ένα υλικό με πορώδη δομή που στη παρούσα εργασία το μέσο πορώδες του τεμαχίου βρίσκεται στο 70% του συνολικού όγκου του. Επιπλέον, ο αφρός αλουμινίου αποτελούνταν και από 10% κ. β. πυρίτιο (Si) το οποίο είναι διασκορπισμένο σε όλο τον όγκο του τεμαχίου και τα σωματίδια του οποίου έχουν μεγάλη σκληρότητα. Άρα, σε κάποια σημεία το υλικό εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση στη διάτρηση οδηγώντας έτσι στην ανάπτυξη μεγαλύτερων Αξονικών Δυνάμεων.

Επομένως, οι διακυμάνσεις αυτές είναι απολύτως φυσιολογικές καθώς στις διαμπερείς οπές που πραγματοποιήθηκαν δεν υπήρχε η δυνατότητα πρόβλεψης της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου, άρα όταν το κοπτικό εργαλείο εισχωρούσε σε έναν πόρο, η αξονική δύναμη μειώνονταν σημαντικά, μειώνοντας έτσι τη συνολική Μέση Τιμή της Αξονικής Δύναμης, ενώ όταν εισχωρούσε σε μία περιοχή με αυξημένη σκληρότητα υλικού τότε η αξονική δύναμη αυξάνονταν, αυξάνοντας έτσι τη συνολική Μέση Τιμή της Αξονικής Δύναμης.

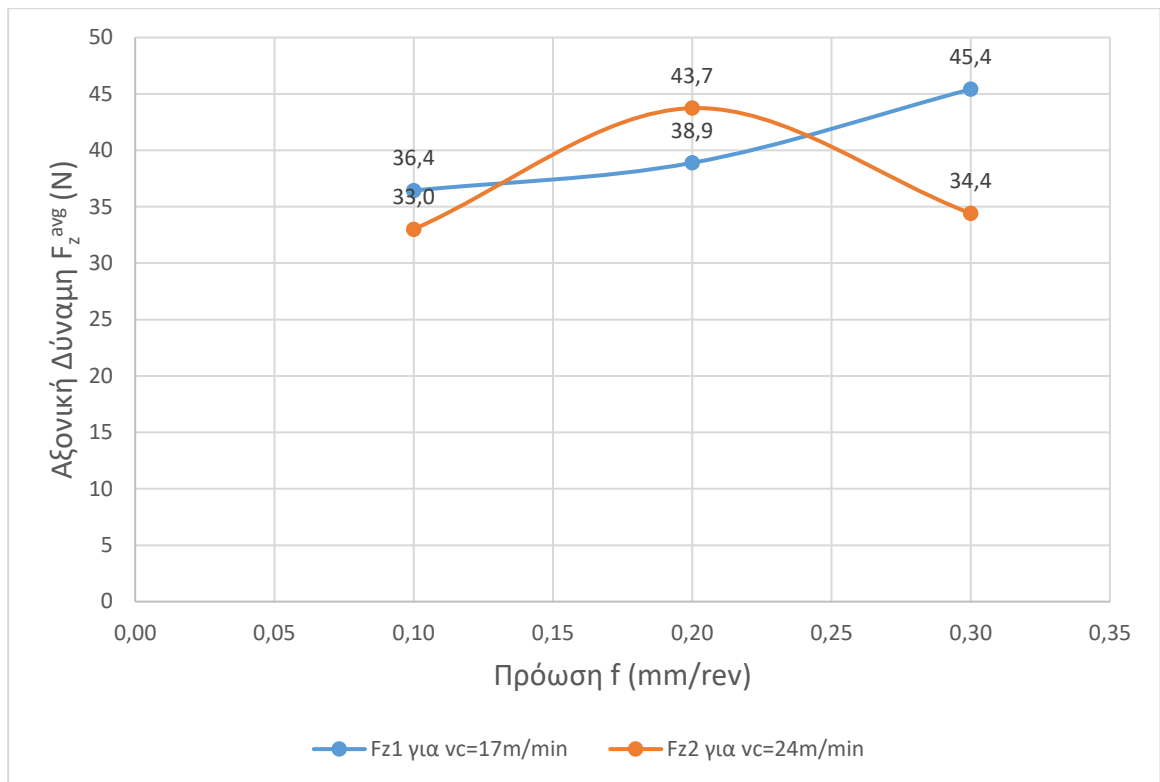
Επίσης, το απόβλιττο της διάτρησης που πραγματοποιήθηκε είναι ασυνεχές (τρίμματα), άρα αναμένονται διακυμάνσεις στην αξονική δύναμη.

Ένας ακόμα λόγος για την αρχική μείωση της Μέσης Τιμής της Δύναμης Κοπής, που παρατηρείται στα περισσότερα από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι η δημιουργία ψευδόκοψης. Είναι γνωστό πως σε μικρές ταχύτητες κοπής, όπως αυτές που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, είναι σύνηθες φαινόμενο η δημιουργία ψευδόκοψης, καθώς τα επάλληλα στρώματα του υλικού του τεμαχίου, προσκολλώνται στην επιφάνειες του εργαλείου. Ένας λόγος για τον οποίο εμφανίζεται ψευδόκοψη στις πειραματικές δοκιμές, είναι το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η μήτρα του αφρού αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε, έχει περιεκτικότητα 90% κ. β. σε αλουμίνιο. Το αλουμίνιο είναι «μαλακό» υλικό, αλλά εμφανίζει και μεγάλη αντιδραστικότητα με το υλικό του κοπτικού εργαλείου (HSS) επομένως, είναι εύκολο να προσκολληθεί στις κύριες κοπτικές ακμές και να δημιουργήσει ψευδόκοψη. Ο σχηματισμός της ψευδόκοψης λοιπόν, αυξάνει τη γωνία του αποβλίττου γεγονός που συνεπάγεται τη μείωση της δύναμης κοπής, άρα και της αξονικής δύναμης. Καθώς όμως αυξάνεται ο Αριθμός Οπών, η ψευδόκοψη ενδεχομένως να απομακρύνεται, αφού κάποια στιγμή όταν αποκτήσει ένα συγκεκριμένο μέγεθος απομακρύνεται από τις κύριες κοπτικές ακμές, άρα εμφανίζεται πάλι αύξηση στη Μέση Αξονική Δύναμη.

Συνεπώς, έτσι αιτιολογείται η αρχική μείωση της Μέσης Αξονικής Δύναμης στις περισσότερες περιπτώσεις και έπειτα η αύξηση της, όπως άλλωστε εμφανίζουν και προβλέπουν όλες οι γραμμές τάσεων.

4.2.2 Διαγράμματα Αξονικής Δύναμης F_z^{avg} - f

Στο **Σχήμα 4-8** φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των Μέσων Τιμών της Αξονικής Δύναμης από το σύνολο των 20 οπών όπως αυτές φαίνονται και στη τελευταία γραμμή του **Πίνακας 4-1**. Αυτές ταξινομήθηκαν με βάση τη ταχύτητα κοπής (v_c), ενώ στον οριζόντιο άξονα τοποθετήθηκε η πρόωση. Για να γίνει η σύγκριση των Αξονικών Δυνάμεων, σε κάθε συνθήκη κοπής χρησιμοποιήθηκε το **Σχήμα 4-8**.



Σχήμα 4-8: Γραφικές παραστάσεις των συνολικών Μέσων Τιμών της Αξονικής Δύναμης F_z^{avg} συναρτήσει της πρόωσης f , για διαφορετικές ταχύτητες κοπής.

4.2.2.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

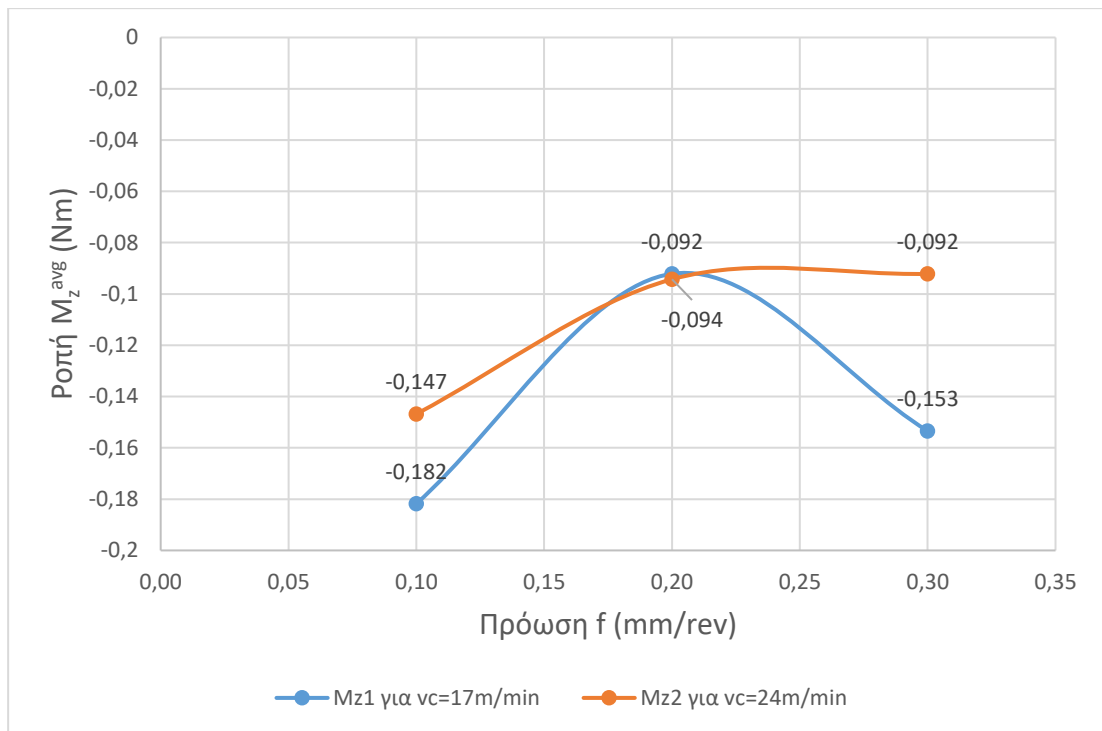
Γενικώς, για τη ταχύτητα κοπής $v_c = 17 \text{ m/min}$ παρατηρείται συνεχή άνοδος στη τιμή της Αξονικής Δύναμης, όσο αυξάνεται και η τιμή της πρόωσης. Το εύρος της Αξονικής Δύναμης για αυτή τη ταχύτητα κοπής είναι από 36,4 N έως 45,4 N. Η αύξηση της δύναμης με την αύξηση της πρόωσης σε αυτή τη περίπτωση είναι αποτέλεσμα της αύξησης του όγκου του απαραμόρφωτου αποβλίττου ανά μονάδα χρόνου. Η ίδια πορεία φαίνεται πως επικρατεί και για τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής $v_c = 24 \text{ m/min}$, για τους ίδιους λόγους, για τιμές της πρόωσης στα 0,1 και 0,2 mm/rev, ενώ για $f = 0,3 \text{ mm/rev}$ έχουμε μία πτώση αυτής της δύναμης σε σχέση με τη προηγούμενη μέτρηση. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στη τυχαιότητα που υπάρχει στη κάθε μέτρηση εξαιτίας της πορώδους δομής, όπως συζητήθηκε παραπάνω. Σε αυτή τη περίπτωση, το εύρος της Αξονικής Δύναμης για $v_c = 24 \text{ m/min}$ κυμαίνεται από 33 N έως 43,7 N, το οποίο είναι χαμηλότερο συγκριτικά με το εύρος της προηγούμενης περίπτωσης.

Σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις, όσο χαμηλότερη είναι η ταχύτητα κοπής τόσο πιο εύκολος είναι ο σχηματισμός ψευδόκοψης, που θα οδηγήσει σε αύξηση της γωνίας του αποβλίττου και έτσι μείωση της δύναμης κοπής άρα και μείωση της Αξονικής Δύναμης. Επομένως, θα ήταν αναμενόμενο για τη μικρότερη ταχύτητα κοπής $v_c = 17 \text{ m/min}$

να αναπτύσσονταν χαμηλότερες Αξονικές Δυνάμεις, για την ίδια πρόωση, από αυτές για τη ταχύτητα κοπής $v_c = 24 \text{ m/min}$. Στα πειραματικά αποτελέσματα αυτό εμφανίζεται μόνο για τη πρόωση $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ όπου η δύναμη παρουσιάζει μία αύξηση 11%. Για τη μέτρηση με $f = 0,1 \text{ mm/rev}$ η F_{z1} παρουσιάζει μία αύξηση 9,4% επί της F_{z2} και για πρόωση $f=0,3 \text{ mm/rev}$ μία αύξηση 24,2% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά, οφείλονται πάλι στη τυχαιότητα της διαδρομής των οπών εξαιτίας της ακανόνιστης δομής των πόρων στο εσωτερικό του αφρού αλουμινίου που υπέστη τη κατεργασία. Επίσης, με τη παρατήρηση των εικόνων από το στερεοσκόπιο, είναι εμφανές πως οι κύριες κόψεις παρουσιάζουν διαφορετικές επικολλήσεις υλικού μεταξύ τους γεγονός που οφείλεται στην πορώδη δομή. Επομένως, έτσι αιτιολογείται η απόκλιση των πειραματικών μετρήσεων της παρούσας εργασίας, από το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στις Αρχές της Κοπής.

4.2.3 Διάγραμμα Ροπής $M_z^{avg} - f$

Στο σχήμα φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις των Μέσων Τιμών της Ροπής από το σύνολο των 20 οπών όπως αυτές φαίνονται και στη τελευταία γραμμή του **Πίνακας 4-2**. Αυτές ταξινομήθηκαν με βάση τη ταχύτητα κοπής (v_c), ενώ στον οριζόντιο άξονα τοποθετήθηκε η πρόωση. Για να γίνει η σύγκριση των Ροπών σε κάθε συνθήκη κοπής χρησιμοποιήθηκε το **Σχήμα 4-9**.



Σχήμα 4-9: Γραφικές παραστάσεις των συνολικών Μέσων Τιμών της Ροπής M_z^{avg} συναρτήσει της πρόωσης f, για διαφορετικές ταχύτητες κοπής.

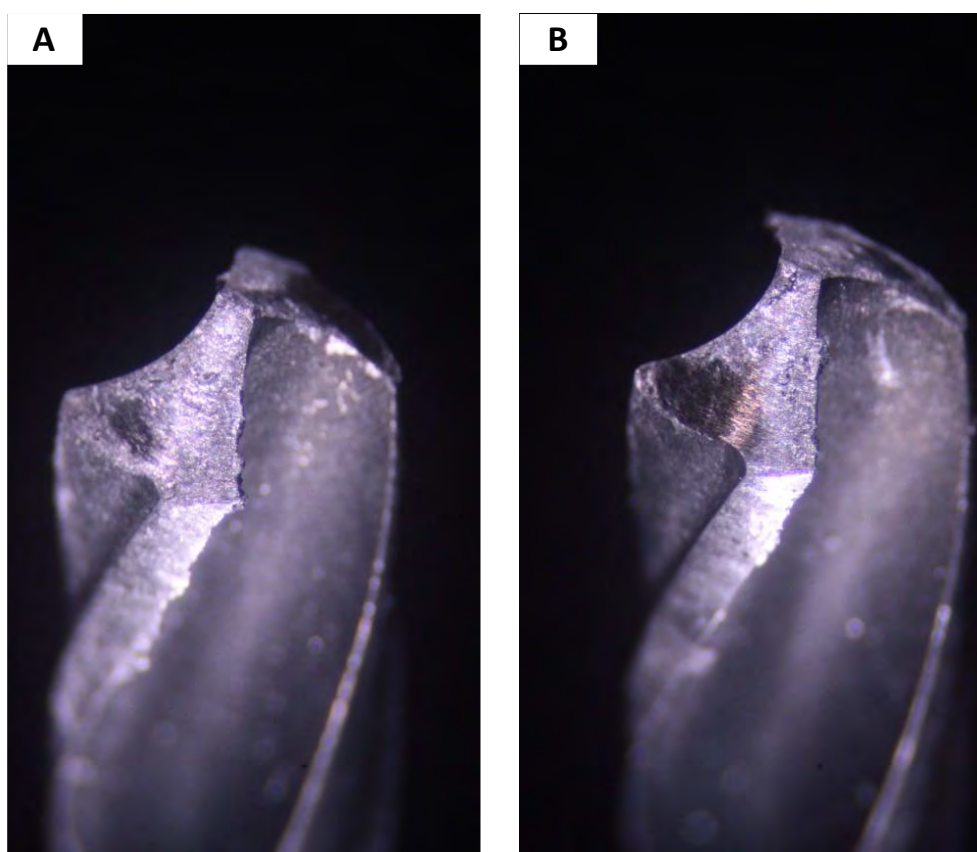
4.2.3.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Η τιμή της Ροπής M_z που μετρήθηκε, εξαρτάται από τη Δύναμη Κοπής. Όπως φάνηκε στο **Σχήμα 4-9**, κατά τις δοκιμές διάτρησης υπήρχε η δημιουργία ψευδόκοψης στις κύριες κοπτικές ακμές. Οι κύριες κοπτικές ακμές όμως, είχαν διαφορετικές επικολλήσεις υλικού στην επιφάνειά τους, επομένως η αντίσταση που έβλεπε κάθε κόψη ήταν διαφορετική, εξηγώντας έτσι τις διαβαθμίσεις που υπήρχαν στις τιμές της ροπής. Όσο υπήρχε παρουσία ψευδόκοψης, τόσο αυξανόταν η γωνία του αποβλίττου, άρα τόσο μειωνόταν η Δύναμη Κοπής. Παρατηρείται ότι για $v_c = 24 \text{ m/min}$ με την αύξηση της πρόωσης, έχουμε ελάττωση της τιμής της Ροπής. Το εύρος της Ροπής για αυτή τη ταχύτητα κοπής είναι $-0,147 \text{ Nm}$ έως $-0,092 \text{ Nm}$, ενώ για $v_c = 17 \text{ m/min}$ από $-0,182 \text{ Nm}$ έως $-0,092 \text{ Nm}$. Άρα φαίνεται ότι για την ίδια πρόωση, η μεγαλύτερη Ροπή παράγονταν από τη χαμηλότερη ταχύτητα κοπής άρα εκεί είχαμε και τις μεγαλύτερες Δυνάμεις Κοπής. Έμμεσα, θα μπορούσε να γίνει η πρόβλεψη αυτής της συμπεριφοράς και από το διάγραμμα των Αξονικών Δυνάμεων, **Σχήμα 4-8**, διότι είναι γνωστό πως στις περισσότερες περιπτώσεις η Αξονική Δύναμη είναι ανάλογη της

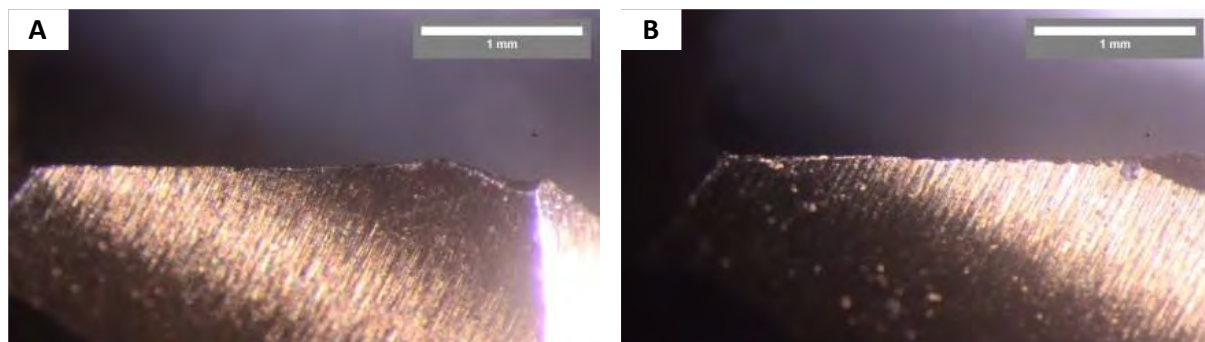
Δύναμη Κοπής. Και σε αυτές τις μετρήσεις διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο η τυχαιότητα της πορώδους δομής.

4.2.4 Φθορά Κοπτικών Εργαλείων

Στα παρακάτω σχήματα μπορούμε να παρατηρήσουμε τη ποιότητα των κύριων κοπτικών ακμών. Μετά από τις πρώτες 10 οπές με για κάθε έναν από τους 6 συνδυασμούς συνθηκών κοπής, τα 6 κοπτικά εργαλεία τοποθετήθηκαν στο στερεοσκόπιο όπου και έγινε η λήψη των παρακάτω εικόνων. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για ακόμη 10 οπές (συνολικά 20). Στο **Σχήμα 4-10** φαίνονται οι 2 κοπτικές ακμές από το κοπτικό εργαλείο, σε μεγέθυνση X6,5, ώστε να μπορεί να γίνει εμφανής ο προσανατολισμός στις παρακάτω εικόνες. Στο **Σχήμα 4-11** φαίνονται οι 2 κοπτικές ακμές από το κοπτικό εργαλείο, στην αρχική του κατάσταση, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές.

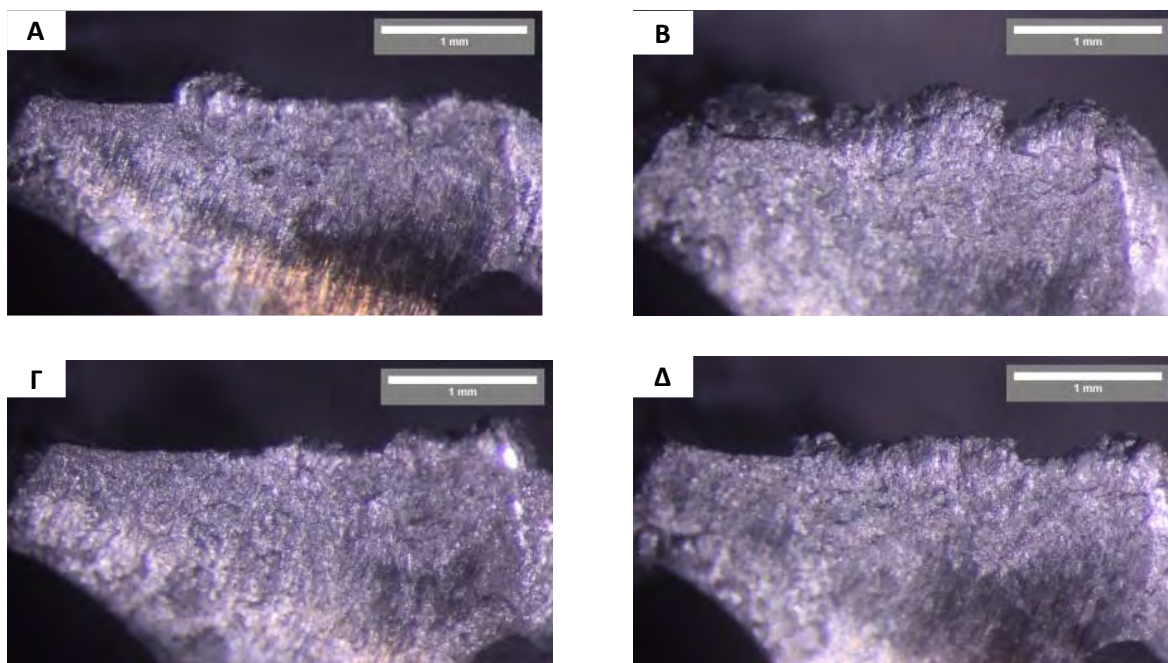


Σχήμα 4-10: Αναπαράσταση των κοπτικών ακμών σε μεγέθυνση X6,5 A) Κύρια κόψη 1 B) Κύρια κόψη 2.



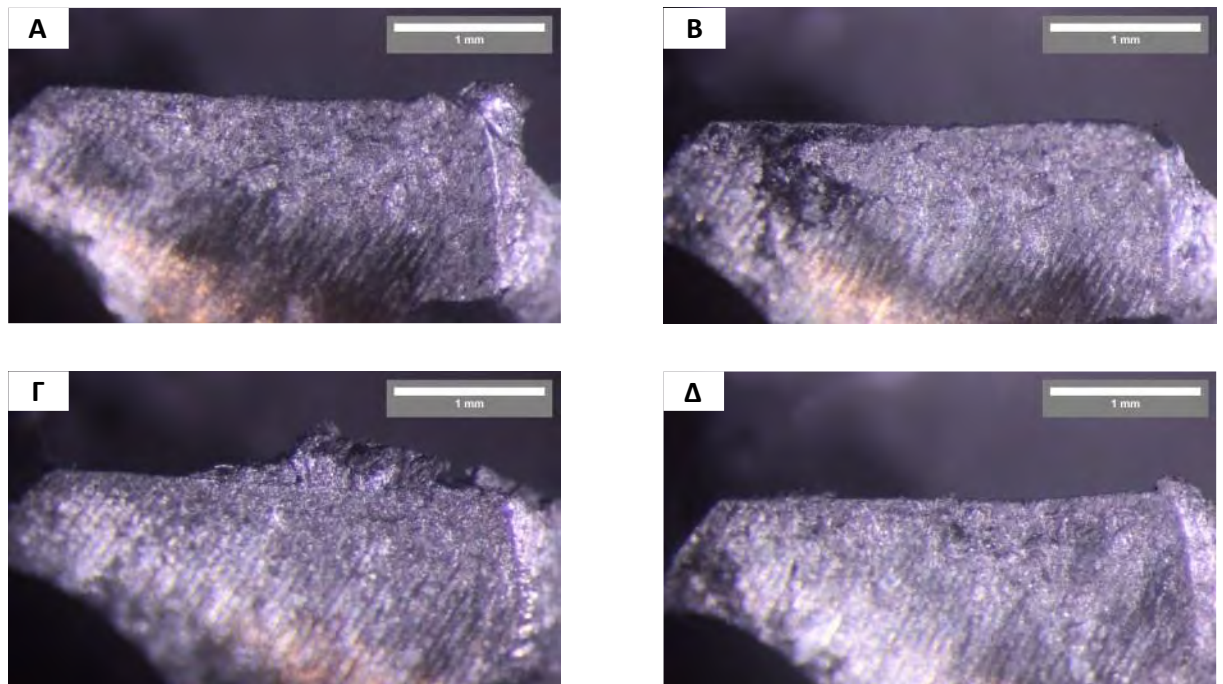
Σχήμα 4-11: Αρχική Κατάσταση των κοπτικών ακμών Α) 1^η κοπτική ακμή Β) 2^η κοπτική ακμή.

Στο **Σχήμα 4-12** παρουσιάζονται οι εικόνες με τη τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev. Φαίνεται έντονος ο σχηματισμός ψευδόκοψης, μετά το πέρας των 20 οπών, και στις δύο κοπτικές ακμές, αλλά εμφανίζονται και επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου. Σε όλες τις εικόνες, στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι φανερή η κατεύθυνση ροής του υλικού. Στην εικόνα Β η ψευδόκοψη εμφανίζεται έτοιμη να απομακρυνθεί από τη κοπτική ακμή, καθώς φαίνεται η έναρξη μιας ρωγμής κοντά στον άξονα του εργαλείου. Επιπλέον, είναι εμφανές πως μετά τις πρώτες 10 οπές έχει παραμείνει ένα μέρος της επικάλυψης με μπρούτζο (εικόνα Α), ενώ μετά τις 20 οπές έχει απομακρυνθεί ολοσχερώς.



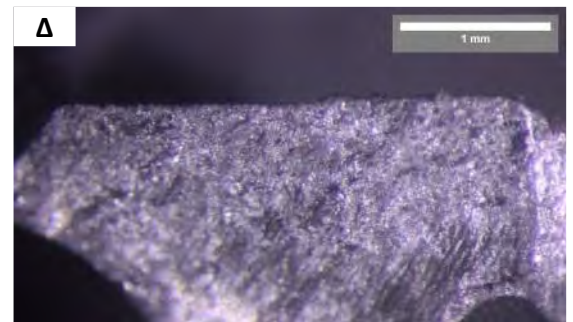
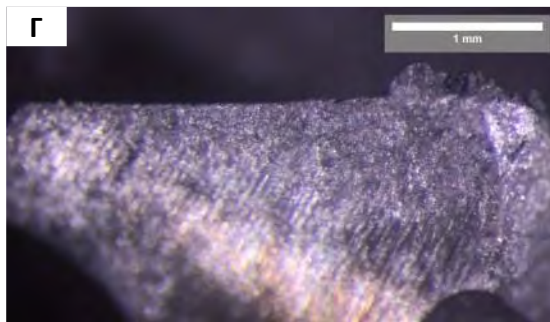
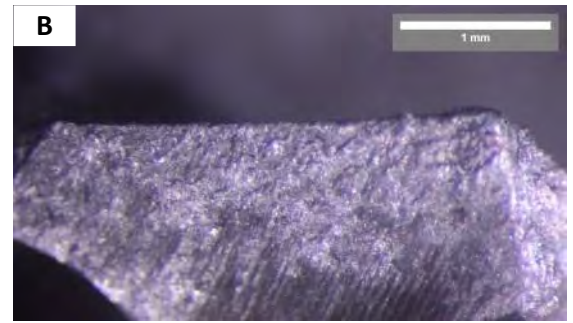
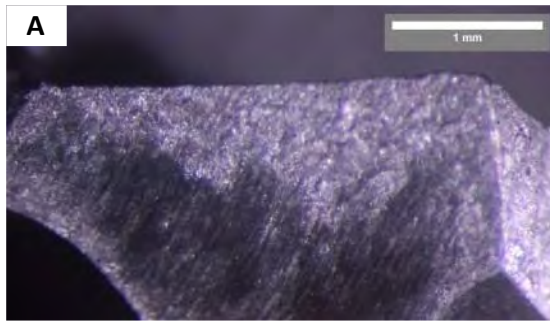
Σχήμα 4-12: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev. Α) $N = 10$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 20$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

Στο **Σχήμα 4-13** παρουσιάζονται οι εικόνες με τη τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$. Φαίνεται έντονος ο σχηματισμός ψευδόκοψης στην 2^η κοπτική ακμή μετά τις πρώτες 10 οπές (εικόνα Γ), εμφανίζονται όμως επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου, για όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις εικόνες, στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι φανερή η κατεύθυνση ροής του υλικού. Επιπλέον, είναι εμφανές πως μετά τις πρώτες 10 οπές, για τη 2^η κοπτική ακμή, έχει παραμείνει ένα μέρος της επικάλυψης με μπρούτζο (εικόνα Γ), ενώ στη 1^η κοπτική ακμή παρέμεινε η επικάλυψη και μετά το πέρας των διατρήσεων (εικόνες Α και Β).



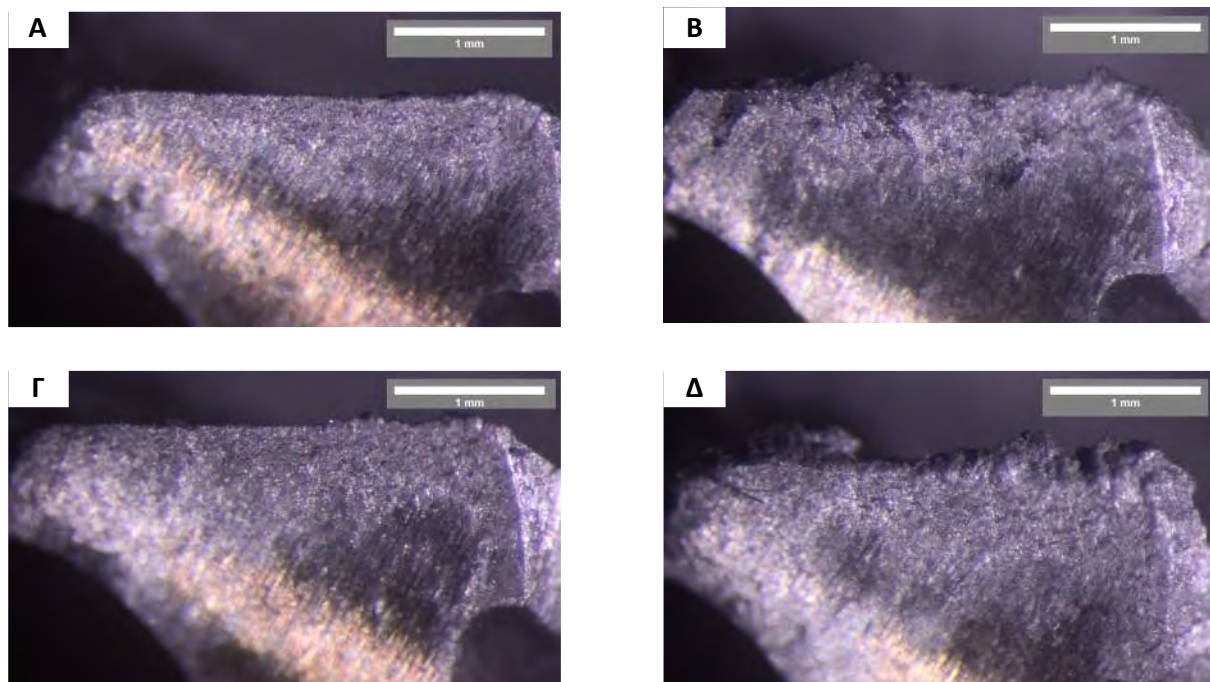
Σχήμα 4-13: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$. Α) $N = 10$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 20$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

Στο **Σχήμα 4-14** παρουσιάζονται οι εικόνες με τη τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$. Δεν φαίνεται τόσο έντονος ο σχηματισμός ψευδόκοψης σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από τη 2^η κύρια κόψη που έχουμε κάποιες επικολλήσεις υλικού στην ακμή, εμφανίζονται όμως επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου. Σε όλες τις εικόνες, στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι φανερή η κατεύθυνση ροής του υλικού. Επιπλέον, είναι εμφανές πως μετά τις πρώτες 10 οπές, για τη 2^η κοπτική ακμή, έχει παραμείνει ένα μέρος της επικάλυψης με μπρούτζο (εικόνα Γ).



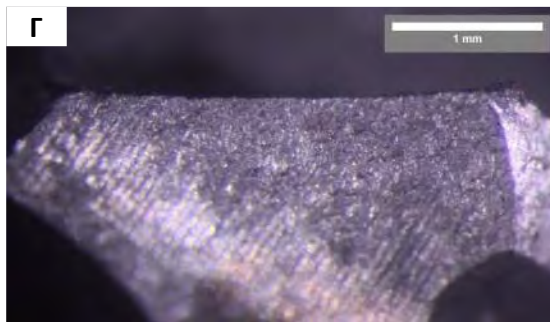
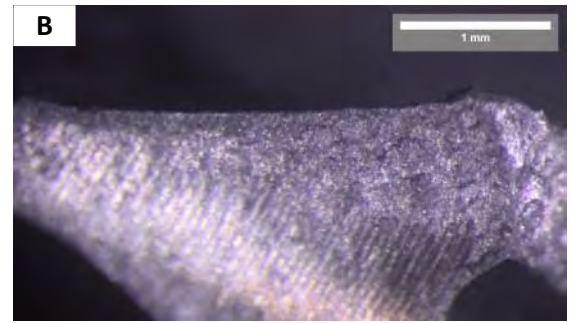
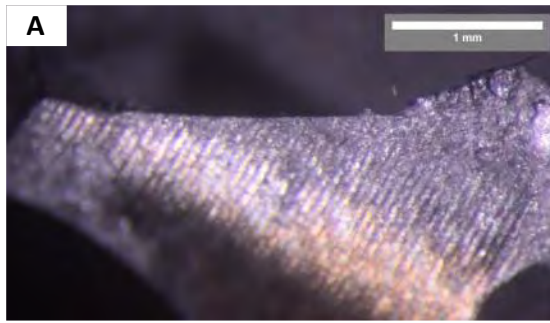
Σχήμα 4-14: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 17$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev. Α) $N = 10$ σπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 20$ σπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ σπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ σπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

Στο **Σχήμα 4-15** παρουσιάζονται οι εικόνες με τη τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev. Υπάρχει έντονος ο σχηματισμός ψευδόκοψης στη τελική κατάσταση (εικόνες Β και Δ) και επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου για κάθε περίπτωση. Σε όλες τις εικόνες, στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι φανερό η κατεύθυνση ροής του υλικού. Επιπλέον, είναι εμφανές πως σε όλες τις περιπτώσεις, έχει παραμείνει ένα μέρος της επικάλυψης με μπρούτζο, με αυτόν να είναι πιο εμφανής στη μέση κατάσταση του κοπτικού εργαλείου (εικόνες Α και Γ).



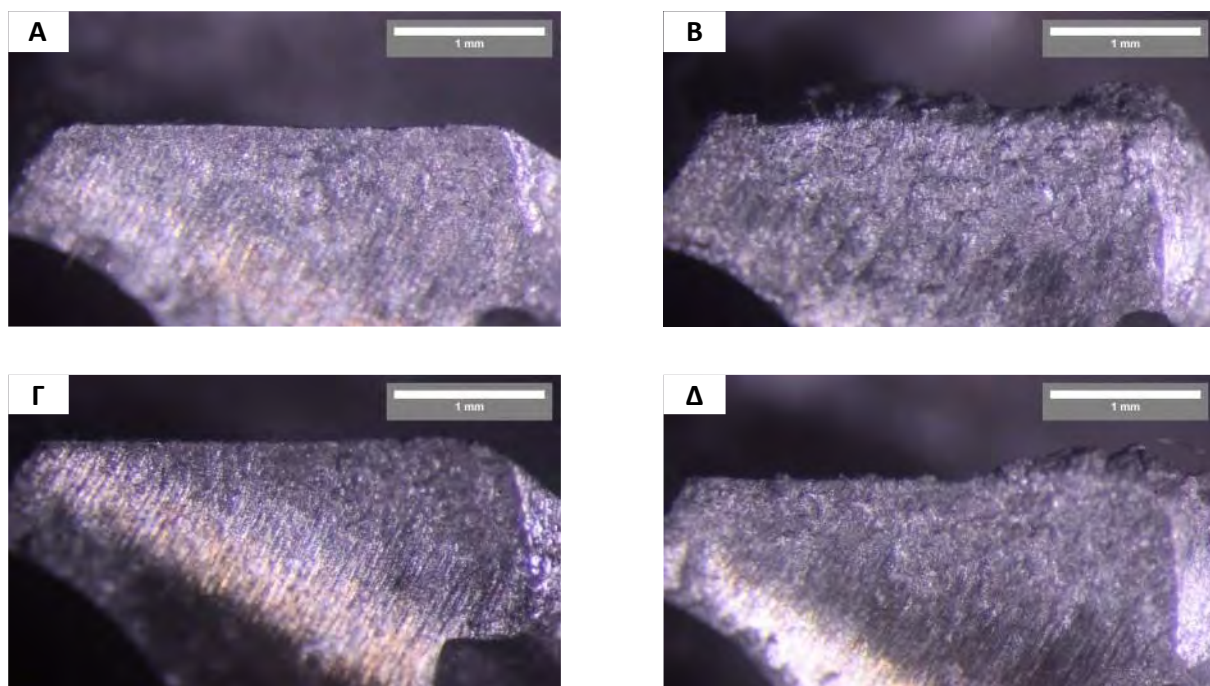
Σχήμα 4-15: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev. Α) $N = 10$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 20$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

Στο **Σχήμα 4-16** παρουσιάζονται οι εικόνες με τη τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24$ m/min και $f = 0,2$ mm/rev. Υπάρχει έντονος ο σχηματισμός ψευδόκοψης στη 1^η κύρια κόψη, μετά από την ολοκλήρωση των πρώτων 10 οπών (εικόνα Α) και επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου για κάθε περίπτωση. Σε όλες τις εικόνες, στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι φανερή η κατεύθυνση ροής του υλικού. Επιπλέον, είναι εμφανές πως σε όλες τις περιπτώσεις, έχει παραμείνει ένα μέρος της επικάλυψης με μπρούτζο, με αυτόν να είναι πιο εμφανής στη μέση κατάσταση της 1^{ης} κύριας κόψης του κοπτικού εργαλείου (εικόνα Α).



Σχήμα 4-16: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$. Α) $N = 10$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 20$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

Στο **Σχήμα 4-17** παρουσιάζονται οι εικόνες με τη τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$. Υπάρχει έντονος ο σχηματισμός ψευδόκοψης στη 1^η και 2^η κύρια κόψη, μετά από την ολοκλήρωση των 20 οπών (εικόνες Β και Δ) καθώς και επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου για κάθε περίπτωση. Σε όλες τις εικόνες, στην ελεύθερη επιφάνεια, είναι φανερό η κατεύθυνση ροής του υλικού. Επιπλέον, είναι εμφανές πως σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από τη τελική κατάσταση της 1^{ης} κύριας κόψης, έχει παραμείνει ένα μέρος της επικάλυψης με μπρούτζο, με αυτόν να είναι πιο εμφανής στη μέση κατάσταση της 2^{ης} κύριας κόψης του κοπτικού εργαλείου (εικόνα Γ).



Σχήμα 4-17: Τυπική φθορά στις κύριες κόψεις για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$. Α) $N = 10$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Β) $N = 20$ οπές της 1^{ης} κοπτικής ακμής, Γ) $N = 10$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής, Δ) $N = 20$ οπές της 2^{ης} κοπτικής ακμής.

4.2.4.1 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, δεν υπάρχει εμφανής ένδειξη φθοράς στα κοπτικά εργαλεία. Για τη διαπίστωση της φθοράς με μεγαλύτερη ακρίβεια είναι απαραίτητη η απομάκρυνση του επικολλημένου υλικού από τις κοπτικές ακμές και από την ελεύθερη επιφάνεια, όπου ενδέχεται να υπάρξει φθορά απόξεσης. Γενικότερα, στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως με την αύξηση της ταχύτητας, ή της πρόωσης, αυξάνεται και η φθορά του κοπτικού εργαλείου. Στα πειραματικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας δεν εμφανίστηκε κάτι παρόμοιο, αφενός διότι οι ταχύτητες κοπής που χρησιμοποιήθηκαν είναι χαμηλές, αφετέρου διότι ο αφρός αλουμινίου που υπέστη τη κατεργασία της διάτρησης, έχει χαμηλό μέτρο σκληρότητας και υψηλή κατεργασιμότητα. Για να εμφανιστεί φθορά στα συγκεκριμένα HSS τρυπάνια είναι απαραίτητη η διάνοιξη μεγαλύτερου αριθμού οπών.

Στα παραπάνω Σχήματα ωστόσο, είναι φανερό η τάση επικόλλησης υλικού τόσο στις κύριες κοπτικές ακμές, δημιουργώντας έτσι ψευδόκοψη, όσο και στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου. Τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, είχαν επικάλυψη μπρούτζου. Κατά τις δοκιμές διάτρησης ο μπρούτζος απομακρύνθηκε και έτσι ένα μέρος του επικολλήθηκε στο κοπτικό εργαλείο, είτε στις κύριες κόψεις, είτε στην ελεύθερη επιφάνεια του εργαλείου. Ένας ακόμα λόγος που παρατηρούνται επικολλήσεις στις μικρές ταχύτητες, είναι η μεγάλη αντιδραστικότητα του αλουμινίου, με το υλικό του κοπτικού εργαλείου (ταχυχάλυβας). Επιπλέον, το αλουμίνιο εμφανίζει χαμηλή σκληρότητα, άρα κατά τη διάτρησή

του, δημιουργούνται τα απόβλιττα, τα οποία δεν απομακρύνονται από την επιφάνεια αποβλίττου, αλλά αλλάζουν κατεύθυνση και οδηγούνται στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου (ψευδοαπόβλιττα), όπου εξαιτίας τις συμπίεσης και της υψηλής θερμοκρασίας σε εκείνη τη περιοχή, προσκολλώνται στην ελεύθερη επιφάνεια όπως φαίνεται σε πολλές από τις παραπάνω περιπτώσεις.

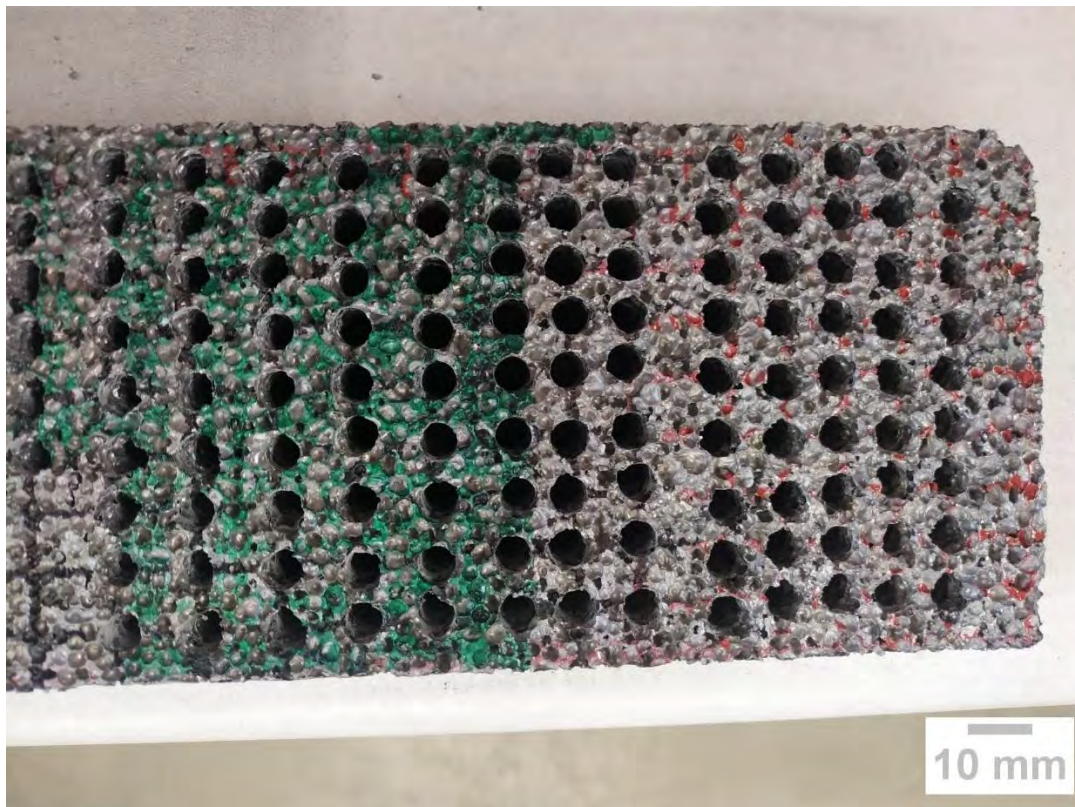
Πιο συγκεκριμένα φαίνεται από τα σχήματα 1,2,3 ότι για χαμηλότερη ταχύτητα κοπής ($v_c = 17$ m/min) έχουμε πιο εκτεταμένη δημιουργία ψευδόκοψης καθώς και περισσότερες επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, από ότι με τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής ($v_c = 24$ m/min). Επιπλέον, είναι εύκολο κανείς να παρατηρήσει από τα παραπάνω σχήματα ότι όσο αυξάνεται η πρόωση, τόσο αυξάνεται το ποσοστό της επικόλλησης του υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια, γεγονός που οφείλεται στις αυξανόμενες δυνάμεις συμπίεσης σε εκείνη τη περιοχή, όπως είδαμε στο **4.2.2.1** αύξηση της πρόωσης συνεπάγεται αύξηση της αξονικής δύναμης.

Βέβαια και πάλι δεν είναι δυνατόν να γίνει γενίκευση αυτών των αποτελεσμάτων, λόγω της τυχαιότητας κάθε διαδρομής της οπής, εξαιτίας του πορώδους του υλικού. Για τη τεκμηρίωση αυτών των αποτελεσμάτων απαιτείται πολύ μεγαλύτερο πλήθος δοκιμών, έτσι ώστε να υπάρχει και στατιστική ανάλυση για ένα πολύ μεγάλο εύρος δεδομένων.

4.2.5 Ανάλυση Κυκλικότητας στην Είσοδο της Οπής

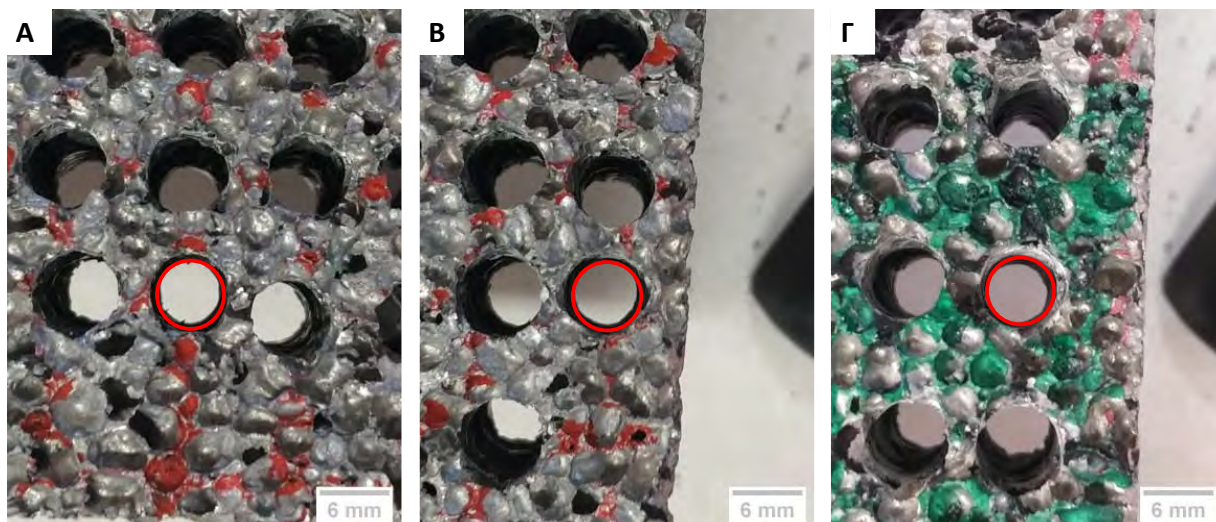
4.2.5.1 Εισαγωγή

Μία παρατήρηση που έγινε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν ότι κατά την είσοδο του κοπτικού εργαλείου στην οπή, υπήρχαν πολλές δυναμικές αστάθειες, καθώς η επιφάνεια του τεμαχίου δεν ήταν λεία, αλλά εμφάνιζε μία ακανόνιστη πορώδη δομή. Σαν αποτέλεσμα, η είσοδος της οπής που δημιουργούνταν, μπορεί να παρέκκλινε από τη κυκλική γεωμετρία της και να έπαιρνε μία ελλειψοειδή μορφή. Για να μελετηθεί αυτό το φαινόμενο, λήφθηκαν οι παρακάτω εικόνες με τις οπές για $N=1$, $N=10$ και $N=20$ για κάθε συνδυασμό συνθηκών κοπής. Το κατεργαζόμενο τεμάχιο φαίνεται στο **Σχήμα 4-18** μετά το πέρας των πειραμάτων.



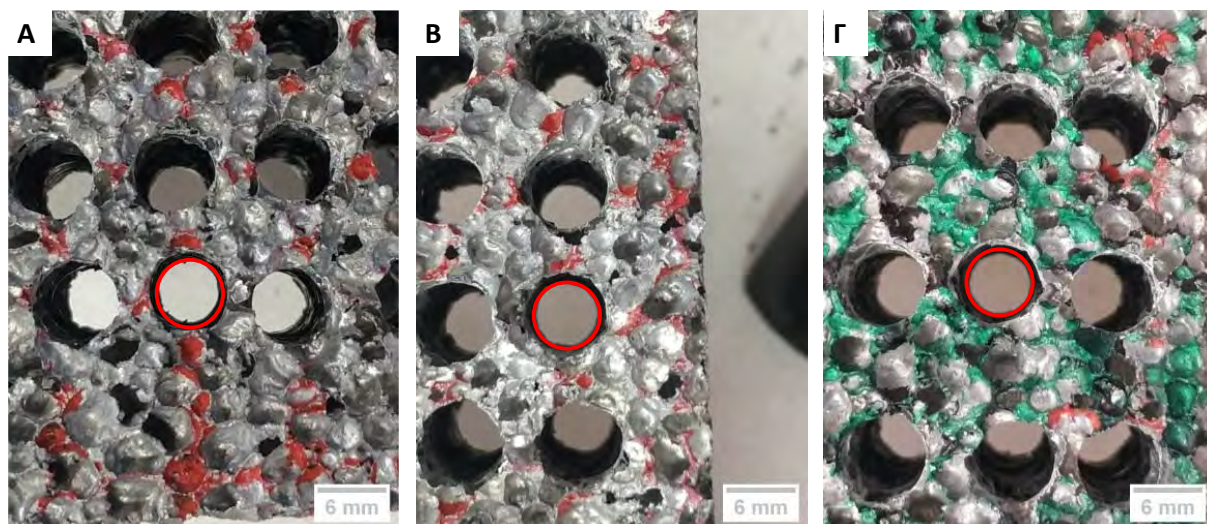
Σχήμα 4-18: Κατεργαζόμενο Τεμάχιο μετά το πέρας των πειραμάτων.

Στο **Σχήμα 4-19** παρουσιάζονται οι εικόνες Α, Β και Γ που εμφανίζουν τις οπές 1, 10 και 20 αντίστοιχα, για συνθήκες κοπής $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,1 \text{ mm/rev}$. Οι οπές αυτές έχουν έναν εγγεγραμμένο κόκκινο κύκλο, με διάμετρο 6 mm, ώστε να προσδιοριστεί η κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Στην εικόνα Γ φαίνεται πως στην είσοδο της οπής, έχει δημιουργηθεί ένα ελλειψοειδές σχήμα, δημιουργώντας έτσι απόκλιση έτσι από την κυκλικότητα.



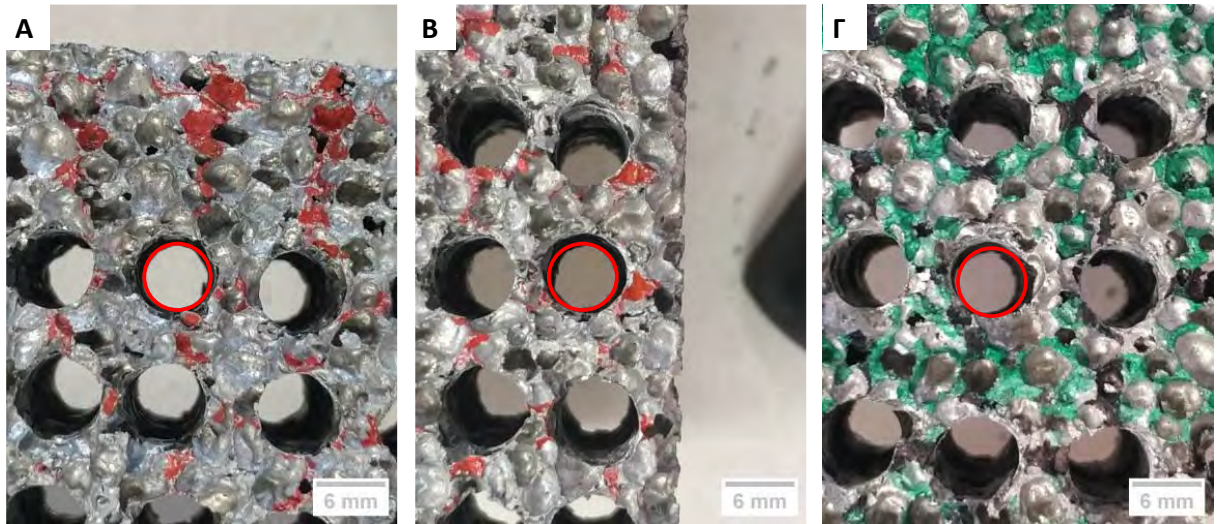
Σχήμα 4-19: Οπές για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,1 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.

Στο **Σχήμα 4-20** παρουσιάζονται οι εικόνες Α, Β και Γ που εμφανίζουν τις οπές 1, 10 και 20 αντίστοιχα, για συνθήκες κοπής $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$. Οι οπές αυτές έχουν έναν εγγεγραμμένο κόκκινο κύκλο, με διάμετρο 6 mm, ώστε να προσδιοριστεί η κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Στις εικόνες Β και Γ φαίνεται πως στην είσοδο της οπής, υπάρχει μία διάμετρος οπής μεγαλύτερη από 6 mm.



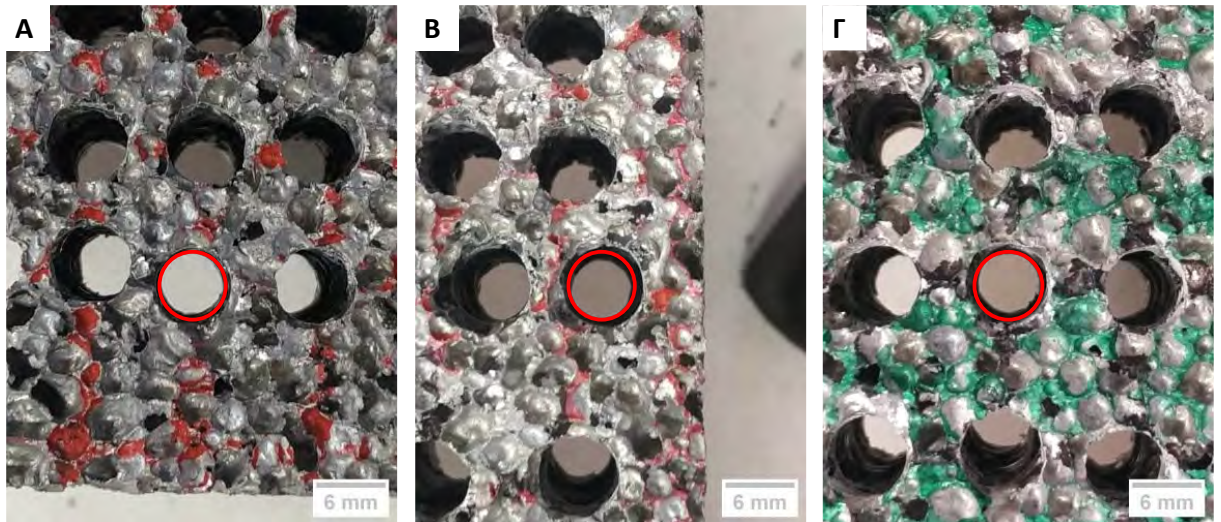
Σχήμα 4-20: Οπές για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.

Στο **Σχήμα 4-21** παρουσιάζονται οι εικόνες Α, Β και Γ που εμφανίζουν τις οπές 1, 10 και 20 αντίστοιχα, για συνθήκες κοπής $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$. Οι οπές αυτές έχουν έναν εγγεγραμμένο κόκκινο κύκλο, με διάμετρο 6 mm, ώστε να προσδιοριστεί η κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Σε όλες τις εικόνες φαίνεται πως στην είσοδο της οπής, υπάρχει μία διάμετρος οπής μεγαλύτερη από 6 mm, ενώ στην εικόνα Γ έχει σχηματιστεί μία ελλειψοειδή γεωμετρία.



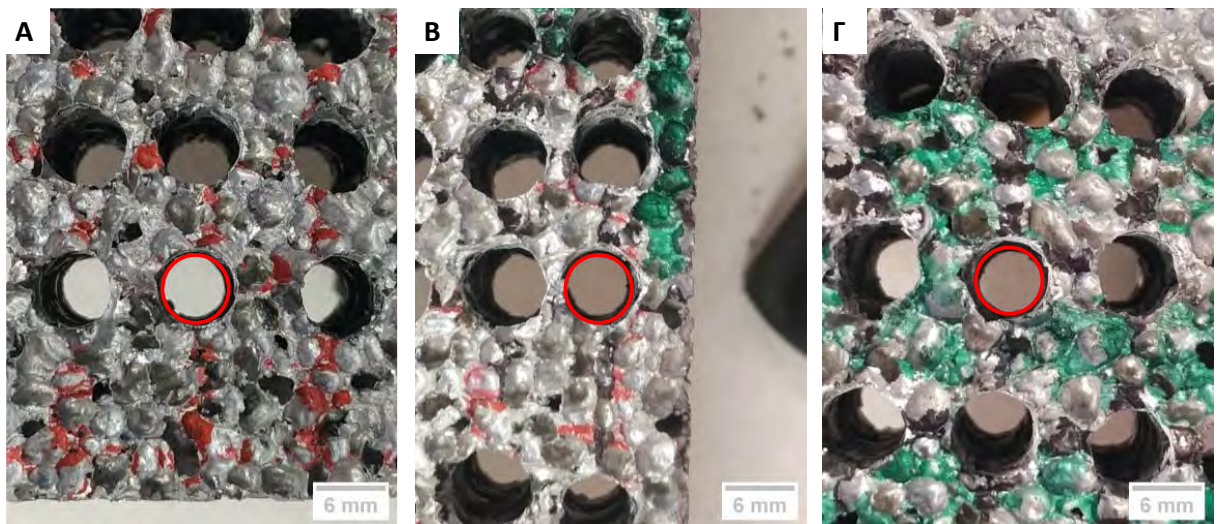
Σχήμα 4-21: Οπές για $v_c = 17 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$, Β) $N=10$, Γ) $N=20$.

Στο **Σχήμα 4-22** παρουσιάζονται οι εικόνες Α, Β και Γ που εμφανίζουν τις οπές 1, 10 και 20 αντίστοιχα, για συνθήκες κοπής $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,1 \text{ mm/rev}$. Οι οπές αυτές έχουν έναν εγγεγραμμένο κόκκινο κύκλο, με διάμετρο 6 mm, ώστε να προσδιοριστεί η κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Στις εικόνες Β και Γ φαίνεται πως στην είσοδο της οπής, υπάρχει μία διάμετρος οπής μεγαλύτερη από 6 mm.



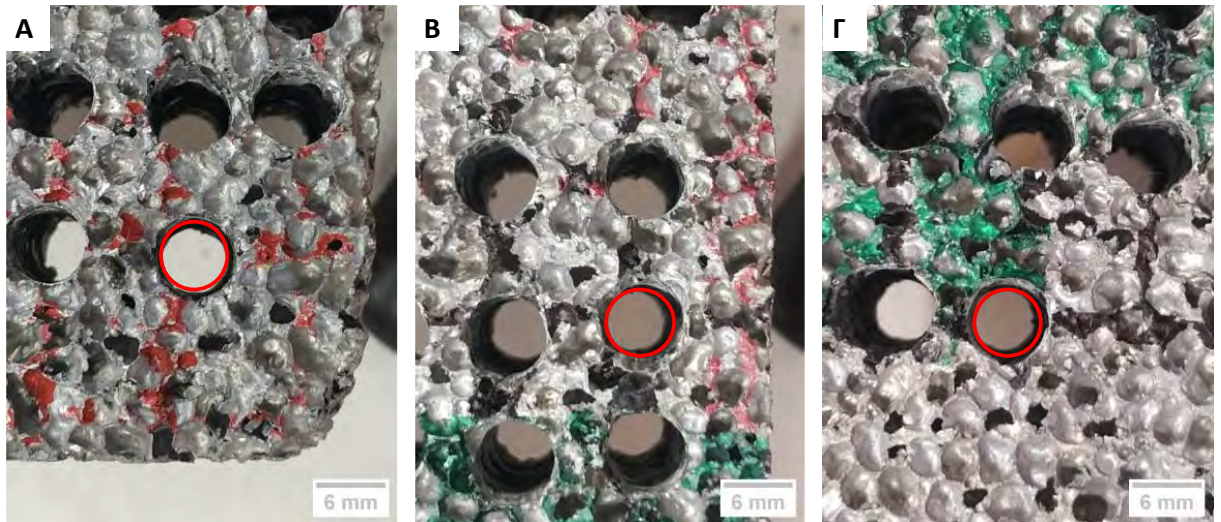
Σχήμα 4-22: Οπές για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,1 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.

Στο **Σχήμα 4-23** παρουσιάζονται οι εικόνες Α, Β και Γ που εμφανίζουν τις οπές 1, 10 και 20 αντίστοιχα, για συνθήκες κοπής $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$. Οι οπές αυτές έχουν έναν εγγεγραμμένο κόκκινο κύκλο, με διάμετρο 6 mm, ώστε να προσδιοριστεί η κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Στην εικόνα Γ φαίνεται πως στην είσοδο της οπής, υπάρχει μία διάμετρος οπής μεγαλύτερη από 6 mm.



Σχήμα 4-23: Οπές για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,2 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.

Στο **Σχήμα 4-24** παρουσιάζονται οι εικόνες Α, Β και Γ που εμφανίζουν τις οπές 1, 10 και 20 αντίστοιχα, για συνθήκες κοπής $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$. Οι οπές αυτές έχουν έναν εγγεγραμμένο κόκκινο κύκλο, με διάμετρο 6 mm, ώστε να προσδιοριστεί η κυκλικότητα στην είσοδο της οπής. Σε όλες τις εικόνες φαίνεται πως στην είσοδο της οπής, υπάρχει μία διάμετρος οπής μεγαλύτερη από 6 mm, με τη μεγαλύτερη απόκλιση να υπάρχει στην εικόνα Β.



Σχήμα 4-24: Οπές για $v_c = 24 \text{ m/min}$ και $f = 0,3 \text{ mm/rev}$ Α) $N=1$ οπή, Β) $N=10$ οπές, Γ) $N=20$ οπές.

4.2.5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Σχεδόν σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, παρατηρήθηκε πως στην είσοδο της οπής, υπήρχαν αποκλίσεις, είτε από την ονομαστική διάμετρο οπής των 6 mm του κοπτικού εργαλείου, είτε από τη κυκλικότητα. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται αφενός στην δόνηση που δημιουργείται εξαιτίας της λειτουργίας του κέντρου κατεργασίας και αφετέρου στην δυναμική αστάθεια του τρυπανιού καθώς αυτό συναντά την ακανόνιστη πορώδη επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Ανάλογα το σημείο με το οποίο έρθει σε επαφή το τρυπάνι, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας δυναμικής αστάθειας αφού η άτρακτος είναι δυνατόν να μετακινηθεί προσωρινά, όπως και παρατηρήθηκε οπτικά σε μερικές περιπτώσεις, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Επομένως, η διάμετρος και το σχήμα της εισόδου της οπής μπορεί να αποκλίνει από το ονομαστικό. Για αυτό λοιπόν παρατηρήθηκε αύξηση της διαμέτρου της εισόδου της οπής, καθώς και απόκλιση από τη κυκλικότητα, αφού πολλές οπές είχαν ελλειψοειδές σχήμα εισόδου.

Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τα ελαττώματα που προκύπτουν κατά τη διάτρηση πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα (CFRP) και αφρών αλουμινίου, καθώς και η επίδραση των παραμέτρων κοπής σε αυτά. Για την ανάλυση των ελαττωμάτων στα πολυμερή ενισχυμένα με ανθρακονήματα, χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές πηγές καθώς και έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω σε αυτά. Για την ανάλυση ελαττωμάτων στους αφρούς αλουμινίου, διεξήχθησαν πειραματικές δοκιμές σε μία πλάκα αφρού αλουμινίου κλειστού πορώδους με υλικό μήτρας το AlSi10 και προσθήκη 1,3 κ. β. % Ca και 2 κ. β. % σωματίδια TiH₂, σε διαφορετικούς συνδυασμούς ταχύτητας κοπής και πρόωσης με τρυπάνια διαμέτρου 6 mm. Τα ληφθέντα δεδομένα ως αποτέλεσμα της βιβλιογραφικής και πειραματικής μελέτης δίνονται παρακάτω.

5.1 Συμπεράσματα

5.1.1 Συμπεράσματα για τη διάτρηση των CFRP

Τα πιο σημαντικά ελαττώματα που προκύπτουν κατά τη διάτρηση πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα είναι η αποκόλληση/αποελασματοποίηση, η κυκλικότητα, το μέγεθος της οπής, η ανάπτυξη γρεζιών και η τραχύτητα της επιφάνειας [27].

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η πρόωση είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την έκταση των ελαττωμάτων που προκύπτουν κατά την διάτρηση των πολυμερών ενισχυμένων με ανθρακονήματα, όπως ανέδειξαν και πολλοί συγγραφείς [32],[33],[34],[35].

Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της πρόωσης η δύναμη ώσης αυξάνεται, ενώ με την αύξηση της ταχύτητας κοπής η δύναμη ώσης μειώνεται ελαφρώς. Άρα, η χρήση ενός συνδυασμού μεγαλύτερης ταχύτητας κοπής και χαμηλότερης πρόωσης παρήγαγε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας οπών[34].

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Mayet, P., [33], έδειξαν ότι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί φθοράς του εργαλείου είναι η τριβή εξαιτίας των ινών και η πρόσφυση. Άρα η απώλεια των συνθηκών από την απόξεση του κοπτικού εργαλείου είναι η κύρια αίτια εμφάνισης των ελαττωμάτων στην οπή. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ANOVA από η μελέτη Gaitonde, V.N, [35], η γωνία σημείου είναι το πιο σημαντικό στοιχείο για την ελαχιστοποίηση της αποκόλλησης, ακολουθούμενη από την πρόωση και την ταχύτητα.

5.1.2 Συμπεράσματα για τη διάτρηση του αφρού αλουμινίου

Από τις εικόνες που ανακτήθηκαν μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών, δεν παρατηρήθηκε φθορά στα κοπτικά εργαλεία. Παρατηρήθηκε όμως, σχηματισμός ψευδόκοψης στις κύριες κοπτικές ακμές των εργαλείων, εξαιτίας των μικρών ταχυτήτων κοπής που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και της μεγάλης αντιδραστικότητας του αλουμινίου με το υλικό του κοπτικού εργαλείου (ταχυχάλυβας). Επιπλέον, εμφανίστηκαν επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου που οφείλονταν στη χαμηλή σκληρότητα του αλουμινίου.

Στο **Σχήμα 4-12**, **Σχήμα 4-13**, **Σχήμα 4-14** παρατηρήθηκε ότι για χαμηλότερη ταχύτητα κοπής ($v_c = 17$ m/min) υπήρξε πιο εκτεταμένη δημιουργία ψευδόκοψης καθώς και περισσότερες επικολλήσεις υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, από ότι με τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής ($v_c = 24$ m/min). Επίσης, όσο αυξάνεται η πρόωση, τόσο αυξάνεται το ποσοστό της επικόλλησης του υλικού στην ελεύθερη επιφάνεια, γεγονός που οφείλεται στις αυξανόμενες δυνάμεις συμπίεσης σε εκείνη τη περιοχή.

Από τα πειραματικά δεδομένα αυτής της διπλωματικής εργασίας, παρατηρήθηκε πως υπήρξαν αυξομειώσεις στις Μέσες Τιμές της Αξονικής Δύναμης και της Ροπής Στρέψης, που οφείλονταν στην πορώδη δομή του κατεργαζόμενου αφρού αλουμινίου καθώς και στο σχηματισμό της ψευδόκοψης που δημιουργήθηκε στις χαμηλές ταχύτητες κοπής.

Γενικώς, για την ταχύτητα κοπής $v_c = 17$ m/min παρατηρείται συνεχής άνοδος στη τιμή της Αξονικής Δύναμης, όσο αυξάνεται και η τιμή της πρόωσης. Η αύξηση της δύναμης με την αύξηση της πρόωσης σε αυτή την περίπτωση είναι αποτέλεσμα της αύξησης του όγκου του απαραμόρφωτου αποβλήτου ανά μονάδα χρόνου. Η ίδια πορεία φαίνεται πως επικρατεί και για τη μεγαλύτερη ταχύτητα κοπής $v_c = 24$ m/min, με την απόκλιση ενός σημείου για $f = 0,3$ mm/rev. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στη τυχαιότητα που υπάρχει στην κάθε μέτρηση εξαιτίας της πορώδους δομής. Η μέγιστη Μέση Τιμή της Αξονικής Δύναμης ήταν $F_z^{avg} = 45,4$ N και επιτεύχθηκε για συνθήκες κοπής $v_c = 17$ m/min και $f = 0,3$ mm/rev ενώ η ελάχιστη Μέση Τιμή της Αξονικής Δύναμης ήταν $F_z^{avg} = 33$ N και επιτεύχθηκε για συνθήκες κοπής $v_c = 24$ m/min και $f = 0,1$ mm/rev.

Για τη Ροπή Στρέψης παρατηρήθηκε ότι για $v_c = 24$ m/min με την αύξηση της πρόωσης, έχουμε ελάττωση της τιμής της Ροπής. Σε κάθε περίπτωση η χαμηλότερη Ροπή παράχθηκε από την υψηλότερη ταχύτητα κοπής, με εξαίρεση το σημείο για $f = 0,2$ mm/rev όπου οι τιμές ήταν σχεδόν ίδιες.

Τέλος, παρατηρήθηκε πως στην είσοδο της οπής, υπήρχαν αποκλίσεις, είτε από την ονομαστική διάμετρο οπής των 6 mm του κοπτικού εργαλείου, είτε από την κυκλικότητα. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονταν αφενός στην δόνηση που δημιουργείται εξαιτίας της

λειτουργίας του κέντρου κατεργασίας και αφετέρου στην δυναμική αστάθεια του τρυπανιού, καθώς αυτό συναντά την ακανόνιστη πορώδη επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου.

5.2 Μελλοντικό Πεδίο Έρευνας

Σε όλα τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα, διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο η πορώδης δομή του υλικού, καθώς και η τυχαιότητα που υπήρχε στη διαδρομή του κοπτικού εργαλείου, αφού η κατεργαζόμενη πλάκα αφρού αλουμινίου είχε ένα μέσο πορώδες 70% με το μέσο μέγεθος των πόρων να είναι 2,31 mm. Συνεπώς, δεν υπάρχει μεγάλη στατιστική ακρίβεια για τον αριθμό των 20 πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για κάθε συνδυασμό παραμέτρων κοπής. Επομένως, υπάρχουν προοπτικές εξέλιξης της παρούσας εργασίας, με την εκτέλεση μεγαλύτερου αριθμού πειραματικών δοκιμών ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη στατιστική ακρίβεια στα αποτελέσματα, καθώς και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα μεγαλύτερο εύρος παραμέτρων κοπής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Herrmann, C. et al. (2018) "Life cycle engineering of lightweight structures", *CIRP Annals*, 67(2), pp. 651-672.
- [2] Evans, A. (2001) "Lightweight Materials and Structures", *MRS Bulletin*, 26(10), pp. 790-797.
- [3] Immarigeon, J. et al. (1995) "Lightweight materials for aircraft applications", *Materials Characterization*, 35(1), pp. 41-67.
- [4] Setlak, L., Kowalik, R., & Lusiak, T. (2021). Practical Use of Composite Materials Used in Military Aircraft. *Materials*, 14(17), 4812.
- [5] Parveez, B. et al. (2022) "Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review", *Polymers*, 14(22), p. 5007.
- [6] Cole, G. and Sherman, A. (1995) "Lightweight materials for automotive applications", *Materials Characterization*, 35(1), pp. 3-9.
- [7] Mukai, T. et al. (1999) "Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading", *Scripta Materialia*, 40(8), pp. 921-927.
- [8] Prasad, S., & Kumari, P. (2022). Fabrication of Shape Memory Polymers. *Fabrication And Machining Of Advanced Materials And Composites*, 119-138.
- [9] Παντελάκης, Σ.Γ. και Τσερπές, Κ.Ι. *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ*, Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2015.
- [10] Αντωνιάδης, Α. *Μηχανουργική Τεχνολογία*, 3^η έκδοση, Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2017.
- [11] *Materials Selection in Mechanical Design* (2023). Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9781856176637/materials-selection-in-mechanical-design> (Accessed: 17 May 2023).
- [12] Ashby, M. (2011) "Materials Selection—The Basics", *Materials Selection in Mechanical Design*, pp. 97-124.
- [13] Ostolaza, M. et al. (2023) "Latest Developments to Manufacture Metal Matrix Composites and Functionally Graded Materials through AM: A State-of-the-Art Review", *Materials*, 16(4), p. 1746.
- [14] Chawla, K.K. *Composite Materials: Science and Engineering*, 4th edition, Springer Nature Switzerland AG, Switzerland, 2019.
- [15] William, J. and Callister, D. *Materials Science and Engineering, An Introduction*, 7th edition, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [16] Schmid, S.R. and Kalpakjian, S. *Manufacturing Engineering & Technology*, 7th edition, Pearson, London, 2013.
- [17] Ning, H. (2021) "Chapter 7 Micromechanics and macromechanics of thermoplastic composites", *De Gruyter*, pp. 273-306.
- [18] Ishizaki, K., Komarneni, S. and Nanko, M. (1998) "1. Introduction," in *Porous materials: Process Technology and applications*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp. 1–5.
- [19] Banhart, J. (2006), "Metal Foams: Production and Stability", *Advanced Engineering Materials*, 8(9), pp 781-794.

- [20] Shiomi, M. et al. (2010) "Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming", *Journal of Materials Processing Technology*, 210(9), pp. 1203-1208.
- [21] Singh, S. and Bhatnagar, N. (2017) "A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017)", *Journal of Porous Materials*, 25(2), pp. 537-554.
- [22] Banhart, J. (2001) "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, 46(6), pp. 559-632.
- [23] Mahadev, Sreenivasa, C.G. and Shivakumar, K.M. (2018) "A review on production of aluminium metal foams," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376, p. 012081.
- [24] Baumeister, J., Banhart, J. and Weber, M. (1997) "Aluminium foams for transport industry", *Materials & Design*, 18(4-6), pp. 217-220.
- [25] *Drilling Machines Types & Operation* (2021). Available at: <https://engineeringlearn.com/drilling-machines-types-operation/> (Accessed: 21 March 2023).
- [26] *Measuring cutting forces in drilling operations | Kistler* (2023). Available at: <https://www.kistler.com/DE/en/measuring-cutting-forces-in-drilling-operations/C00000126> (Accessed: 21 March 2023).
- [27] Aamir, M. et al. (2019) "Recent advances in drilling of carbon fiber–reinforced polymers for aerospace applications: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5-6), pp. 2289-2308.
- [28] Zadafiya, K. et al. (2021) "Recent trends in drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs): A state-of-the-art review", *Journal of Manufacturing Processes*, 69, pp. 47-68.
- [29] Zarif Karimi, N., Minak, G. and Kianfar, P. (2015) "Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission", *Composite Structures*, 131, pp. 107-114.
- [30] Tsao, C. and Hocheng, H. (2007) "Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials", *International Journal of Mechanical Sciences*, 49(8), pp. 983-988.
- [31] Liu, D., Tang, Y. and Cong, W. (2012) "A review of mechanical drilling for composite laminates", *Composite Structures*, 94(4), pp. 1265-1279.
- [32] Xu, J. et al. (2018) "Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria", *Composite Structures*, 201, pp. 1076-1087.
- [33] Mayuet, P. et al. (2013) "Damaged Area based Study of the Break-IN and Break-OUT Defects in the Dry Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)", *Procedia Engineering*, 63, pp. 743-751.
- [34] Eneyew, E. and Ramulu, M. (2014) "Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites", *Journal of Materials Research and Technology*, 3(4), pp. 354-362.
- [35] Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Rubio, J.C., Correia, A.E., Abrão, A.M. and Davim, J.P. (2011). A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites. *Journal of Composite Materials*, 45(22), pp.2359–2368.
- [36] Uzun, G., Gokmen, U., Cinici, H. and Turker, M. (2017). Effect of cutting parameters on the drilling of AlSi7 metallic foams. *Materiali in tehnologije*, 51(1), pp.19–24.
- [37] Ciglar, D., Udiljak, T. and Škorić, S. (2006). The axial force in aluminum foam drilling. *TECHNICAL GAZETTE*, 13(3,4), pp.27-30.

- [38] <https://www.bartleby.com/subject/engineering/mechanical-engineering/concepts/mechanical-behavior-of-composite>.
- [39] *KistlerB2bFrontend* (2023). Available at: <https://www.kistler.com/INT/en/p/multicomponent-dynamometer-9272/000000000018007552> (Accessed: 31 May 2023).
- [40] *Data acquisition System* / *Kistler* (2023). Available at: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/data-acquisition-system-5697a/P0000374> (Accessed: 31 May 2023).
- [41] Michailidis, N. et al. (2017) "Computational-experimental investigation of milling porous aluminium", *CIRP Annals*, 66(1), pp. 121-124.