



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Κατασκευή σύνθετων υλικών μήτρας κράματος αλουμινίου με ενίσχυση νιφάδων
χαλκού και συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων**

**Manufacturing of copper flake reinforced aluminum alloy matrix composites
and comparative evaluation of mechanical and physical properties**

Συγγραφέας:

Δεμερτζής Δημήτριος

A.M.: 18393087

Επιβλέποντες: Δρ. Σωτηρία Δημητρέλλου, Δρ. Ισίδωρος Ιακωβίδης

Αιγάλεω, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Κατασκευή σύνθετων υλικών μήτρας κράματος αλουμινίου με ενίσχυση νιφάδων χαλκού και συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων

Συγγραφέας

Δεμερτζής Δημήτριος (Α.Μ.: 18393087)

Επιβλέποντες

Σωτηρία Δημητρέλλου,
Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

31/10/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Σωτηρία Δημητρέλλου
Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Ιωάννης Παπαντωνίου
Ακάδ. Υπότροφος ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δεμερτζής Δημήτριος του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 183933087 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Δεμερτζής Δημήτριος

Ευχαριστίες

Με αφορμή τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους ανθρώπους που στάθηκαν αρωγοί τόσο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής, τους γονείς μου, το αδερφό μου, τη κοπέλα μου και τους φίλους μου, που ανέλαβαν υποστηρικτικό λόγο, τόσο σε ψυχολογικό, όσο και σε οικονομικό επίπεδο.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στην πρόοδο που συντελείται στον τομέα των υλικών. Τα σύνθετα υλικά αντιπροσωπεύουν την προσπάθεια ενίσχυσης των υλικών για χρήση σε διάφορες εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις για αντοχή και για βελτιωμένα φυσικά ή/και μηχανικά χαρακτηριστικά. Κύριος στόχος της ενδελχούς μελέτης των σύνθετων υλικών είναι η μεγιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και η εξάλειψη των «αδυναμιών» των αυτούσιων, καθαρών, μητρικών υλικών, σε συνδυασμό με την αποτελεσματικότητα, την απόδοση και το χαμηλό οικονομικό κόστος της μεθόδου παραγωγής τους.

Το αλουμίνιο (*Al*) είναι ένα από τα ελαφρύτερα μέταλλα (με ειδικό βάρος ίσο με το 1/3 του χάλυβα), με χαμηλή πυκνότητα ($2,7g/cm^3$), το οποίο υπάρχει σε αφθονία στον φλοιό της Γης. Η μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και η εύκολη κατεργασιμότητα, σε συνδυασμό με την εγγενή του ιδιότητα να δημιουργεί εύκολα κράματα, το έχουν καταστήσει αρκετά δημοφιλές στους διάφορους τομείς της βιομηχανίας, όπως και στη ναυπηγική.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επικεντρώνεται στην κατασκευή σύνθετων μεταλλικών υλικών μήτρας αλουμινίου (*Al*) με την προσθήκη νιφάδων (*flakes*) χαλκού (*Cu*), με τη μέθοδο χύτευσης σε άμμο και στη συνέχεια στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Το θεωρητικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του αλουμινίου και των κραμάτων του στο 1^ο κεφάλαιο, των σύνθετων υλικών, των μεθόδων κατασκευής και των κυριότερων ιδιοτήτων τους στο 2^ο κεφάλαιο, και των κυριότερων μεθόδων χύτευσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία στο 3^ο κεφάλαιο. Το πειραματικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την κατασκευή δοκιμίων σύνθετων υλικών με χύτευση και ανάμιξη αλουμινίου και νιφάδων χαλκού σε ποσοστό 95%*Al* - 5%*Cu* και 85%*Al* - 15%*Cu* κ.β. και ακολούθως τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των χυτών δοκιμίων μέσω δοκιμασιών αντοχής σε εφελκυσμό και κρούση, μέτρησης σκληρότητας και μέτρησης πυκνότητας. Τέλος, η εργασία περιλαμβάνει μικροσκοπική εξέταση, οπτικά και ηλεκτρονικά (*SEM/EDS*), εξωτερικών και εσωτερικών επιφανειών των χυτών δοκιμίων των σύνθετων υλικών που κατασκευάστηκαν. Τέλος, οι πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα αναλύονται και συγκρίνονται, αποδεικνύοντας τη διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών ανάλογα με το ποσοστό ανάμιξης του αλουμινίου - χαλκού.

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετα υλικά, μήτρα αλουμινίου, νιφάδες χαλκού, χύτευση σε άμμο, αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κρούση, σκληρότητα, μέτρηση πυκνότητας, μεταλλογραφία.

Abstract

In recent years, the rapid technological development is largely attributed to the progress made in the field of materials. Composite materials represent the effort to strengthen materials for use in various applications with increased requirements for strength and for improved physical and/or mechanical characteristics. The main objective of the thorough study of composite materials is to maximize their mechanical properties and eliminate the "weaknesses" of the pure, matrix materials, along with the efficiency, performance, and low economic cost of their production method.

Aluminum (Al) is one of the lightest metals (with a specific gravity equal to 1/3 that of steel), with a low density (2.7g/cm^3), which is abundant in the Earth's crust. Its high corrosion resistance and easy machinability, combined with its inherent ability to easily form alloys, have made it quite popular in various sectors of industry, including shipbuilding.

This Diploma Thesis focuses on the manufacture of composite metal materials of aluminum (Al) matrix with the addition of copper (Cu) flakes, using the sand-casting method and the study of their mechanical properties. The theoretical part of the work includes the literature review of aluminum and its alloys in the 1st chapter, composite materials, their manufacturing methods and their main properties in the 2nd chapter, and the main casting methods used in the industry in the 3rd chapter. The experimental part of the work includes the manufacture of composite material samples by sand-casting and mixing aluminum and copper flakes in a percentage of 95%Al - 5%Cu and 85%Al - 15%Cu by weight, and subsequently the determination the mechanical properties of the cast specimens through tensile and impact strength tests, hardness measurement and density measurement. Finally, this work includes the microscopic examination, optically and electronically (SEM/EDS), of external and internal surfaces of the cast specimens of the fabricated composites. Finally, the experimental measurements and results are analyzed and compared, demonstrating the differentiation of the mechanical properties of the composite materials depending on the aluminum - copper mixing percentage.

Key words: *Composite materials, aluminum matrix, copper flakes, sand-casting method, tensile test, impact test, hardness, density calculation, metallography.*

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Αλουμίνιο	12
1.1 Παραγωγή αλουμινίου	12
1.2 Ιστορική αναδρομή	15
1.3 Κράματα αλουμινίου.....	18
Κεφάλαιο 2: Σύνθετα Υλικά.....	24
2.1 Ορισμός.....	24
2.2 Ενίσχυση σύνθετων υλικών	24
2.3 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας.....	25
2.4 Μέθοδος κατασκευής σύνθετων υλικών.....	26
2.5 Ιδιότητες σύνθετων υλικών	28
Κεφάλαιο 3: Χύτευση Μετάλλων.....	30
3.1 Διαδικασία χύτευσης.....	30
3.2 Ιστορική αναδρομή	31
3.3 Είδη χύτευσης	36
3.3.1 Μέθοδοι χύτευσης αναλώσιμου καλουπιού	36
3.3.2 Μέθοδοι χύτευσης μη – αναλώσιμου καλουπιού	48
Κεφάλαιο 4: Κατασκευή χυτών δοκιμίων κρούσης/εφελκυσμού	56
4.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση μοντέλων δοκιμίων.....	56
4.2 Εξοπλισμός χύτευσης	63
4.3 Δημιουργία καλουπιών	67
4.4 Διαδικασία χύτευσης με 95% Al και 5% Cu	70
4.5 Διαδικασία χύτευσης με 85% Al και 15% Cu	75
4.6 Μηχανουργική Κατεργασία των χυτών δοκιμίων	82
Κεφάλαιο 5: Πειραματικός Έλεγχος Δοκιμίων	83
5.1 Δοκιμασία αντοχής σε κρούση	83

5.2 Δοκιμασία σε εφελκυσμό.....	91
5.3 Οπτική Μικροσκοπία	102
5.4 Σκληρομέτρηση	109
5.5 Μέτρηση πυκνότητας.....	113
5.6 Ηλεκτρονική μικροσκοπία και φασματοσκοπία ακτινών- <i>X</i> ενεργειακής διασποράς.....	117
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	135
Βιβλιογραφία	140

Κεφάλαιο 1: Αλουμίνιο

1.1 Παραγωγή αλουμινίου

Το αργίλιο ή αλουμίνιο (*Aluminium-Al*) αποτελεί ένα από τα πιο κοινά και χρησιμοποιούμενα μέταλλα, καθώς είναι το πιο άφθονο μέταλλο στον φλοιό της Γης (8% κ.β. του στερεού φλοιού) και κατατάσσεται ως το 3^ο μέταλλο σε αφθονία στον πλανήτη μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Είναι ένα ελαφρύ, μαλακό και ανθεκτικό μέταλλο, με ατομικό αριθμό 13 και ατομικό βάρος 26,98 g/mol. Έχει σημείο τήξης τους 660.2°C, και σημείο βρασμού τους 2470°C και ορισμένες κύριες ιδιότητες παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ		
	Στοιχεία	Μον. μέτρ.
Ατομικό βάρος	26,98	
Πυκνότητα (20 °C)	2,6898	gr/cm ³
Σημείο Τήξη	660,2	°C
Γραμμική διαστολή (0-100 °C)	23,5x10 ⁻⁶	(m/m)/°C
Ηλεκτρική Αντίσταση (20 °C)	2,69	μΩcm
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	68,3	GPa
Μέτρο Στρέψης (G)	25,5	GPa
Συντελεστής Poisson	0,34	

Εικόνα 1.1 Ιδιότητες καθαρού αλουμινίου (πηγή: <https://www.atem-oe.gr/alouminio-pliروفories/idiotites-alouminiou/idiotites-katharou-alouminiou-kramaton.html>)

Το αλουμίνιο είναι χημικώς πολύ δραστικό με αποτέλεσμα να μη βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο, αλλά αντίθετα να δημιουργεί ενώσεις με πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά, όπως για παράδειγμα ο βωξίτης (Εικόνα 1.1), ο οποίος αποτελεί επίσης την πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου. Ο βωξίτης είναι πέτρωμα, δηλαδή συνδυασμός ορυκτών, με κύρια μεταλλεύματα τα Υδροξείδια του Αργιλίου:

- Γκιμπσίτης $Al(OH)_3$,
- Διάσπορο α - $AlO(OH)$
- Βαιμίτης γ - $AlO(OH)$

και δευτερεύοντα μεταλλεύματα τα Υδροξείδια/Οξείδια του Σιδήρου:

- Γκαιτίτης α - $FeO(OH)$
- Αιματίτης Fe_2O_3

και το Οξείδιο του Τιτανίου: Ανατάσης TiO_2

Σε αυτά τα ορυκτά, το αλουμίνιο συναντάται σε διάφορες αναλογίες.

Η παραγωγή του αλουμινίου γίνεται σε διάφορα στάδια που περιγράφονται στη συνέχεια.

1. Πρώτο στάδιο: Εξόρυξη και κατεργασία βωξίτη

Ο βωξίτης εξορύσσεται από το κοίτασμα, στη συνέχεια πλένεται, θρυμματίζεται και διαλύεται σε πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου, σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Με αυτή τη διαδικασία απομονώνονται τα υδροξείδια του αργιλίου με το καυστικό νάτριο και απομακρύνονται οι υπόλοιπες προσμίξεις. Τέλος, απομακρύνεται και το καυστικό νάτριο και μένει μόνο το οξείδιο του νατρίου, το οποίο θερμαίνεται στους $1100\text{ }^\circ\text{C}$, με στόχο να απομακρυνθεί το νερό (Εικόνα 1.1).

2. Δεύτερο στάδιο: Παραγωγή Αλουμίνας

Ο θρυμματισμένος και ξηραμένος βωξίτης αλέθεται σε ειδικούς μύλους, παρουσία μιας μικρής ποσότητας νερού. Έτσι, παράγεται μια παχύρευστη πάστα (αλουμίνα), που συλλέγεται σε ειδικά δοχεία και θερμαίνεται με τη βοήθεια ατμού, προς αφαίρεση του πυριτίου που περιέχεται στο μίγμα (Εικόνα 1.2).

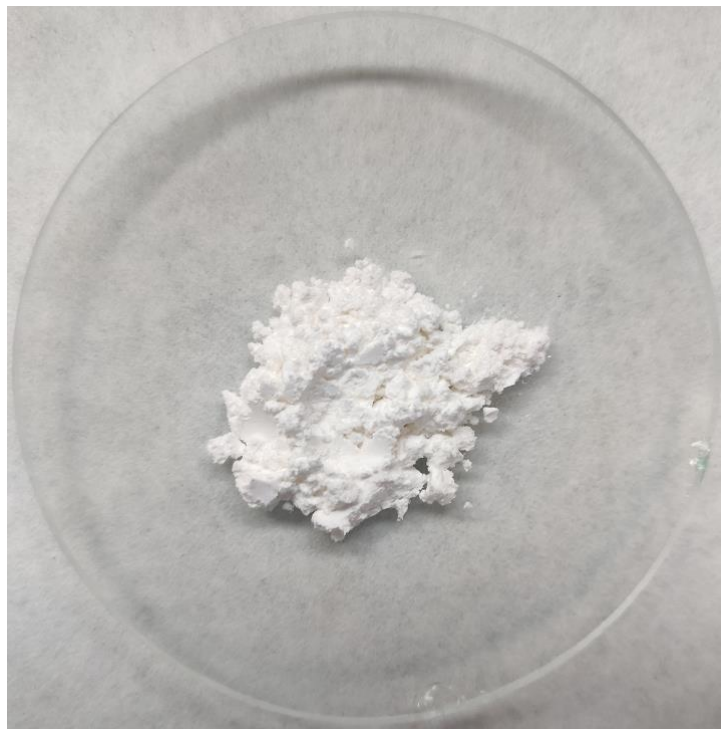
3. Τρίτο στάδιο: Ηλεκτρόλυση

Το οξείδιο του αργιλίου διαλύεται σε τήγμα κρυολίθου (αλογονούχο ορυκτό του νατρίου), μέσα σε μια μεγάλη ηλεκτρολυτική λεκάνη η οποία διαθέτει για άνοδο ηλεκτρόδιο άνθρακα και για κάθοδο την ίδια την εσωτερική επένδυση της λεκάνης (από ανθεκτικό μέταλλο). Το σύστημα αυτό διατρέχει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, με χαμηλή τάση (*Volts*), αλλά εξαιρετικά υψηλής έντασης, της τάξης των 150.000 Ampere . Το περιέχον αλουμίνιο λιώνει και το τήγμα συλλέγεται στον πυθμένα της λεκάνης. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά ηλεκτροβόρα και χρονοβόρα. Γι' αυτόν τον λόγο τα εργοστάσια παραγωγής αλουμινίου παράγουν επιτόπου την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν είτε συνδέονται με πολλαπλές πηγές ενέργειας (Παπαγεωργίου 2023). Στην Εικόνα 1.4 απεικονίζεται το καθαρό αλουμίνιο με καθαρότητα άνω του 99%.



Εικόνα 1.2 Ακατέργαστος Βωξίτης

(πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1b/150322-Bauxit.jpg>)



Εικόνα 1.3 Αλουμίνα (οξείδιο του Αργιλίου)

(πηγή: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Aluminium_oxide_A.j)



Εικόνα 1.4 Καθαρό αλουμίνιο

(πηγή: https://media.snl.no/media/185369/standard_compressed_lutetium.jpg)

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η ανθρωπότητα ξεκίνησε να χρησιμοποιεί τα μέταλλα για διάφορες χρήσεις περίπου από το 5.000 π.Χ. Τα τελευταία 200 χρόνια, δηλαδή μετά τη βιομηχανική επανάσταση του 18^{ου} και 19^{ου} αιώνα, η χρήση του μετάλλου έχει συνδεθεί άρρηκτα με την τεχνολογική και επιστημονική εξέλιξη αλλά και με την ανθρώπινη δραστηριότητα, γενικά. Πιο συγκεκριμένα εδώ και κάτι παραπάνω από έναν αιώνα, έχει ξεκινήσει η βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου. Η δυσκολία του αλουμινίου να υπάρχει σε απλές ενώσεις μόνο του στη φύση, σε αντίθεση με άλλα ορυκτά μέταλλα όπως ο χαλκός, ο σίδηρος και ο χρυσός, καθυστέρησε έντονα τον άνθρωπο να βρει τρόπο να το απομονώσει. Έτσι, η ανακάλυψή του και η μετέπειτα παραγωγή του έγιναν δυνατές μετά την ανακάλυψη και την ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού, μιας και ακόμη και σήμερα η ηλεκτρόλυση είναι η βασική μέθοδος διαχωρισμού του, όπως ήδη προαναφέρθηκε (Χαιρέτης, 2012).

Το αλουμίνιο έγινε ευρέως γνωστό στις αρχές του 19^{ου} αιώνα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές μαρτυρίες και ιστορικές πηγές που κάνουν λόγο για χρήση του μεταλλεύματος από την αρχαιότητα. Οι αρχαίοι Κινέζοι, Αιγύπτιοι, Έλληνες αλλά και Ρωμαίοι φαίνεται πως είχαν ανακαλύψει το αλουμίνιο (σε μορφή αργίλου) και το

χρησιμοποιούσαν προς κατασκευή αγγείων και άλλων αντικειμένων καθημερινής χρήσης, έχοντας, κατά πάσα πιθανότητα, πλήρη γνώση της ύπαρξης του μετάλλου, καθώς και των ιδιοτήτων του. Η χρήση διάφορων αργιλοπυριτικών ενώσεων ήταν έντονη στη κεραμική, όπως επίσης και στην υφαντουργία, την ιατρική αλλά και ως ενισχυτικό υλικό των οχυρών τους, βάφοντας με τις τηγμένες ενώσεις το ξύλο.

Κατά τον Μεσαίωνα, οι επιστήμονες της εποχής (αλχημιστές), υποπτεύθηκαν την ύπαρξη ενός μετάλλου εντός του αργίλου, το οποίο με τη κατάλληλη μέθοδο «μετάλλαξης», θα τους πρόσφερε τον πολυπόθητο τότε χρυσό. Το 1761 προτάθηκε για πρώτη φορά το όνομα 'Alume' από τον Γάλλο χημικό *Louis-Bernard Guyton de Morveau* (1737-1816), ως βάση του 'alum-', το οποίο στη γαλλική γλώσσα σήμαινε το μέταλλο που δεν υπήρχε ακόμη στην καθαρή του μορφή. Περίπου μισό αιώνα αργότερα, το 1807, ο βρετανός χημικός *Sir Humphry Davy* (1778-1829), πρότεινε το όνομα 'aluminium' για το μέταλλο. Λίγο αργότερα συμφώνησε με το όνομα 'aluminum', το οποίο χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για το αλουμίνιο.

Στον επόμενο αιώνα το όνομα 'aluminum' επικράτησε, με την συμπληρωματική προσθήκη της κατάληξης '-ium' ('aluminium'), για να μη ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα μέταλλα. Το 1925 η Αμερικανική Εταιρεία Χημείας αποφάσισε να αλλάξει το όνομα ξανά σε 'aluminum' στις ΗΠΑ, παρόλο που στον υπόλοιπο πλανήτη η ορολογία έμεινε ως είχε ('aluminium – αλουμίνιο').

Το 1825, ο σπουδαίος Δανός χημικός και φυσικός *Hans Christian Ørsted* (1777-1851) παρήγαγε για πρώτη φορά στην ιστορία καθαρό αλουμίνιο, κάνοντας χρήση χλωριδίου του αλουμινίου ($AlCl_3$) και αμάγμα ποτάσας, δηλαδή ένα κράμα ποτάσας (υδροξείδιο του Καλίου – KOH) και ψευδαργύρου (Zn). Προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος, σε κατάσταση χαμηλής πίεσης, κατάφερε να απομακρύνει τον ψευδάργυρο, με αποτέλεσμα το εναπομείναν υλικό να είναι καθαρό αλουμίνιο.

Παρόλη τη σπουδαιότητα της ανακάλυψης αυτής από τον *Ørsted*, η διαδικασία απομόνωσης του αλουμινίου από τα υπόλοιπα στοιχεία ήταν ιδιαίτερα δύσκολη και πολύ δαπανηρή, καθιστώντας το νέο μέταλλο ασύμφορο στην χρήση. Έτσι, για αρκετά χρόνια αργότερα το αλουμίνιο θεωρούνταν πολύτιμο μέταλλο, που χρησιμοποιούνταν μόνο από πολύ ευκατάστατες οικογένειες για κατασκευή αντικειμένων πολυτελείας, όπως σερβίτσια και άλλα.

Μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το αλουμίνιο, λόγω της ακριβής, ακόμη, παραγωγής του, δεν είχε γνωρίσει έντονη δημοτικότητα. Το 1886 δύο επιστήμονες, ο Γάλλος *Paul Toussaint Heroult* (1863-1914) και ο Αμερικάνος *Charles Martin Hall* (1863-1914), εφεύρασαν μια νέα μέθοδο παραγωγής του αλουμινίου, μέσω της ηλεκτρόλυσης ενός διαλύματος αλουμίνιας. Οι δύο επιστήμονες δεν συνεργάστηκαν μεταξύ τους για την εφεύρεση αυτή, καθώς εργάζονταν ξεχωριστά, χωρίς να γνωρίζει ο ένας την εργασία του άλλου. Η μέθοδος αυτή ήταν τόσο αποδοτική που είναι μέχρι και σήμερα η κύρια μέθοδος παραγωγής αλουμινίου (μέθοδος *Hall – Heroult*). (Χαιρέτης 2012)

Τα επόμενα χρόνια, ανοίγουν οι πρώτες εταιρείες παραγωγής αλουμινίου στη Γαλλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ. Μέχρι το 1900 η ετήσια παραγωγή αλουμινίου έφτανε τους 8 τόνους. Μέσα στον 20^ο αιώνα, η παραγωγή του αλουμινίου αυξήθηκε κατακόρυφα, με ορισμένες εταιρείες, όπως η *Northern Aluminium Company*, μετέπειτα *Alcoa*, να μεσουρανούν. Η συγκεκριμένη εταιρεία είχε φτάσει σε τόσο υψηλό τεχνολογικό επίπεδο για την εποχή, που παρήγαγε ένα τόνο αλουμινίου την ημέρα, αριθμός απίστευτος για την εποχή. Τα επόμενα χρόνια, το αλουμίνιο «κατακτά» την αγορά των υλικών, σημειώνοντας ραγδαία αύξηση της παραγωγής του από τις εταιρείες. Η μέθοδος παραγωγής του τελειοποιήθηκε με τον καιρό και το μέταλλο έγινε ένα από τα πιο πολυχρησιμοποιούμενα και εύχρηστα μέταλλα στον πλανήτη, σε συνδυασμό με τις ιδιότητές του και την ευελιξία στο χειρισμό του. Σήμερα, τα ηνία της παραγωγής αλουμινίου κρατάει η Κίνα, η οποία, τα τελευταία 20 χρόνια κυρίως παράγει αλουμίνιο με τεράστια διαφορά από τις υπόλοιπες χώρες παραγωγούς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Παρατηρείται ότι η ετήσια παραγωγή αλουμινίου παρουσιάζει αύξηση κάθε χρόνο, με κυρίαρχη χώρα την Κίνα.

Η παγκόσμια παραγωγή ακατέργαστου αλουμινίου (τ. κ 1000)

Περιοχή	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Αφρική	1,178	1,753	1,742	1,687	1,691	1,679	1,668	1,643	1,605	1,590
Ασία (εκτός Κίνας)	2,221	2,391	2,500	3,001	3,442	3,951	4,415	4,395	4,140	4,499
Συμ. Συμπερ. Κόλπου	n/a	n/a	2,724	5,104	5,197	5,149	5,331	5,654	5,833	5,889
Κίνα	2,794	7,806	17,331	31,518	32,641	35,905	36,485	35,795	37,337	38,837
Βόρεια Αμερική	6,041	5,382	4,689	4,469	4,027	3,950	3,774	3,809	3,976	3,880
Νότια Αμερική	2,167	2,391	2,305	1,325	1,361	1,378	1,164	1,079	1,006	1,163
Ευρωπ. Ένωση*	2,951	3,256	2,298	2,141	2,199	2,135	2,061	2,009	1,926	1,897
Υπολ. Ευρώπη	4,539	6,038	5,755	5,433	5,561	5,640	5,721	5,597	5,561	5,571
Ωκεανία	2,094	2,252	2,277	1,978	1,971	1,817	1,917	1,916	1,912	1,888
Λοιποί	0,672	0,636	0,732	1,800	1,800	1,800	1,630	1,760	2,029	1,878
Σύνολο	24,657	31,905	42,353	58,456	59,89	63,404	64,166	63,657	65,325	67,092

Εικόνα 1.5 Παγκόσμια παραγωγή αλουμινίου 2000-2020 (πηγή: <https://www.aludata.gr/%CE%B7-%CF%80%CF%81%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%AE%CF%82-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE-%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CF%85%CE%BC%CE%B9%CE%BD%CE%AF%CE%BF%CF%85-%CE%B1%CE%BD%CE%AC/>)

1.3 Κράματα αλουμινίου

Το αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με τη χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι τελικές ιδιότητες κάθε προϊόντος που θα παραχθεί από αλουμίνιο επιτυγχάνονται με την επιλογή του κατάλληλου κράματος αλουμινίου, τη μέθοδο επεξεργασίας του (μηχανική πλαστική διαμόρφωση ή χύτευση) και τις θερμικές κατεργασίες (βαφή, τεχνητή γήρανση, ανόπτηση κτλ.) που θα υποστεί. Για την παραγωγή κραμάτων αλουμινίου, εφαρμόζεται η μέθοδος της τήξης, της κραματοποίησης με προσθήκη ορισμένων στοιχείων και της χύτευσης. Το διεθνώς παραγόμενο αλουμίνιο χωρίζεται σε 2 μεγάλες κατηγορίες:

- το αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου **για χρήση σε χυτήρια**. Η βασική χρήση αυτής της κατηγορίας είναι για παραγωγή **χυτών αντικειμένων**.
- το αλουμίνιο ή κράματα αλουμινίου **για μηχανική κατεργασία διαμόρφωσης**, που χρησιμοποιείται για την άμεση παραγωγή τεμαχίων και **τελικών προϊόντων έλασης, διέλασης, ολκής, κλπ.**

α) Κράματα χυτών (*Casting Alloys*)

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα *EN*, τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται, έχουν τυποποιηθεί και καταταχθεί, ανάλογα με τα στοιχεία κραματοποίησης. Συμβολίζονται με 5 αριθμητικά ψηφία, το πρώτο εκ των οποίων προσδιορίζει την ομάδα του κράματος, βάσει του κυριότερου κραματοποιού στοιχείου. Το πέμπτο ψηφίο είναι πάντα 0. Πριν τον αριθμό αυτό προηγείται ο συμβολισμός που δείχνει τη χρήση του κράματος. Οι σειρές αυτές είναι οι εξής:

- Σειρά 1XXX0: Κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο πάνω από 99%
- Σειρά 2XXX0: Κράματα αλουμινίου – χαλκού (*Al - Cu*)
- Σειρά 3XXX0: Κράματα αλουμινίου – πυριτίου + χαλκό και/ή μαγνήσιο (*Al - Si + Cu/Mn*)
- Σειρά 4XXX0: Κράματα αλουμινίου –πυριτίου (*Al - Si*)
- Σειρά 5XXX0: Κράματα αλουμινίου – μαγγανίου (*Al - Mn*)
- Σειρά 6XXX0: Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
- Σειρά 7XXX0: Κράματα αλουμινίου – ψευδαργύρου (*Al - Zn*)
- Σειρά 8XXX0: Κράματα αλουμινίου – κασσίτερου (*Al - Sn*)
- Σειρά 9XXX0: Μητρικά κράματα

Τα κράματα αυτά περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κραματικών στοιχείων, όπως πυρίτιο και χαλκό, από ότι τα κράματα για κατεργασίες διαμόρφωσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει εσωτερικούς πόρους ή κενά και να δημιουργηθούν αργότερα ρωγμές στα χυτά, όταν τοποθετηθεί σε αυτά φορτίο.

Σειρά 2XXX0: Κράματα αλουμινίου – χαλκού (*Al - Cu*)

- Κατεργάζονται θερμικά και χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι ή άμμο.
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Μερικά έχουν υψηλή αντοχή σε κάμψη
- Χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη, αυτοκίνητα, σκάφη και μηχανές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 201.0, 203.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131 – 450 *MPa*

Σειρά 3XXX0: Κράματα αλουμινίου – πυριτίου + χαλκό και/ή μαγνήσιο (Al – Si +Cu/Mn)

- Κατεργάζονται θερμικά και χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι, σε άμμο ή σε χυτόπρεσσα
- Έχουν εξαιρετική χυτευσιμότητα
- Έχουν υψηλή αντοχή, ορισμένα έχουν υψηλή αντοχή σε κάμψη
- Χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα αυτοκινήτου, πιστόνια, αντλίες και ηλεκτρολογικά εξαρτήματα.
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 356.0, A356.0, 359.0, A360.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131 – 275 MPa

Σειρά 4XXX0: Κράματα αλουμινίου –πυριτίου (Al - Si)

- Δεν κατεργάζονται θερμικά, χυτεύονται σε άμμο, μεταλλικό καλούπι και χυτόπρεσσα
- Έχουν εξαιρετική χυτευσιμότητα, ακόμη και για περίπλοκα χυτά
- Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξοπλισμό ιατρικών, παραθαλάσσιες εφαρμογές και διάφορα διακοσμητικά
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 413.0, 443.0
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 131 – 275 MPa

β) Κράματα κατεργασιών διαμόρφωσης (Wrought Alloys)

Το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου που προορίζονται για μηχανική επεξεργασία (έλαση, διέλαση, σφυρηλασία, ολκή κλπ.) προσδιορίζονται από το **Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 573** . Συμβολίζονται ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, βάσει διεθνώς αποδεκτού συστήματος. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιεί τέσσερις αριθμούς. Το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία δείχνει την ομάδα κράματος σύμφωνα με το σε μεγαλύτερη αναλογία ευρισκόμενο στοιχείο. Οι συγκεκριμένες σειρές είναι οι εξής:

- Σειρά 1XXX: Κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο πάνω από 99%
- Σειρά 2XXX: Κράματα αλουμινίου – χαλκού (Al - Cu)
- Σειρά 3XXX: Κράματα αλουμινίου – μαγγανίου (Al - Mn)
- Σειρά 4XXX: Κράματα αλουμινίου –πυριτίου (Al - Si)

- Σειρά 5XXX: Κράματα αλουμινίου - μαγνησίου (*Al - Mg*)
- Σειρά 6XXX: Κράματα αλουμινίου – μαγνησίου + πυριτίου (*Al – Mg + Si*)
- Σειρά 7XXX: Κράματα αλουμινίου – ψευδαργύρου (*Al - Zn*)
- Σειρά 8XXX: Διάφορα άλλα κράματα αλουμινίου

Τα κράματα όλων των παραπάνω σειρών μπορούν να υποστούν σκλήρυνση μέσω κάποιας μηχανικής επεξεργασίας. Όμως μόνο τα κράματα της 2^{ης}, της 6^{ης}, της 7^{ης} και της 8^{ης} σειράς μπορούν να υποστούν σκλήρυνση μέσω θερμικής κατεργασίας, η οποία προτιμάται. Έτσι λοιπόν, τα κράματα που ανήκουν στις 4 αυτές σειρές ονομάζονται θερμοσκληρυνόμενα ενώ τα κράματα των υπόλοιπων ομάδων θερμοπλαστικά ή μη θερμοσκληρυνόμενα (1^η, 3^η, 4^η και 5^η σειρά) (Γεωργάτης 2023).

Σειρά 1XXX: Κράματα με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο πάνω από 99%

- Σκληραίνονται με ενδοτράχυνση (ή εργοσκληρυνση, μέθοδος αύξησης της αντοχής και της σκληρότητας ενός μετάλλου, με παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής)
- Διαμορφώνονται εύκολα
- Παρουσιάζουν καλή αντοχή στη διάβρωση
- Έχουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές και χημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικές σειρές: 1100, 1350
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 69 – 186 *MPa*

Σειρά 2XXX: Κράματα αλουμινίου – χαλκού (*Al - Cu*)

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Κακή αντοχή σε διάβρωση και ατμοσφαιρικές συνθήκες
- Έχουν υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Χρησιμοποιούνται σε μεταφορικά μέσα (κυρίως αεροπλάνα και τρένα)
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 2014, 2017, 2024, 2219, 2195
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 186 – 427 *MPa*

Σειρά 3XXX: Κράματα αλουμινίου – μαγγανίου (Al - Mn)

- Εύκολη διαμορφωσιμότητα και κατεργασία
- Καλή αντοχή στη διάβρωση
- Έχουν καλή συγκολλησιμότητα και μέτρια αντοχή
- Χρησιμοποιούνται σε αγωγούς μεταφοράς θερμότητας, συσκευασίες αι εφαρμογές στέγης και τοιχωμάτων κτιρίων
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 3003, 3004, 3005
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 110 – 282 *MPa*

Σειρά 4XXX: Κράματα αλουμινίου – πυριτίου (Al - Si)

- Κατεργάζονται θερμικά
- Έχουν καλά χαρακτηριστικά ροής
- Έχουν μέτρια αντοχή
- Χρησιμοποιούνται σε έμβολα, σφυρήλατα πολύπλοκου σχήματος
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 4032 και υλικό ηλεκτροδίων 4043
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172 – 380 *MPa*

Σειρά 5XXX: Κράματα αλουμινίου - μαγνησίου (Al - Mg)

Η κυρία σειρά κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιείται είναι η 5^η. Η σειρά 5000, δηλαδή τα κράματα αλουμινίου – μαγνησίου έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Πολύ καλή συγκολλησιμότητα
- Σκληραίνονται με ενδοτράχυνση
- Πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά, και ιδιαίτερα στο θαλάσσιο περιβάλλον
- Μέτριες μηχανικές ιδιότητες (αντοχή στον εφελκυσμό, θλίψη, κρούση κλπ.)
- Χρησιμοποιούνται σε υποδομές κτιρίων και κατασκευών, αυτοκίνητα, κρυογενικά υλικά και διάφορες εφαρμογές στη θάλασσα
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 172 – 380 *MPa*

Εξ αιτίας των ελκυστικών ιδιοτήτων τους, τα κράματα της 5^{ης} σειράς έχουν ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία, και ιδιαίτερα σε κλάδους όπως η **ναυπηγική** (κυρίως), στη χημική βιομηχανία, στις οικοδομές, στα μεταφορικά μέσα κ.α. Τα πιο χαρακτηριστικά κράματα της σειράς είναι 5005, 5052, 5754, 5083, 5086, 5182 (Γεωργάτης 2023).

Σειρά 6XXX: Κράματα αλουμινίου – μαγνησίου + πυριτίου (*Al – Mg + Si*)

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση
- Έχουν εξαιρετική ολκιμότητα
- Έχουν μέτρια αντοχή
- Χρησιμοποιούνται σε υποδομές κτιρίων και κατασκευών, μέσα μεταφοράς και σε διάφορες παραθαλάσσιες εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 6061, 6063, 6111
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 125 – 400 *MPa*

Σειρά 7XXX: Κράματα αλουμινίου – ψευδαργύρου (*Al - Zn*)

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν πολύ καλή αντοχή
- Έχουν εξαιρετική ακαμψία
- Χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα και διάφορες αεροδιαστημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 7005, 7075, 7475, 7150
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220 – 605 *MPa*

Σειρά 8XXX: Διάφορα άλλα κράματα αλουμινίου

- Υφίστανται θερμική κατεργασία
- Έχουν μεγάλη αγωγιμότητα
- Έχουν μεγάλη αντοχή και σκληρότητα
- Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές
- Αντιπροσωπευτικά κράματα: 8017, 8176, 8081, 8280, 8090
- Εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 117 - 241 *MPa*

Κεφάλαιο 2: Σύνθετα Υλικά

2.1 Ορισμός

Σύνθετα υλικά (*composite materials*) είναι υλικά τα οποία αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων χημικά **διακριτών και αδιάλυτων φάσεων**, με αναγνωρίσιμη, ξεχωριστή επιφάνεια μεταξύ τους (**διεπιφάνεια**). Είναι παρασκευασμένα με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι ιδιότητές τους και η δομική τους απόδοση να είναι ανώτερες από εκείνες των εκάστοτε συστατικών τους. Τα συνηθέστερα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούμε είναι α) πολυμερικής μήτρας (*polymer – matrix*), δηλαδή το συστατικό (φάση) που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό (μήτρα) είναι πολυμερές, β) μεταλλικής μήτρας (*metal – matrix*) όπως τα υλικά που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια και γ) κεραμικής μήτρας (*ceramic – matrix*). Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ πλήθος εφαρμογών όπως σε αεροσκάφη, στη διαστημική μηχανική, σε πλωτές δομές, σε αγωγούς και σωλήνες, σε ηλεκτρονικές διατάξεις και κυκλώματα, σε αυτοκίνητα, σκάφη αλλά και σε διάφορα αθλητικά είδη. Η πρώτη τους εμφάνιση χρονολογείται γύρω στο 4.000 π.Χ. με την ενίσχυση πήλινων τούβλων (μήτρα) με προσθήκη αχύρου (ενισχυτικές ίνες). Άλλο ένα κλασικό παράδειγμα σύνθετου υλικού είναι το σκυρόδεμα, στο οποίο προστέθηκαν βέργες από χάλυβα, με στόχο να ενισχυθεί η αξιοποιήσιμη αντοχή στον εφελκυσμό μιας κατασκευής. Τα σύνθετα υλικά εμφανίστηκαν ως ξεχωριστή κατηγορία υλικών τον 20^ο αιώνα, με κύριο στόχο να καλύψουν τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες για υλικά με προηγμένες ιδιότητες σε διάφορους τομείς. (*Askeland 2017*).

2.2 Ενίσχυση σύνθετων υλικών

Μήτρα, ονομάζεται η φάση στην οποία βρίσκεται το συστατικό του υλικού με το μεγαλύτερο ποσοστό. Η φάση αυτή, μεταλλική σε στη συγκεκριμένη περίπτωση περιβάλλει την άλλη φάση, η οποία ονομάζεται **ενίσχυση ή διεσπαρμένη φάση**. Το υλικό που προκύπτει από την ανάμειξη των 2 αυτών φάσεων και οι ιδιότητές του, εξαρτώνται σημαντικά από τον συνδυασμό και τα ποσοστά των 2 αυτών φάσεων. Οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού που προκύπτει επηρεάζονται επίσης από τη γεωμετρία των σωματιδίων της διεσπαρμένης φάσης, το μέγεθος, την κατανομή καθώς και τον προσανατολισμό τους. Για τους λόγους αυτούς, τα σύνθετα υλικά που φέρουν

ενίσχυση με την **μορφή κόκκων** ονομάζονται **ισοτροπικά**, καθώς εμφανίζουν ίδιες τιμές ιδιοτήτων σε κάθε διεύθυνση κατά την οποία γίνεται η εξέτασή τους. Αντίθετα τα υλικά που ενισχύονται με την **μορφή ινών** χαρακτηρίζονται ως **ορθοτροπικά**, λόγω του πλήθους τιμών των ιδιοτήτων που εμφανίζουν κατά τη μελέτη τους σε διαφορετικές διευθύνσεις, λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας και του προσανατολισμού των ινών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η κατασκευή σύνθετου υλικού μήτρας αλουμινίου με ενίσχυση χαλκού με τη μορφή κόκκων. Έτσι, το σύνθετο υλικό που προέκυψε είναι προφανώς ισοτροπικό. Συνήθως, η κοκκώδης φάση είναι σκληρότερη και έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία από το υλικό της μήτρας. Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκων χωρίζονται και αυτά σε 2 υποκατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά με κόκκους μεγάλου μεγέθους
- Σύνθετα υλικά με ενίσχυση διασποράς

Στην ενίσχυση με διασπορά, οι κόκκοι έχουν μέγεθος $0,01 - 0,1 \mu m$ και είναι συγκριτικά πολύ μικρότεροι από τους κόκκους μεγάλου μεγέθους. Όταν το μέγεθος των κόκκων είναι τόσο μικρό, τότε οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ μήτρας και κόκκων λαμβάνουν χώρα σε μοριακό επίπεδο. Στη μητρική φάση εφαρμόζεται το μεγαλύτερο ποσοστό του ασκημένου φορτίου και, παράλληλα, οι διεσπαρμένοι κόκκοι προστατεύουν το σύνθετο υλικό από διάφορες μικρό-παραμορφώσεις, αλλά και μεγαλύτερης κλίμακας στρεβλώσεις.

2.3 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας

Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται ως μήτρες σε σύνθετα υλικά **μεταλλικής μήτρας** (*Metal Matrix Composites – MMC*) είναι κατά κύριο λόγο το αλουμίνιο, το κράμα αλουμινίου – λιθίου (το οποίο είναι ελαφρύτερο από το αλουμίνιο), το μαγνήσιο, το τιτάνιο ή υπερκράματα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα ως ενισχυτικά έχουν συνήθως τη μορφή κόκκων, τη μορφή ινών ή πολλαπλών επάλληλων στρώσεων υλικών. Μερικά από αυτά είναι ο γραφίτης, οξειδία του αλουμινίου, καρβίδιο πυριτίου, βόριο, μολυβδένιο και βολφράμιο. Τα πλεονεκτήματα των μεταλλικών μητρών έναντι των πολυμερικών μητρών είναι το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, αυξημένη δυσθραυστότητα και ολκιμότητα, και η αντίσταση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Παρουσιάζουν ωστόσο και μειονεκτήματα όπως η υψηλότερη πυκνότητα καθώς

επίσης και πιο δύσκολη επεξεργασία των μερών του σύνθετου υλικού. Ορισμένα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας και οι εφαρμογές τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.6.

Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας και εφαρμογές τους		
Ύνες	Μήτρα	Εφαρμογές
Γραφίτης	Μαγνήσιο	Κατασκευή διαστημικών σκαφών και δορυφόρων
	Μόλυβδος	Ελάσματα μπαταριών
	Χαλκός	Ηλεκτρικές επαφές και έδρανα
Βόριο	Αλουμίνιο	Πτερύγια συμπιεστών και δομικά υποστολώματα
	Μαγνήσιο	Δομές κεραίων
	Τιτάνιο	Πτερύγια αεριοθούμενων κινητήρων
Αλουμίνια	Αλουμίνιο	Διατάξεις περιορισμού υπεραγωγών σε αντιδραστήρες πυρηνικής σχάσης
	Μόλυβδος	Ελάσματα μπαταριών
	Μαγνήσιο	Συστήματα μετάδοσης κίνησης ελικοπτήρων
Καρβίδιο πυριτίου	Αλουμίνιο, τιτάνιο	Εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών
	Υπερκράμα (με βάση κοβαλτίου)	Στοιχεία κινητήρων (υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας)
Μολυβδένιο, βολφράμιο	Υπερκράμα	Στοιχεία κινητήρων (υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας)

Εικόνα 1.6 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας και εφαρμογές τους (Askeland 2017)

Παρόλα αυτά, σαν ενισχυτικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, πέρα από αυτά που αναφέρονται στον Πίνακα 1.3. Όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια, η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται τη δημιουργία σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας αλουμινίου με προσθήκη ενίσχυσης νιφάδων χαλκού. Ο χαλκός είναι ένα μέταλλο σκληρότερο από το αλουμίνιο, το οποίο είναι ένα σχετικά μαλακό μέταλλο. Επίσης, έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και κρούση. Στην ουσία, η ανάμειξη δύο μετάλλων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων υλικών, με βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με αυτές των επιμέρους υλικών όταν χρησιμοποιούνται μεμονωμένα.

2.4 Μέθοδος κατασκευής σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, τα οποία έχουν ενισχυθεί με σωματίδια άλλου υλικού, μπορούν να παραχθούν με τους εξής τρόπους:

- Πρεσάρισμα και ομογενοποίηση: (*Powder Metallurgy – ‘press and sinter’*): Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για το συνδυασμό μεταλλικών υλικών (μήτρες) με ενισχυτικά σωματίδια σε μορφή σκόνης και την ομογενοποίησή τους (συσσωμάτωση) σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και πίεσης.
- Κατασκευή με επικάλυψη (*Composite Coating*): Κατά τη μέθοδο αυτή, το ενισχυτικό υλικό εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου μέσω

διαδικασιών όπως ψεκασμού του ενισχυτικού πάνω στο μητρικό μέταλλο (*spray deposition*) έγχυσης υλικού πάνω στη μήτρα με αντλία (*pumping*) ή εφαρμογής ηλεκτρικών πεδίων στην επιφάνεια των δύο υλικών μαζί, ώστε να επηρεαστεί η δομή τους και να αναμιχθούν πιο εύκολα (*electrobracing*), κλπ.

- Πυρομεταλλουργία (*Pyrometallurgy*): Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ένωση των μεταλλικών ενισχυτικών υλικών με μεταλλικές μήτρες, με την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Συγκόλληση μεταλλικών τμημάτων με ενίσχυση σωματιδίων: Η συγκόλληση (π.χ. ηλεκτροσυγκόλληση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση τμημάτων μετάλλου με σωματίδια σε μορφή σκόνης.
- Κύλιση (*Rolling*): Κατά τη διαδικασία αυτή, τα σωματίδια ενίσχυσης ενσωματώνονται στο χυτό μέταλλο με τη βοήθεια υψηλής θερμοκρασίας και άσκησης πίεσης μέσω ενός μεταλλικού κυλίνδρου.
- Σφυρηλάτηση (*Forging*): Η μέθοδος αυτή εφαρμόζει υψηλή πίεση ώστε το μέταλλο και τα ενισχυτικά σωματίδια να συνθλιβούν και να ομογενοποιηθούν.

Γενικά, οι παραπάνω τεχνικές χρησιμοποιούνται τόσο για την κατασκευή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση σωματιδίων, όσο και για την κατασκευή παρόμοιων υλικών με ενίσχυση ινών.

Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά τρεις ακόμα μέθοδοι κατασκευής σύνθετων υλικών με ενίσχυση ίνας, με την τεχνική *Lay up* (*Balasubramanian 2018*) η οποία χρησιμοποιείται στη ναυπηγική τεχνολογία:

- Μέθοδος *Wet Lay – up*: Κατά τη μέθοδο αυτή, απλώνεται ένα στρώμα ασταριού πάνω στο μητρικό υλικό. Στην συνέχεια, τοποθετείται το ύφασμα των ινών που προορίζεται για ενίσχυση του μητρικού υλικού και κατόπιν επαλείφεται με διάλυμα εποξειδικής ρητίνης. Τέλος, το σύνθετο υλικό αφήνεται να στερεοποιηθεί για μερικές ώρες, καθώς η ρητίνη απαιτεί χρόνο για να σκληρυνθεί.
- Μέθοδος *Spray Lay – up*: Κατά τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται πιστόλι χειρός για τον ψεκασμό ρητίνης και τεμαχισμένων ινών σε ένα καλούπι. Η ροή του πιστολιού στοχεύει στο καλούπι και αφήνεται να στερεοποιηθεί σε θερμοκρασία δωματίου (20° C περίπου). Πριν την πλήρη στερεοποίηση του δοκιμίου, το

ψεκασμένο μίγμα ρητίνης και ινών τυλίγεται για να αποφευχθεί δημιουργία φυσαλίδων αέρα και κενών.

- Μέθοδος *Hand Lay - up*: Με τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται, αρχικά, χειροκίνητη τοποθέτηση στρώσεων ενισχυτικών υφασμάτων, που αποτελούνται από ίνες ενισχυτικού υλικού, και στη συνέχεια επίστρωση των υφασμάτων με εποξειδική ρητίνη με κατάλληλη σειρά. Στη συνέχεια, το υλικό συμπίεζεται με κύλινδρο για την ομοιογενή διαβροχή των ινών με τη ρητίνη. Τέλος, το σύνθετο αφήνεται να στερεοποιηθεί εντελώς σε θερμοκρασία δωματίου.

2.5 Ιδιότητες σύνθετων υλικών

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών, συγκριτικά με τα παραδοσιακά υλικά, είναι τα εξής:

1. Υψηλές μηχανικές ιδιότητες

Είναι μη αγώγιμα, έχουν αυξημένη αντοχή στη διάβρωση, την υγρασία και τη γήρανση, μεγάλη ανθεκτικότητα κατά της κόπωσης και εμφανίζουν καλή συμπεριφορά σε κρουστικές καταπονήσεις και σε ερπυσμό.

2. Ευελιξία στον σχεδιασμό

Συνδυάζουν μικρή πυκνότητα και υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό, και προτιμώνται πολύ στην χρήση σε διάφορες κατασκευές, καθώς επιτυγχάνεται η απαραίτητη αντοχή με μικρότερο βάρος, συγκριτικά με άλλα υλικά, όπως για παράδειγμα ο χάλυβας.

3. Μικρός όγκος ενίσχυσης

Με τη χρήση τους, ο αρχικός σχεδιασμός μια κατασκευής μένει αμετάβλητος, χωρίς κάποια σημαντική αλλαγή της γεωμετρίας της (σχήμα, διαστάσεις), καθώς τα σύνθετα υλικά δεν αυξάνουν το μέγεθος των ενισχυόμενων στοιχείων.

4. Ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής

Η εφαρμογή τους είναι απλή, χωρίς να χρειάζεται κάποια ιδιαίτερα χρονοβόρα προεργασία. Επίσης, η μεταφορά τους είναι απλούστερη από ότι άλλα υλικά, λόγω του μειωμένου βάρους τους.

5. Οικονομικότερη λύση

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα που προσφέρουν να αντιμετωπίζονται τα πιθανά, μελλοντικά προβλήματα σημειακά, χωρίς να απαιτείται συνολική επέμβαση (όπως π.χ. στις συμβατικές μεθόδους ενίσχυσης), καθιστούν τα σύνθετα υλικά την οικονομικότερη δυνατή λύση σε μια κατασκευή (EM4C 2021).

Τα ανωτέρω πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών έχουν διευρύνει κατά πολύ το εύρος εφαρμογής τους, και χρησιμοποιούνται στους παρακάτω τομείς:

- Αεροναυπηγική και διαστημική

Λόγω της μικρής πυκνότητας, άρα του μειωμένου βάρους, τα σύνθετα υλικά προτιμώνται σε αεροσκάφη, δορυφόρους και διαστημικά σκάφη.

- Αυτοκινητοβιομηχανία

Χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά στην κατασκευή ελαφρών, αλλά ταυτόχρονα υψηλής αντοχής εξαρτημάτων.

- Κατασκευαστική βιομηχανία

Χρησιμοποιούνται σαν δομικά υλικά σε πολλές κατασκευές, για αύξηση της αντοχής από διάβρωση και μείωση του γενικού κόστους.

- Ιατρική

Χρησιμοποιούνται για κατασκευή εμφυτευμάτων, προσθετικών μελών και αρθρώσεων

- Αθλητικά είδη

Χρησιμοποιούνται σε διάφορα είδη αθλητικού εξοπλισμού, όπως ρακέτες, μπάλες, αλλά και σε καλάμια ψαρέματος.

- Ενέργεια

Χρησιμοποιούνται για κατασκευή τμημάτων ανεμογεννητριών και σε ηλιακά *panels*.

Κεφάλαιο 3: Χύτευση Μετάλλων

3.1 Διαδικασία χύτευσης

Χύτευση είναι η διαδικασία κατά την οποία μέταλλο, σε υγρή μορφή, εκχύνεται μέσα σε ειδικά διαμορφωμένο καλούπι, στο οποίο έχει δημιουργηθεί η αρνητική αποτύπωση, δηλαδή η τρισδιάστατη αρνητική μορφή του σχήματος του επιθυμητού προϊόντος. Το λιωμένο μέταλλο που χρησιμοποιείται για αυτή τη διαδικασία χύνεται στο καλούπι μέσω ενός αγωγού, που ονομάζεται «κανάλι εισροής» (*sprue*). Το μέταλλο, έτσι, εισέρχεται στο καλούπι, όπου καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο χώρο και με την πάροδο του χρόνου, στερεοποιείται. Μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα, μειώνεται η θερμοκρασία του μετάλλου και του καλουπιού και το χυτό προϊόν που δημιουργείται εξάγεται από το καλούπι, το οποίο καταστρέφεται ή επαναχρησιμοποιείται για μελλοντικές χυτεύσεις. Η επιλογή του μετάλλου που πρόκειται να χυτευθεί, του τύπου του καλουπιού που θα χρησιμοποιηθεί αλλά και της μεθόδου χύτευσης, εξαρτώνται συνήθως από την εφαρμογή του προϊόντος (*Rosato 2004*).

Η συνηθέστερη χρήση της χύτευσης ως μέθοδο παραγωγής μεταλλικών προϊόντων είναι όταν ο κατασκευαστής επιθυμεί το κόστος της παραγωγής να παραμείνει μικρό. Η χύτευση αποτελεί την οικονομικότερη δυνατή λύση για παραγωγή προϊόντων χωρίς μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας συγκριτικά με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα η κατεργασία με μηχανές *CNC* (*Computer Numerical Control*) ή η τρισδιάστατη εκτύπωση (*3D printing*).

Επίσης, η χύτευση προτιμάται για την παραγωγή μεγάλου μεγέθους τεμαχίων, η οποία δεν είναι δυνατή ή πρακτική με άλλες μεθόδους παραγωγής. Ακόμη ένας λόγος προτίμησης της χύτευσης αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη χύτευση και τα οποία έχουν γενικά μικρή ολκιμότητα και διαμορφώνονται δύσκολα με άλλες μηχανουργικές κατεργασίες εν θερμώ ή εν ψυχρώ (*Callister 2007*).

Πέρα από τα προαναφερθέντα, η χύτευση έχει και ορισμένα άλλα πλεονεκτήματα όπως τη δυνατότητα υψηλής παραγωγικότητας και την υψηλή ανακυκλωσιμότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Παρόλα αυτά, η διαδικασία της χύτευσης έχει και ορισμένα μειονεκτήματα. Το κυριότερο από αυτά είναι ότι οι μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κρούση, διάβρωση, κόπωση, σκληρότητα κλπ.) των χυτών τεμαχίων δεν είναι στο ίδιο επίπεδο με τις μηχανικές ιδιότητες των αντίστοιχων τεμαχίων που κατασκευάστηκαν

με μηχανουργικές κατεργασίες. Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου εντός του καλουπιού, το μέταλλο παίρνει το σχήμα του αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει μια συρρίκνωση.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των υλικών χύτευσης έχει βελτιώσει τις ιδιότητες και τα τελικών χυτών προϊόντων. Μέσω της χύτευσης μπορούν πλέον να επιτευχθούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στη διάβρωση, υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, και καλή ακρίβεια διαστάσεων. Το γεγονός αυτό, συναρτήσει του χαμηλότερου κόστους, καθιστά τα χυτά προϊόντα αρκετά ανταγωνιστικά σε σχέση με τα σφυρήλατα (*Rams 2022*).

3.2 Ιστορική αναδρομή

Η διαδικασία της χύτευσης έκανε την εμφάνισή της γύρω στα 4.000 με 3.500 π.Χ. στην περιοχή της Μεσοποταμίας, σε μια από τις πρώτες κοιτίδες του πολιτισμού (Εικόνα 3.1). Χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, για κατασκευή επίπεδων, χάλκινων εξαρτημάτων, με τη βοήθεια καλουπιών, κατασκευασμένα από πέτρα ή ψημένο πηλό. Στις επόμενες 2 χιλιετίες, η διαδικασία εξελίχθηκε ακόμη περισσότερο, καθώς χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά πυρήνες από ψημένο πηλό (αντίστοιχα με τις σημερινές «καρδιές»), προς κατασκευή εσωτερικών κοιλοτήτων στα χυτά προϊόντα.

Η διαδικασία της χύτευσης «μεταφέρθηκε» και στους υπόλοιπους μεγάλους πολιτισμούς της τότε εποχής, δηλαδή στην Αίγυπτο γύρω στα 2.800 π.Χ. (Εικόνα 3.2) και στην Κίνα, όπου και εξελίχθηκε περαιτέρω γύρω στο 1.500 π.Χ. (δυναστεία των Σανγκ), ειδικά όσο αφορά τον τομέα του καλουπιού. Στον Κινεζικό πολιτισμό, οι ανασκαφές και οι έρευνες έχουν ανακαλύψει αρκετά καλούπια, ιδιαίτερα περίτεχνα, τα οποία αποτελούνταν από πολλά, διαιρετά εξαρτήματα, που προσδένονταν μεταξύ τους. (μέχρι και 30 σε αριθμό). Επιπλέον, ιδιαίτερη ανάπτυξη επιδέχθηκε η χύτευση στη περιοχή της Ινδίας, όπου για πρώτη φορά χυτεύθηκαν εργαλεία, όπλα και διάφορα άλλα σκεύη από χαλκό και μπρούτζο. Λίγους αιώνες αργότερα, το 1000 π.Χ., πρωτοεμφανίστηκε στη Συρία και την Περσία η χύτευση σιδήρου, η οποία 5 αιώνες αργότερα εμφανίστηκε και πάλι στη Κίνα, κατά τη δυναστεία των *Zhou* (500 π.Χ.), και ουσιαστικά εισήχθη στον κόσμο, κυρίως με τη χρήση εργαλείων αγροτικών δραστηριοτήτων.

Η χύτευση, αν και ήταν γνωστή μέθοδος παραγωγής στον Δυτικό πολιτισμό, δεν ήταν αρκετά διαδεδομένη έως και τον 13^ο αιώνα μ.Χ. περίπου. Μέχρι τις αρχές του αιώνα αυτού η κύρια χρήση της χύτευσης ήταν η παραγωγή μεταλλικών καμπανών. Το 1313 κατασκευάστηκε το πρώτο κανόνι από χυτοσίδηρο. Τους επόμενους αιώνες η χύτευση αρχίζει να αναπτύσσεται και να χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο προς κατασκευή όπλων, πυρομαχικών και διάφορων σκευών καθημερινής χρήσης (Εικόνα 3.3). Το 1538, ο Ιταλός μεταλλουργός *Vannoccio Biringuccio* (1480 – 1539) γίνεται επικεφαλής του παπικού χυτηρίου της Ρώμης και καταγράφει αρκετά λεπτομερώς όλη τη διαδικασία της χύτευσης στο περίφημο βιβλίο του *‘De la Pirotechnia’* (Εικόνα 3.4), ένα από τα πρώτα βιβλία μεταλλουργίας που εκδόθηκαν και τυπώθηκαν στην Ευρώπη. Το βιβλίο αυτό έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και τη διάδοση της διαδικασίας της χύτευσης και καθιέρωσε τον *Biringuccio* ως τον πατέρα της βιομηχανίας χυτηρίων. Η χύτευση επιδεχόταν διαρκώς βελτιώσεις όσο αφορά τις μεθόδους που ακολουθούνταν και τις ιδιότητες των προϊόντων που κατασκευάζονταν για τους επόμενους αιώνες.

Η έλευση του 20^{ου} αιώνα, σε συνδυασμό με την βιομηχανική επανάσταση που είχε προηγηθεί τα προηγούμενα 150 χρόνια, έφερε μεγάλη ανάπτυξη τόσο της τεχνολογίας των υλικών που χρησιμοποιούνται στη χύτευση, όσο και των ίδιων των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι περισσότερες από τις τεχνικές χύτευσης που έλαβαν χώρα σε εκείνη τη χρονική περίοδο συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα (Εικόνα 3.5 και 3.6). Επιπλέον, ειδικά λίγο μετά το τέλος το Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου (1914-1918), η μεγάλη χρήση των χυτών προϊόντων τόνισε την ανάγκη προσδιορισμού της ποιότητας των προϊόντων αυτών, ανάγκη η οποία οδήγησε την εφεύρεση τεχνολογίας ακτινών *X*, για εξέταση του εσωτερικού όγκου των χυτών. Μέχρι την εποχή εκείνη, οι μεγάλες αμερικανικές εταιρείες είχαν τα ηνία της παγκόσμιας βιομηχανίας της χύτευσης. Παρόλα αυτά, μετά το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου (1939-1945), η Ιαπωνία, μέσω της προσπάθειας ανασυγκρότησής της, επένδυσε στη βιομηχανία της χύτευσης και έγινε η ισχυρότερη δύναμη στο χώρο. Οι Αμερικανικές και Ευρωπαϊκές μεγάλες εταιρείες έστειλαν απεσταλμένους στην Ιαπωνία, με στόχο να εκπαιδευτούν από τους Ιάπωνες τεχνίτες και να προσεγγίσουν τις μεθόδους τους για πιο ποιοτικές και αποτελεσματικές κατασκευές.

Τα τελευταία 30 περίπου χρόνια, η ποιότητα των χυτών προϊόντων είναι στο επίκεντρο της βιομηχανίας, σε συνάρτηση με την ανακυκλωσιμότητα των υλικών που

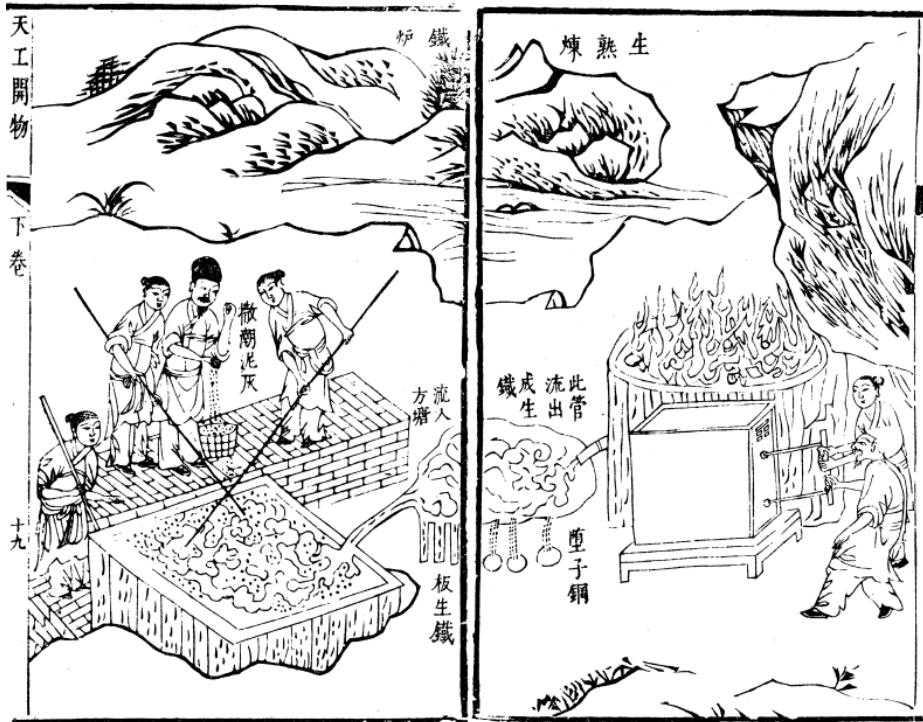
χρησιμοποιούνται. Η γενική ιδέα «πρασινοποίησης» των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων έχει εισέλθει δυναμικά και σε αυτόν τον κλάδο, καθιστώντας απαραίτητο τόσο για τη βιομηχανία όσο και για τις κυβερνήσεις να αναθεωρήσουν τον τρόπο που χυτεύονται τα μέταλλα. Έτσι, ήδη από το 1997, η ανάπτυξη και η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής χύτευσης έχει μειώσει δραματικά την ποσότητα άνθρακα που εκλύεται, αλλά και το συνολικό της κόστος. (Ατσαλάκης 2010, Olsen 2020).



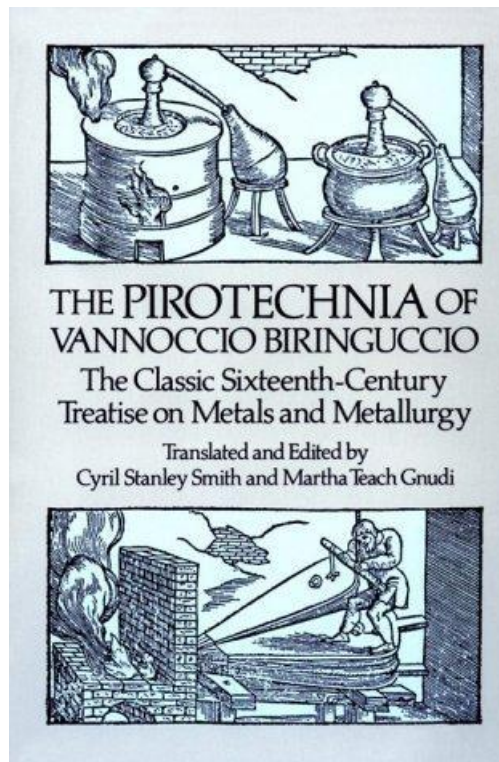
Εικόνα 3.1 Χυτά μεταλλικά αγαλματίδια από ανασκαφές στη περιοχή της Μεσοποταμίας (πηγή: https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/prt%3A978-1-4020-4425-0%2F13/MediaObjects/978-1-4020-4425-0_13_Part_Fig12-8548_HTML.jpg)



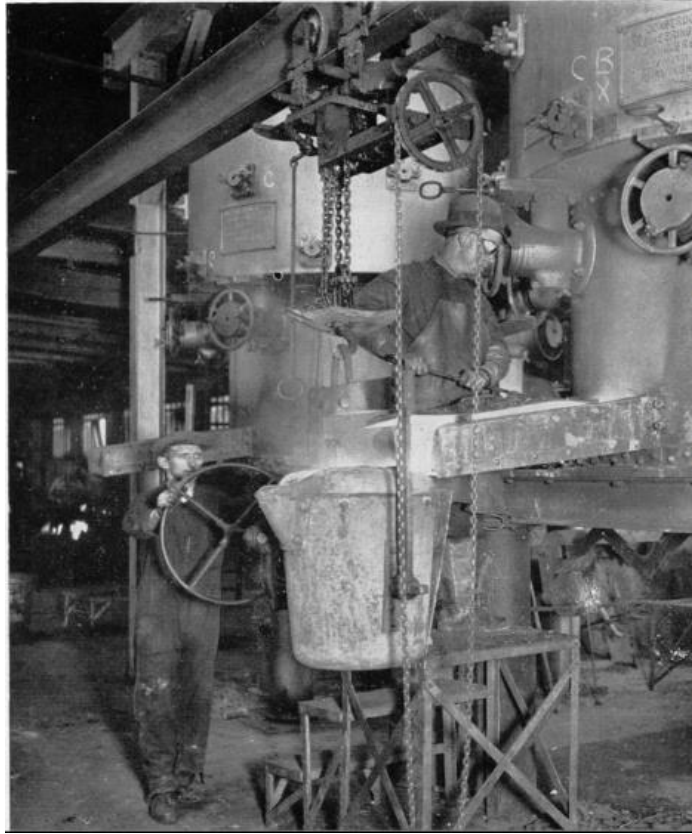
Εικόνα 3.2 Τοιχογραφία χύτευσης στην αρχαία Αίγυπτο (πηγή: https://images.metmuseum.org/CRDImages/eg/original/33.8.5_EGDP017259.jpg)



Εικόνα 3.3 Χύτευση σιδήρου στην Κίνα του 16^{ου} αιώνα (πηγή:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/Chinese_Fining_and_Blast_Furnace.jpg)



Εικόνα 3.4 Βιβλίο 'De la Pirotechnia' του Vannoccio Biringuccio (πηγή:
<https://covers.openlibrary.org/b/id/310634-L.jpg>)



Εικόνα 3.5 Χύτευση τον 20^ο αιώνα (πηγή: Br J Ind Med: first published as 10.1136/oem.2.3.125 on 1 July 1945)



Εικόνα 3.6 Χύτευση χάλυβα σήμερα (πηγή: https://live.staticflickr.com/538/32241826165_8b85831633_b.jpg)

3.3 Είδη χύτευσης

Οι μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες

- Μέθοδοι χύτευσης αναλώσιμου καλουπιού
- Μέθοδοι χύτευσης μη – αναλώσιμου καλουπιού

Η διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών, όπως είναι προφανές από την ονομασία τους, είναι ότι στις μεθόδους της πρώτης κατηγορίας το καλούπι που χρησιμοποιείται είναι μιας χρήσης, ενώ στις μεθόδους που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία, το καλούπι επαναχρησιμοποιείται για μελλοντικές χυτεύσεις.

3.3.1 Μέθοδοι χύτευσης αναλώσιμου καλουπιού

α) Χύτευση σε άμμο (*Sand Casting*)

Η χύτευση σε άμμο είναι μια από τις παλιότερες μορφές χύτευσης που χρησιμοποιήθηκαν. Η συγκεκριμένη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε εξειδικευμένα εργοστάσια που ονομάζονται χυτήρια. Είναι ίσως η πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιούμενη μέθοδος χύτευσης, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους της, συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Από το 2003 και έπειτα, το 60% της παραγωγής προϊόντων χύτευσης γίνεται με τη συγκεκριμένη μέθοδο (*Rao 2003*).

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, γίνεται χρήση συγκεκριμένου τύπου άμμου. Η πυριτική άμμος, που χρησιμοποιείται (SiO_2), είναι πυρίμαχη, δηλαδή έχει μεγάλη αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, έτσι ώστε να μην καταστρέφεται από το λιωμένο μέταλλο.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται καλούπια μιας ή πολλαπλών χρήσεων, μέσα στα οποία ενσωματώνεται η πυριτική άμμος και το λιωμένο μέταλλο.

Η βασική διαδικασία ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (Εικόνα 3.7):

- Τοποθέτηση ενός βοηθητικού, πρότυπου τεμαχίου στην άμμο, δηλαδή μια απομίμηση του τεμαχίου που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε, ώστε να δημιουργήσουμε την αρνητική κοιλότητα (αποτύπωμα) του επιθυμητού προϊόντος.
- Άνοιγμα βοηθητικών αγωγών στο καλούπι με την άμμο, για εύκολη δίοδο και έξοδο του λιωμένου μετάλλου.
- Αφαίρεση του πρότυπου τεμαχίου.
- Τήξη του μετάλλου σε ειδικό φούρνο.

- Γέμισμα του κοιλότητας που δημιουργήθηκε από το πρότυπο, μέσα στο καλούπι, με λιωμένο μέταλλο.
- Απομάκρυνση της άμμου, η οποία έχει καεί γύρω από το τεμάχιο και δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, και αφαίρεση του χυτού προϊόντος.

Όπως προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οικονομικότερη σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες μεθόδους χύτευσης. Παρόλα αυτά, η δημιουργία καλουπιών είναι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, σε επίπεδο βιομηχανικής παραγωγής. Η τήξη επίσης των μετάλλων μπορεί να έχει μεγάλη διάρκεια. Το γεγονός αυτό καθιστά την μέθοδο δύσκολη, όταν αφορά τη μαζική παραγωγή.

Τα προϊόντα που προέρχονται από χύτευση σε άμμο δεν έχουν εντελώς λεία και ποιοτική επιφάνεια. Εμφανίζουν συνήθως ατέλειες και ανομοιογένειες από την άμμο που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, οι διαστάσεις των παραγόμενων προϊόντων δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια, και η αιτία είναι κυρίως ο τύπος της άμμου.

Υπάρχουν 2 είδη πυρίμαχης άμμου που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διαδικασία:

- Πράσινη άμμος (*green sand*)

Το όνομα «πράσινη άμμος» προέρχεται από το γεγονός ότι η συγκεκριμένη άμμος δεν έχει σκληρύνει μέσα στο καλούπι και είναι ακόμη «πράσινη», δηλαδή σε μη αποστεγνωμένη κατάσταση, όταν το λιωμένο μέταλλο χύνεται στο καλούπι. Η πράσινη άμμος, με λίγα λόγια, δεν έχει πράσινο χρώμα, αλλά είναι «πράσινη» με την έννοια ότι έχει διατηρήσει την υγρασία της (παρόμοια με το «πράσινο» ξύλο). (*The Designers & Buyers Guide 2016*)

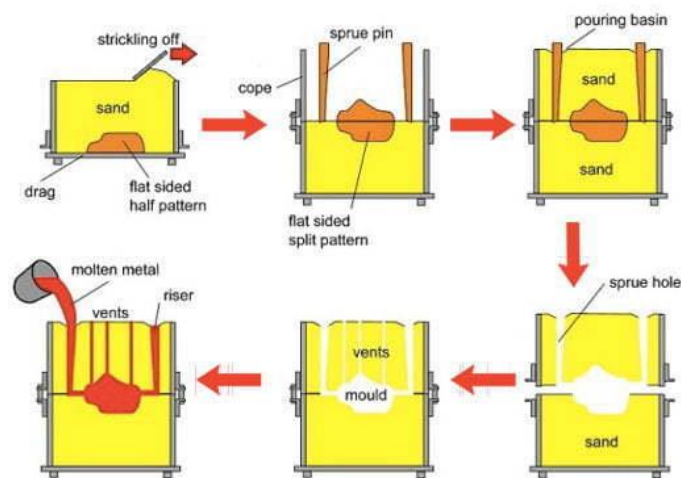
Αποτελείται από:

- Πυριτική άμμο (SiO_2), άμμο χρωμίου ($FeCr_2O_4$) ή άμμο ζirkονίου ($ZrSiO_4$), σε ποσοστό 75 ως 85 %
- Μπετονίτη (πηλό) σε ποσοστό 5 με 11 %
- Νερό σε ποσοστό 2 ως 4%
- Αδρανή λάσπη (*inert sludge*) σε ποσοστό 3 ως 5 %
- Ανθρακίτη σε ποσοστό 0 ως 1%

- Ξηρή άμμος (*dry sand*)

Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ξηρή άμμος, η διαδικασία συχνά αναφέρεται ως ‘*Air set Method*’ ή και ‘*No-bake Mold Casting*’. Η ξηρή άμμος περιέχει και άλλα υλικά εκτός του πηλού, παράλληλα με ένα συγκολλητικό ταχείας σκλήρυνσης. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται έτσι καθώς η άμμος ξηραίνεται πριν τη δημιουργία του καλούπιού και επίσης για να διακριθεί από τη χύτευση σε άμμο με «πράσινη» άμμο. Σε σύγκριση με την «πράσινη» άμμο, τα καλούπια από ξηρή άμμο δεν καταστρέφονται εύκολα, ενώ η ξηρή άμμος μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Υπάρχει ακόμη μια υποκατηγορία χύτευσης σε άμμο και ονομάζεται ‘*Cold Box Method*’. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί οργανικούς και ανόργανους συνδετικούς παράγοντες που δεσμεύονται χημικά με την άμμο και ενισχύουν το καλούπι. Ονομάζεται έτσι καθώς δε ψήνεται σε φούρνο. Τα χυτά προϊόντα που παράγονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ακριβέστερα όσο αφορά τις επιθυμητές διαστάσεις, σε σχέση με τη χύτευση σε «πράσινη» άμμο, αλλά και ακριβότερα οικονομικά. Έτσι, χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια.



Εικόνα 3.7 Χύτευση σε άμμο (πηγή: <https://vietnamcastiron.com/wp-content/uploads/2020/07/green-sand-casting-process.jpg>)

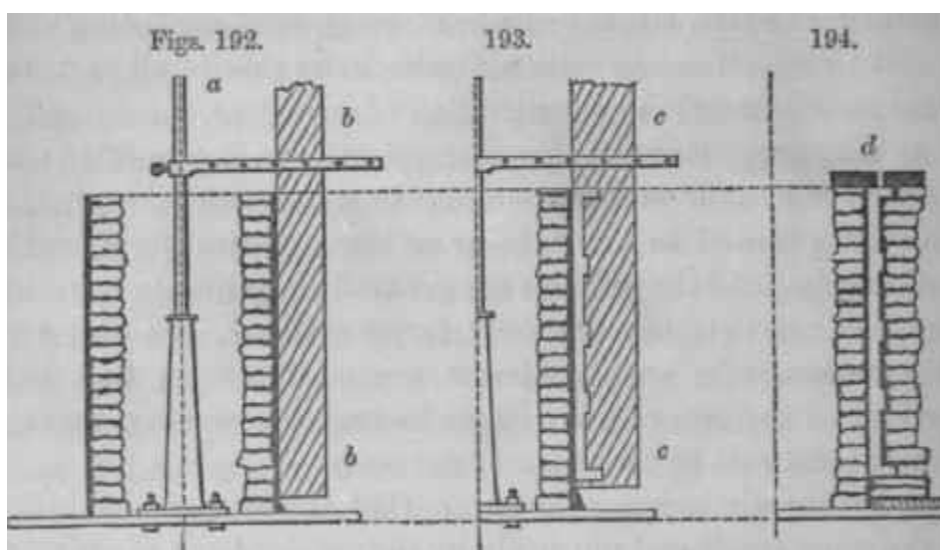
β) Χύτευση σε αργιλικά καλούπια (*Loam molding*)

Ο άργιλος (*loam*) που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των καλούπιών είναι ένα μείγμα άμμου και πηλού με νερό. Ορισμένες φορές κατασκευάζεται ακόμη και από

κοπριά αλόγων (λόγω της μεγάλης περιεκτικότητά της σε άχυρο), τρίχες ζώων κλπ., με σκοπό την επίτευξη διαπερατότητας και τη διαφυγή διάφορων αερίων, όπως ο ατμός, κατά τη χύτευση (Tylecote 1991).

Η μέθοδος χρησιμοποιούνταν παλιότερα κυρίως για κατασκευή χυτοσιδήρων και κανονιών από χαλκό. Σήμερα, εξακολουθεί να υπάρχει και χρησιμοποιείται για κατασκευή καμπανών και άλλων παρόμοιων (γεωμετρικά) αντικειμένων. Για τέτοιας γεωμετρίας αντικείμενα, δηλαδή κυλινδρικά και συμμετρικά (κανόνια, καμπάνες), τα καλούπια που χρησιμοποιούνται κατασκευάζονται γύρω από έναν άξονα, ο οποίος φέρει ένα κομμάτι ξύλου, με το σχήμα του επιθυμητού προϊόντος της χύτευσης (Εικόνα 3.8).

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή τους, τοποθετούνται κάθετα μπροστά στον κλίβανο όπου περιέχεται το λιωμένο μέταλλο. Στο καλούπι τοποθετείται ένας πυρήνας, αν το επιθυμητό αντικείμενο είναι κοίλο. Στη συνέχεια, το λιωμένο μέταλλο διατρέχει το καλούπι, το οποίο, λόγω πίεσης και θερμοκρασίας σπάει και καταστρέφεται. Με τη πάροδο του χρόνου, μειώνεται η θερμοκρασία του μετάλλου και το χυτό στερεοποιείται.



Εικόνα 3.8 Χύτευση σε αργιλικά/πήλινα καλούπια (πηγή: <https://chestofbooks.com/home-improvement/workshop/Turning-Mechanical/images/Section-III-Loam-Moulding-100100.jpg>)

γ) Χύτευση σε γύψινα καλούπια (*Plaster mold casting*)

Είναι μέθοδος παρόμοια με τη χύτευση σε άμμο. Η βασική διαφορά είναι ότι το υλικό που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ο γύψος. Είναι μια λευκή σκόνη

που αποτελείται από ημιυδρικό θειικό ασβέστιο ($CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O + I\frac{1}{2}H_2O \uparrow$ ατμός) και πήρε την ονομασία αυτή επειδή αρχικά παρασκευαζόταν με θέρμανση γύψου ενός κοιτάσματος στην Μονμάρτη, στα βόρεια προάστια του Παρισίου.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο με μη – σιδηρούχα υλικά και για σχετικά μικρά αντικείμενα, με μάζα από 30g έως και 10kg περίπου. Η προετοιμασία των καλουπιών έχει μεγάλη χρονική διάρκεια (σε βιομηχανική κλίμακα), καθώς για μια χύτευση κατασκευάζεται όχι μόνο ένα καλούπι, αλλά μια ομάδα καλουπιών, και ο χρόνος κατασκευής είναι μια εβδομάδα.

Η διαδικασία έχει ως εξής (*Degarmo 2003, Kalpakjian 2006*):

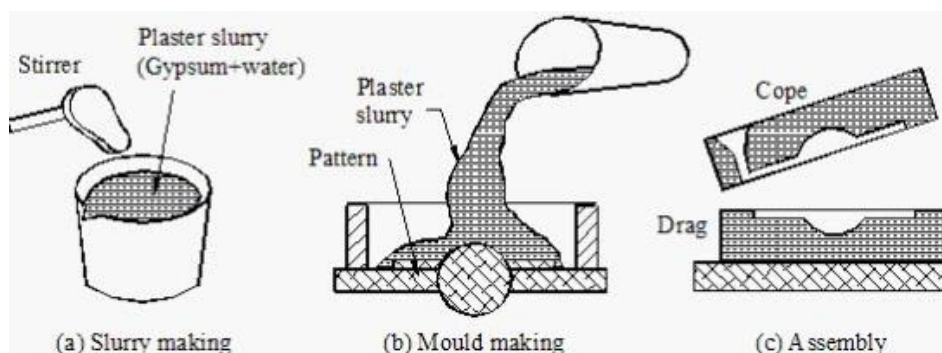
- Κατασκευάζεται το διαιρούμενο πρότυπο μοντέλο του προϊόντος προς παραγωγή, το οποίο ψεκάζεται με ένα λεπτό φιλμ διαχωριστικής ένωσης (απελευθερωτικός παράγοντας), ώστε να μη κολλήσει πάνω του ο γύψος.
- Σε κάθε διαιρούμενο πλαίσιο του καλουπιού ο γύψος χύνεται πάνω στο πρότυπο.
- Για να αποτραπεί η δημιουργία φυσαλίδων αέρα και κενών, η διάταξη δονείται μηχανικά. Μετά από 15 λεπτά απομακρύνεται το πρότυπο.
- Τα δύο πλαίσια ψήνονται στους $120^\circ C - 260^\circ C$ για να απομακρυνθεί η υγρασία, και αφού στερεοποιηθεί ο γύψος, τα πλαίσια συναρμολογούνται, προθερμαίνονται και εκχύνεται το λιωμένο μέταλλο (Εικόνα 3.9).
- Αφού το μέταλλο στερεοποιηθεί και φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το γύψινο καλούπι σπάει και αποκαλύπτεται το επιθυμητό μεταλλικό προϊόν.

Η μέθοδος αυτή αποδίδει άψογη επιφάνεια των τελικών προϊόντων, σε αντίθεση με τη χύτευση σε άμμο. Γι' αυτό χρησιμοποιείται σε τεμάχια που απαιτούν άριστο φινίρισμα και μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια. Άλλα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το χαμηλό οικονομικό κόστος, όταν πρόκειται κυρίως για πολύπλοκα σχήματα, και η ελάχιστη παραγωγή απορριμμάτων (*Todd 1994*).

Το βασικό μειονέκτημα είναι η χύτευση μόνο μη – σιδηρούχων υλικών με χαμηλό σημείο τήξης (π.χ. κράματα αλουμινίου, μαγνησίου, ψευδαργύρου και χαλκού). Τα σιδηρούχα υλικά, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας τήξης, θα κατέστρεφαν το γύψινο περίβλημα πριν τη στερεοποίησή τους και το μέταλλο θα χυνόταν εκτός του καλουπιού και επίσης το θείο (που περιέχεται στις σιδηρούχες ενώσεις) θα αντιδρούσε χημικά με

τον γύψο, προκαλώντας διάφορες ανωμαλίες στην επιφάνεια του προϊόντος. Επιπλέον, οι χρόνοι ψύξης του γύψου αλλά και του μετάλλου περιορίζουν το ρυθμό παραγωγής. Τέλος, ο γύψος δεν είναι τόσο σταθερός και στιβαρός όσο η άμμος και η σύνθεσή του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, και μπορεί να δημιουργηθούν πολλά εν δυνάμει προβλήματα (Εικόνα 3.9) (Degarmo 2003, Kalpakjian 2006).

Με τη μέθοδο της χύτευσης σε γύψο κατασκευάζονται συνήθως κλειδαριές, γρανάζια, βαλβίδες, εργαλεία, διάφορα εξαρτήματα μηχανών και διακοσμητικά.



Εικόνα 3.9 Χύτευση σε γύψινα καλούπια (πηγή: <https://msvs-dei.vlabs.ac.in/mem103/Unit3lesson7.html#plaster>)

δ) Χύτευση με κέλυφος (*Shell molding*)

Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε από τον Γερμανό μηχανικό *Johannes Croning* (1886-1967). Είναι παρόμοια με τη χύτευση σε άμμο, με τη διαφορά ότι η κοιλότητα της χύτευσης, δηλαδή η αρνητική αποτύπωση του επιθυμητού τεμαχίου σχηματίζεται από ένα σκληρό «κέλυφος» άμμου, αντί για δοχείο γεμάτο άμμο. Η άμμος που χρησιμοποιείται εδώ είναι λεπτότερη και αναμιγνύεται με ρητίνη, για σκλήρυνση του κελύφους.

Η διαδικασία έχει ως εξής (Degarmo 2003):

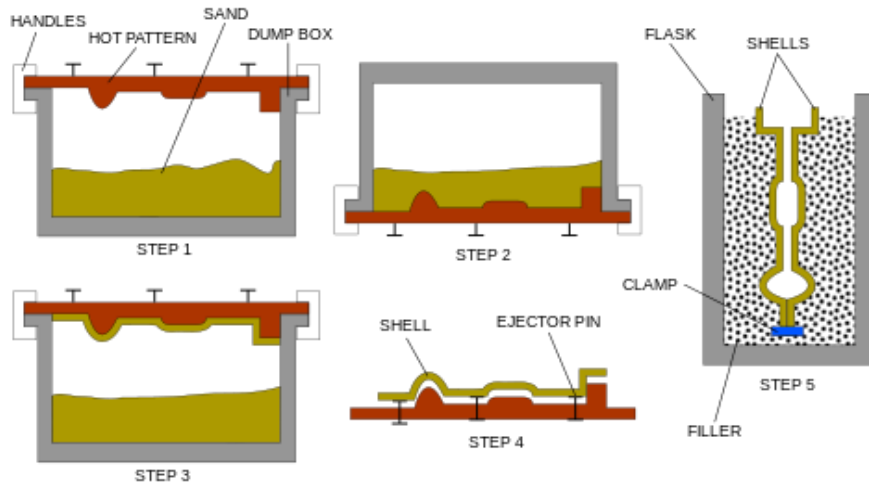
- Μίγμα λεπτής πυριτικής άμμου, με 3-6% θερμοσυγκολλητική φαινολική ρητίνη εκτοξεύεται πάνω στο πρότυπο τεμάχιο (συνήθως από χυτοσίδηρο), το οποίο έχει προηγουμένως θερμανθεί στους 230°C - 260°C.
- Αφού η άμμος καθίσει πάνω στο πρότυπο για μερικά λεπτά και σκληρυνθεί μερικώς, το πρότυπο μαζί με την άμμο αναποδογυρίζονται ώστε η περίσσεια άμμου να πέσει στο έδαφος, εκκενώνοντας το κέλυφος.

- Το κέλυφος με το πρότυπο ψήνονται σε φούρνο έως ότου η άμμος σκληρυνθεί εντελώς.
- Στη συνέχεια η κατασκευή απομακρύνεται από τον φούρνο και το κέλυφος αφαιρείται από το πρότυπο.
- Έχοντας ολοκληρώσει τη παραπάνω διαδικασία για περισσότερες από μια φορές, δύο ή και περισσότερα κελύφη συγκολλούνται, με χρήση θερμοσκληρυνόμενης κόλλας και σχηματίζουν ένα καλούπι (Εικόνα 3.10).
- Τέλος, το λιωμένο μέταλλο χύνεται στο καλούπι, στερεοποιείται, το καλούπι ανοίγει και αποκαλύπτεται το χυτό αντικείμενο.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η εύκολη σχετικά κατασκευή αρκετά πολύπλοκων ή και μεγάλων εξαρτημάτων, με αρκετά καλή, λεπτομερή και λεία επιφάνεια. Επιπλέον, είναι μια μέθοδος που προτείνεται για μαζική παραγωγή, λόγω του υψηλού ρυθμού παραγωγής που προσφέρει και του μικρού χρόνου παράδοσης των προϊόντων (*Degarmo, 2003*).

Από την άλλη μεριά, τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι κυρίως οικονομικής φύσης. Το σύστημα πύρωσης που χρησιμοποιείται είναι αρκετά σημαντικό έξοδο για ένα εργοστάσιο. Επίσης, η ρητίνη που χρησιμοποιείται στην άμμο είναι ακριβό υλικό αν και δεν απαιτείται μεγάλη ποσότητα, και το εργατικό κόστος είναι αρκετά υψηλό, καθώς χρειάζεται εκπαίδευση του προσωπικού στο συγκεκριμένο εξοπλισμό. Τέλος, τα προϊόντα της μεθόδου αυτής απαιτούν και κάποια δευτερογενή κατεργασία καθώς εμφανίζουν συχνά υψηλό πορώδες (*Degarmo, 2003*).

Τα αντικείμενα που χυτεύονται με τη μέθοδο αυτή είναι συνήθως μπιέλες, κιβώτια κινητήρων, κεφαλές κυλίνδρων και βάσεις μηχανών.



Εικόνα 3.10 Χύτευση με κέλυφος (πηγή:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/92/Shell_molding_process.svg/501px-Shell_molding_process.svg.png)

ε) Χύτευση με επένδυση (*Investment casting*)

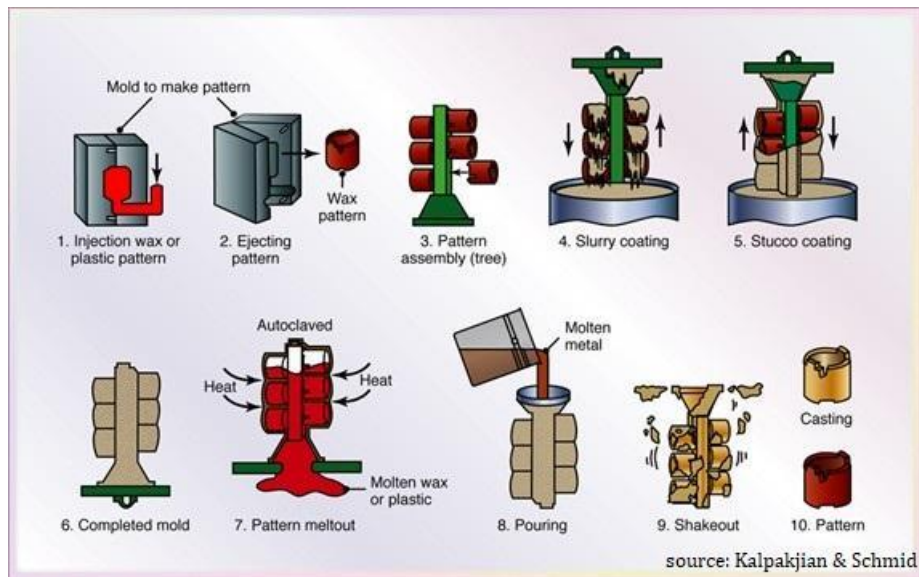
Είναι μια βιομηχανική μέθοδος χύτευσης, που βασίζεται στην τεχνική lost – wax casting (χύτευση «χαμένου κεριού»), μια από τις παλαιότερες γνωστές μεθόδους χύτευσης μετάλλων, μιας και χρησιμοποιείται περίπου τα τελευταία 5.000 χρόνια. Οι δύο αυτοί όροι χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν τον ορισμό της ίδιας τεχνικής (κυριαρχεί πλέον η ονομασία «χύτευση με επένδυση»). Αρχικά, η μέθοδος χρησιμοποιούσε κεριά μελισσών, με το οποίο σχηματίζονταν τα πρότυπα τεμάχια για τη χύτευση. Σήμερα, χρησιμοποιούνται εξελιγμένα κεριά και άλλα πυρίμαχα ειδικά κράματα για την παραγωγή των προτύπων.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής (*Degarmo 2003*):

- Το πρώτο βήμα είναι η κατασκευή του αρχικού καλουπιού με το αποτύπωμα του επιθυμητού προϊόντος. Αυτό γίνεται συνήθως με τη χρήση κάποιου λογισμικού σχεδίασης και στη συνέχεια με 3D εκτύπωση. Το αρχικό καλούπι μπορεί να κατασκευαστεί από πλαστικό όπως ρητίνη ή τυποποιημένο νήμα *PLA*.
- Ακολουθεί η παραγωγή των προτύπων από κεριά. Αυτό συμβαίνει με έκχυση του κεριού μέσα στο καλούπι σε διάφορες στρώσεις μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Το κεριά αφήνεται να στερεοποιηθεί.

- Στη συνέχεια, γίνεται η συναρμολόγηση των προτύπων κεριού. Τα πρότυπα συνδέονται σε ένα σύμπλεγμα με σχήμα δέντρου (Εικόνα 3.11) με τη βοήθεια ενός εργαλείου θέρμανσης, που τα λιώνει ελαφρώς και πιέζει τις μεταξύ τους επιφάνειες, ούτως ώστε όταν κρυώσουν, να σκληρυνθούν και να ενωθούν μεταξύ τους.
- Ακολουθεί η εφαρμογή επενδυτικών υλικών εξωτερικά στο δένδρο των προτύπων – *pattern tree*. Η επένδυση που χρησιμοποιείται συνήθως είναι κεραμική και γίνεται με μια σειρά βημάτων:
 - α) επικάλυψη με κάποιο πυρίμαχο υλικό (συντά διοξείδιο του πυριτίου, ζirkόνιο, κλπ.) – *prime coating*
 - β) εφαρμογή χονδρόκοκκων κεραμικών σωματιδίων – *stuccoing*
 - γ) σκλήρυνση – *hardness*
- Αφού έχει επέλθει η στερεοποίηση και σκλήρυνση του καλούπιού, αναποδογυρίζεται και τοποθετείται σε κλίβανο, με στόχο να λιώσουν ή και να εξατμιστούν εντελώς τα πρότυπα κεριού. Αυτό έχει επίσης ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση διάφορων εσωτερικών τάσεων που προκαλεί η διαστολή του κεριού στο καλούπι.
- Ύστερα το καλούπι προθερμαίνεται στους 870°C – 1095°C ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία.
- Το μέταλλο χύνεται μέσα στο καλούπι, το οποίο έχει τοποθετηθεί από πριν σε μια δεξαμενή γεμάτη άμμο, για να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες.
- Αφού στερεοποιηθεί το μέταλλο, το κέλυφος σφυρηλατείται ή διαλύεται χημικά με υγρό άζωτο, ώστε να αποκαλυφθεί το χυτό τεμάχιο το οποίο καθαρίζεται και λειαίνεται.
- Τέλος, γίνεται φινίρισμα, το οποίο αφαιρεί μεγαλύτερο ποσό ακαθαρσιών από ότι η λείανση που προηγήθηκε.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η παραγωγή λείας επιφάνειας, η υψηλή ακρίβεια στις διαστάσεις, η δυνατότητα χύτευσης πολύπλοκων σχεδίων σε σχεδόν οποιοδήποτε μέταλλο και το «πράσινο» περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα μειονεκτήματα που έχει είναι το υψηλό οικονομικό κόστος, λόγω εξειδικευμένου εξοπλισμού και ακριβών υλικών. Επίσης η διαδικασία είναι χρονοβόρα και τα προϊόντα της χύτευσης απαιτούν μεγάλη επεξεργασία (*The Open University 2023*).



Εικόνα 3.11 Χύτευση με επένδυση (πηγή: <https://engineeringproductdesign.com/wp-content/uploads/Schematic-illustration-of-Investment-casting.jpg>)

στ) Χύτευση με χαμένο αφρό (*Lost – Foam casting*)

Είναι μια τεχνική χύτευσης που μοιάζει με την μέθοδο χύτευσης με επένδυση. Η βασική διαφορά τους είναι ότι το πρότυπο μοντέλο δεν κατασκευάζεται από κεριά αλλά από αφρό. Το χαμηλό σημείο βρασμού των αφρών απλοποιεί τη χύτευση, καθώς δεν υπάρχει η ανάγκη τήξης του κεριού από το καλούπι.

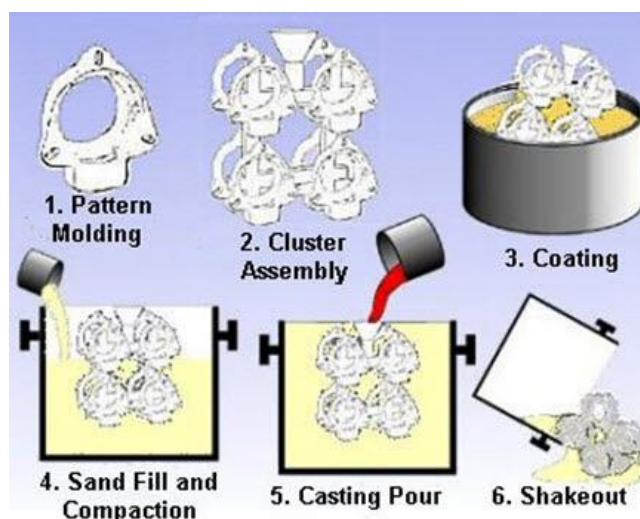
Η διαδικασία έχει ως εξής (Εικόνα 3.12):

- Κατασκευάζεται το πρότυπο μοντέλο (του επιθυμητού προϊόντος) από αφρό πολυστυρενίου, τα σωματίδια του οποίου συμπιέζονται μεταξύ τους με θέρμανση.
- Το πρότυπο τοποθετείται σε ένα πλαίσιο, το οποίο γεμίζεται με άμμο. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια τεχνική δόνησης και η άμμος γίνεται συμπαγής.
- Το λιωμένο μέταλλο χύνεται στο καλούπι και όπως το γεμίζει αντικαθιστά τον αφρό ο οποίος εξατμίζεται. Η χαμηλή πυκνότητα του αφρού καθιστά μικρή την παραγωγή αερίου αποβλήτου, το οποίο μπορεί να εύκολα να διαφύγει λόγω της διαπερατότητας του καλουπιού.
- Αντίθετα με τον αφρό, η άμμος έχει γίνει συμπαγής, έχει σκληρύνει και έχει αναλάβει ουσιαστικά τον ρόλο του καλουπιού, κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου.

Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτή τη μέθοδο είναι χυτοσίδηροι, διάφορα κράματα αλουμινίου, χάλυβες και κράματα νικελίου. Λιγότερο συχνά χυτεύονται ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα χαλκού.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η αρκετά μεγάλη ακρίβεια τόσο της επιφάνειας όσο και των διαστάσεων όσο αφορά τα σύνθετα χυτά. Η συντήρηση της άμμου είναι πολύ ευκολότερη και φθηνότερη διαδικασία από ότι η «πράσινη» άμμος που χρησιμοποιείται στη χύτευση με άμμο. Ο αφρός, επίσης, είναι οικονομικό υλικό και επιφέρει πιο γρήγορη τη στερεοποίηση του λιωμένου μετάλλου. (Degarmo 2003)

Αντίθετα, τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος των προτύπων κυρίως όταν πρόκειται για εφαρμογές μικρού όγκου, ενώ τα πρότυπα είναι μιας χρήσης επειδή καταστρέφονται λόγω της χαμηλής αντοχής τους. (Kalpakjian 2006)



Εικόνα 3.12 Χύτευση χαμένου αφρού (πηγή:

https://www.totalmateria.com/images/Articles/ktn/Fig387_1.jpg)

ζ) Χύτευση σε πλήρες καλούπι (*Full – mold casting*)

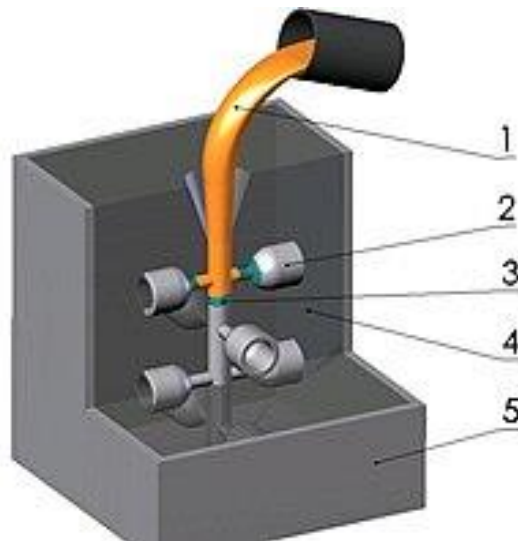
Είναι μια διαδικασία χύτευσης, που συνδυάζει στοιχεία από τη μέθοδο χύτευσης σε άμμο και τη μέθοδο χύτευσης με χαμένο αφρό.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής (Degarmo2003, Kalpakjian 2006):

- Αρχικά, κατασκευάζεται το πρότυπο μοντέλο από διογκωμένο αφρό πολυστερίνης, το οποίο λαμβάνει το τελικό ακριβές σχήμα με κοπτικό αφρού θερμού σύρματος.
- Ο αφρός πολυστερίνης εγχέεται σε προθερμασμένο καλούπι αλουμινίου αρχικά σε χαμηλή πίεση και στη συνέχεια εφαρμόζεται ατμός εντός του καλουπιού ο οποίος γεμίζει όλο το καλούπι.

- Το καλούπι περιβάλλεται από «πράσινη» ή χημικά επεξεργασμένη άμμο, με τον ίδιο τρόπο που περιβάλλεται το μοντέλο κατά τη χύτευση με άμμο.
- Τέλος, το μέταλλο λιώνει και χύνεται μέσα στο καλούπι και εξατμίζει τον αφρό καταλαμβάνοντας όλο το διαθέσιμο χώρο (Εικόνα 3.13). Ο ατμός που παράγεται από την εξάτμιση του ατμού διαφεύγει από την κατασκευή μέσω της άμμου.
- Αφού πέσει η θερμοκρασία, το προϊόν που παράχθηκε απομακρύνεται από το καλούπι και είναι έτοιμο για χρήση. Η άμμος δεν επαναχρησιμοποιείται.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μη απαίτηση αρχικού σχεδίου και προσφέρει ακριβείς διαστάσεις στο χυτό τεμάχιο. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως η χύτευση επένδυσης, είναι απλούστερη και φθηνότερη, μιας και ο αφρός που χρησιμοποιείται εδώ είναι φθηνότερος από το κερί και άλλα ενισχυτικά υλικά. Επιπλέον, ορισμένα είδη χύτευσης χρησιμοποιούν ανυψωτικές συσκευές που ανυψώνουν το καλούπι με το λιωμένο μέταλλο, έτσι ώστε, μέσω της βαρύτητας το τήγμα του μετάλλου να πληρώσει όλο τον διαθέσιμο χώρο. Η συγκεκριμένη μέθοδος δε χρειάζεται ανυψωτικά. Τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των προτύπων κυρίως όταν πρόκειται για εφαρμογές χαμηλού όγκου, η εύκολη παραμόρφωση που δέχονται λόγω της μικρής αντοχής τους, και η μη επαναχρησιμοποίησή τους (Degarmo 2003).



Εικόνα 3.13 Χύτευση σε πλήρες καλούπι 1. Λιωμένο μέταλλο, 2. Επικαλυμμένο μοντέλο, 3. Αφρός, 4. «Πράσινη» άμμος, 5. Δοχείο χύτευσης (πηγή:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1a/Vollformgiessenschema.jpg/330px-Vollformgiessenschema.jpg>)

3.3.2 Μέθοδοι χύτευσης μη – αναλώσιμου καλουπιού

α) Χύτευση με μόνιμο καλούπι (*Permanent mold casting*)

Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί μεταλλικά καλούπια και για την πλήρωση του καλουπιού με το λιωμένο μέταλλο χρησιμοποιείται η βαρύτητα ή πίεση αερίου ή ακόμη και κενό. Τα συνηθέστερα μέταλλα που χυτεύονται με αυτή τη διαδικασία είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και διάφορα κράματα χαλκού. Πιο σπάνια, χυτεύονται κράματα κασσίτερου, ψευδαργύρου, και μολύβδου. Υπάρχουν 4 διαφορετικοί τύποι χύτευσης μόνιμου καλουπιού: 1) χύτευση βαρύτητας, 2) χύτευση ‘*slush*’, 3) χύτευση χαμηλής πίεσης και 4) χύτευση κενού.

- Χύτευση βαρύτητας (*Gravity casting*)

Κατασκευάζεται το διαιρούμενο μεταλλικό καλούπι με την κοιλότητα (αποτύπωμα) του προϊόντος εσωτερικά. Το καλούπι προθερμαίνεται στους 150-200°C, με στόχο τη διευκόλυνση της ροής του μετάλλου. Η κοιλότητα του καλουπιού επικαλύπτεται με κάποιο πυρίμαχο υλικό και τοποθετούνται πυρήνες άμμου ή μετάλλου. Στη συνέχεια, το καλούπι κλείνει, το μέταλλο λιώνει και χύνεται στο καλούπι στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία ώστε να αποφευχθούν ρωγμές και αστοχίες. Μετά την στερεοποίησή του, το διαιρούμενο καλούπι ανοίγει και το χυτό τεμάχιο αφαιρείται. (*Degarmo 2003, Kalpakjian 2006*).

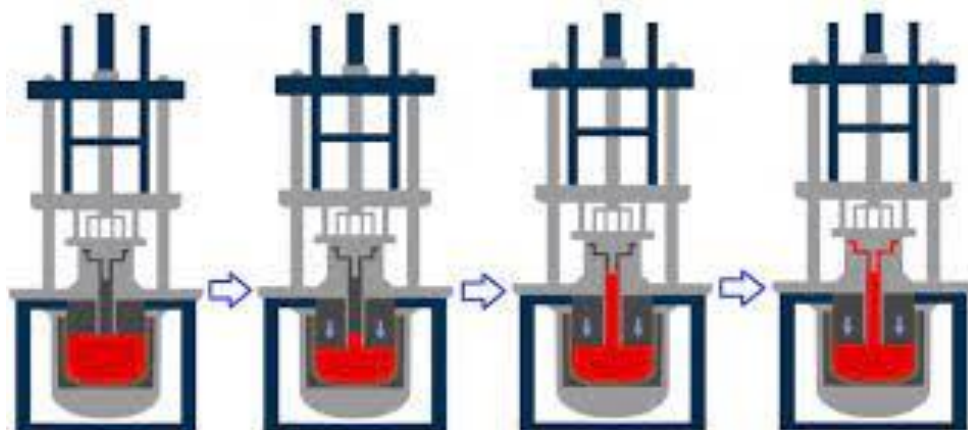
- Χύτευση *Slush casting*

Είναι μια παραλλαγή της χύτευσης βαρύτητας. Εδώ, ένα μέρος του λιωμένου μετάλλου χύνεται στο καλούπι και αφήνεται να πέσει η θερμοκρασία του ώστε να στερεοποιηθεί και να δημιουργηθεί αρχικά ένα μεταλλικό κέλυφος στο καλούπι. Στη συνέχεια, το υπόλοιπο υλικό χύνεται προς τα έξω ώστε να παραμείνει το κοίλο κέλυφος. Το χυτό τεμάχιο που παράγεται, έχει καλή, λεπτομερή επιφάνεια. Η τεχνική αυτή συνήθως χρησιμοποιείται για κατασκευή διάφορων οικιακών διακοσμητικών (λαμπτήρες, κηροπήγια, κλπ.).

- Χύτευση χαμηλής πίεσης (*Low – pressure casting*)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί αέριο χαμηλής πίεσης, μεταξύ 3 – 15 *psi*, για να ωθήσει το λιωμένο μέταλλο εντός της κοιλότητας του καλουπιού, μέσω ενός πυρίμαχου σωλήνα έκχυσης, που εκτείνεται από την κορυφή ως τον πυθμένα του καλουπιού (Εικόνα 3.14). Τα μέταλλα που χυτεύονται είναι συνήθως αλουμίνιο, μαγνήσιο και διάφορα κράματα

χαλκού. Με τη συγκεκριμένη τεχνική εξαλείφονται οι πολλές αναταράξεις κατά το γέμισμα του καλουπιού, το οποίο είναι ελεύθερο πορώδους, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών είναι κατά 5% περίπου βελτιωμένες από ότι με τη χύτευση βαρύτητας. Το μειονέκτημα της χύτευσης χαμηλής πίεσης είναι ο μεγάλος χρόνος διάρκειας της διαδικασίας. (Degarmo 2003).



Εικόνα 3.14 Χύτευση χαμηλής πίεσης (πηγή: <https://www.lesueurinc.com/uploads/images/WCD%20-%20Images-Docs/Low%20Pressure/kurtz2.png>)

- Χύτευση κενού (*Vacuum molding*)

Έχει όλα τα πλεονεκτήματα των παραπάνω τεχνικών, ενώ επιπλέον, παράγει λιγότερη ποσότητα αερίων από το λιωμένο μέταλλο, του οποίου η καθαρότητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Η χύτευση κενού παράγει εξαιρετικά λεπτομερή και λεία επιφάνεια και οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών τεμαχίων είναι 10 - 15% βελτιωμένες σε σχέση με τη χύτευση βαρύτητας. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς κατασκευή μικρών τεμαχίων βάρους από 0,2 kg ως 5 kg (Degarmo 2003).

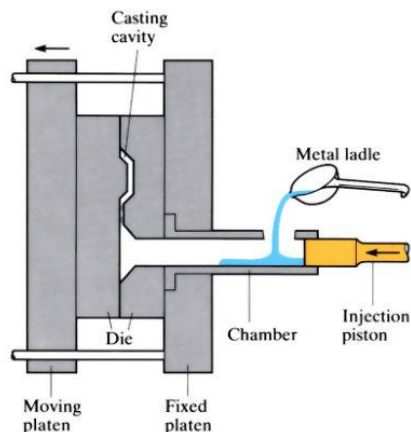
β) Χύτευση σε μήτρα (*Die casting*)

Είναι μια μέθοδος χύτευσης κατά την οποία το τηγμένο μέταλλο ωθείται μέσω υψηλής πίεσης στην κατασκευασμένη κοιλότητα (αποτύπωμα) του καλουπιού (Εικόνα 3.15). Για τον λόγο αυτό είναι γνωστή και ως ‘*High – pressure die casting*’. Το καλούπι αποτελείται ουσιαστικά από δύο συναρμολογημένα, σκληρυμένα, χαλύβδινα πλαίσια, στη μέσα επιφάνεια των οποίων έχει δημιουργηθεί η κοιλότητα, στο σχήμα του

επιθυμητού τεμαχίου (μήτρα). Το λιωμένο μέταλλο χύνεται εντός των δύο πλαισίων και παίρνει την μορφή της κοιλότητας, καθώς επέρχεται η στερεοποίησή του. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι μη σιδηρούχα και πιο συγκεκριμένα, ψευδάργυρος, χαλκός, αλουμίνιο, μαγνήσιο, μόλυβδος, κασσίτερος και τα κράματά του.

Η παραγωγή διάφορων εξαρτημάτων μέσω της χύτευσης σε μήτρα είναι απλή σχετικά διαδικασία. Το κόστος ανά τεμάχιο διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, ιδιαίτερα όταν η παραγωγή γίνεται μαζικά και σε βιομηχανικό επίπεδο. Τα προϊόντα που παράγονται έχουν πολύ καλή, λεία επιφάνεια, ελεύθερη ακαθαρσιών και ρωγμών και αρκετά ικανοποιητικές διαστασιολογικές λεπτομέρειες.

Τα τεμάχια που παράγονται συνήθως είναι μικρά (30g έως 10kg), ενώ όσο μεγαλύτερες είναι οι μήτρες χύτευσης τόσο αυξάνεται και το οικονομικό κόστος. Επιπλέον, ο αρχικός εξοπλισμός χύτευσης και οι μεταλλικές μήτρες αποτελούν ένα αρκετά μεγάλο κεφαλαιακό κόστος, παρόλο που η κάθε μήτρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές χυτεύσεις. Τέλος, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μέταλλα υψηλής ρευστότητας, διαφορετικά υπάρχουν πολλές πιθανότητες αποτυχίας.



Εικόνα 3.15 Χύτευση υψηλής πίεσης σε μήτρα (πηγή:

https://www.open.edu/openlearn/pluginfile.php/3276893/tool_ocwmanage/articletext/0/h10-1_400.jpg)

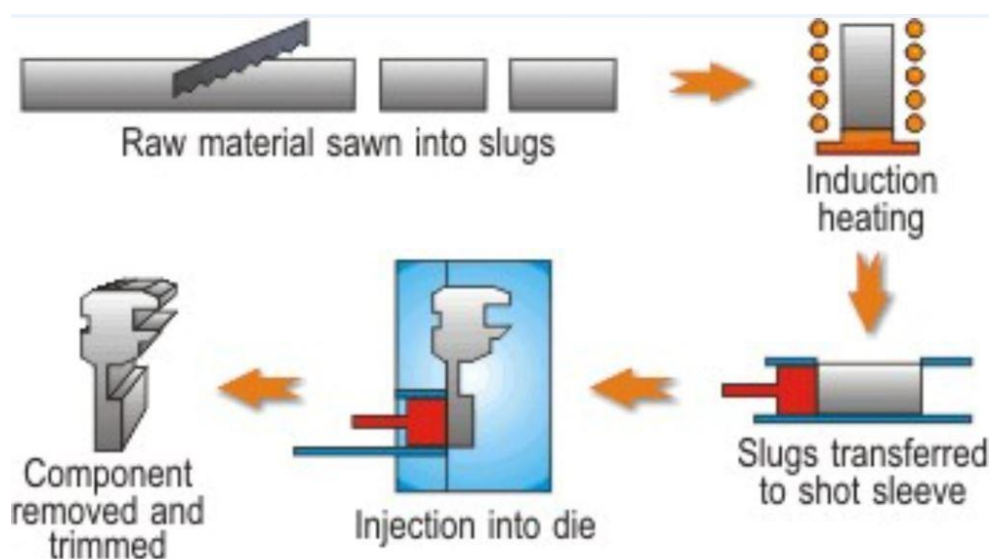
γ) Χύτευση μετάλλων σε ημιστερεά κατάσταση (*Semi – solid metal casting*)

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια παραλλαγή της χύτευσης σε μήτρα. Χρησιμοποιείται για μη σιδηρούχα μέταλλα, όπως αλουμίνιο, μαγνήσιο και χαλκός. Έχει ονομαστεί έτσι από την ιδιότητα των ρευστών να ρέουν όταν έχει μειωθεί πολύ

το ιξώδες τους (θιξοτροπία), αλλά όταν πυκνώνουν να παραμένουν στάσιμα (ρεοπηξία) (Anthony 1999). Η χύτευση γίνεται σε θερμοκρασίες όπου περίπου το 30% έως 65% του μετάλλου παραμένει σε στερεή κατάσταση και το 70% έως 35% έχει γίνει παχύρρευστο. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές διαδικασίες:

- *Thixocasting*

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένα προκατασκευασμένο τεμάχιο (*slug* ή *billet*), το οποίο έχει παραχθεί με χύτευση. Στη συνέχεια το τεμάχιο αναθερμαίνεται σε ημιστερεά κατάσταση και τέλος χύνεται μέσα σε σκληρυμένες, χαλύβδινες μήτρες με πίεση, όπου παίρνει το επιθυμητό σχήμα και στερεοποιείται (Εικόνα 3.16). Τα προϊόντα που προκύπτουν είναι υψηλής ποιότητας, λόγω των καλών συνθηκών που έχουν διαμορφωθεί (Midson 2008). Παρόλα αυτά η διαδικασία είναι αρκετά δαπανηρή και λίγα τα μέταλλα που χυτεύονται με αυτή τη μέθοδο.

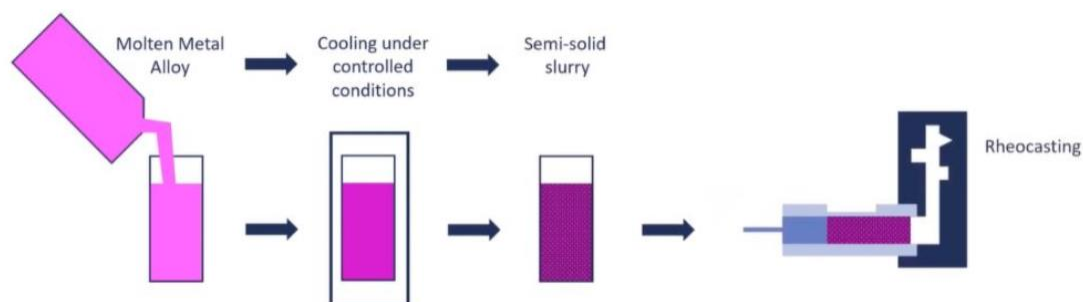


Εικόνα 3.16 Thixocasting (πηγή: <https://www.sunrise-metal.com/rheocasting-vs-thixocasting-and-high-pressure-die-casting/>)

- *Rheocasting*

Στη συγκεκριμένη διαδικασία το μέταλλο λιώνει σε ένα τυπικό φούρνο χύτευσης και στη συνέχεια σε κατάλληλες συνθήκες αποκτάει την ημιστερεή του μορφή (Midson 2008). Στη συνέχεια το ημιστερεό μέταλλο εκχύνεται στη μήτρα (Εικόνα 3.17). Η παραγωγή με *Rheocasting* είναι φθηνότερη από τη *Thixocasting*, καθώς

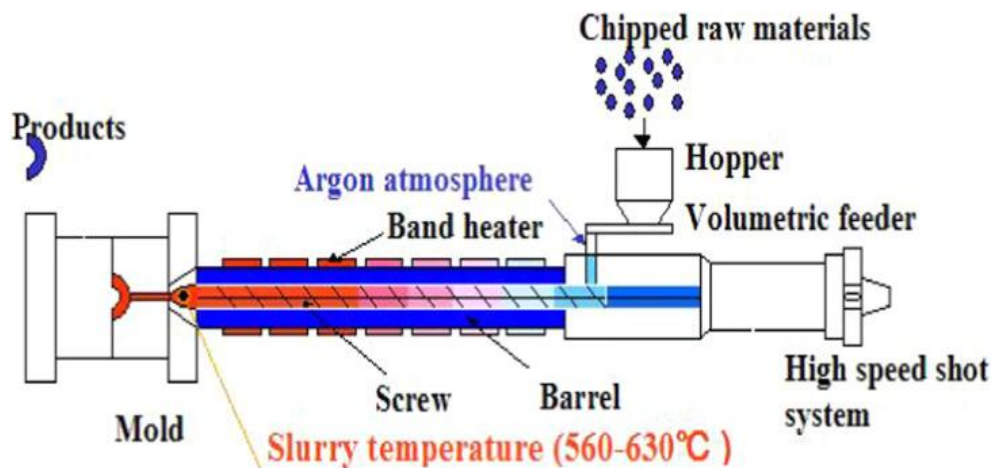
εξοικονομούνται χρήματα από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται.. Επιπλέον, η συρρίκνωση στερεοποίησης των εξαρτημάτων είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη διαδικασία *thixocasting*. Ωστόσο, μετά από αρκετές χύτευσης, ο ημιστερεός πολτός μετάλλου αφήνει στρώσεις μετάλλου που κολλάνε στον εξοπλισμό και δημιουργεί δυσκολίες στη χύτευση.



Εικόνα 3.17 Rheocasting (πηγή: <https://www.sunrise-metal.com/rheocasting-vs-thixocasting-and-high-pressure-die-casting/>)

- *Thixomolding*

Στη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται ένα μηχάνημα παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στη χύτευση με έγχυση. Τα τεμάχια μετάλλου που πρόκειται να λιώσουν, τοποθετούνται σε μια θερμαινόμενη κάννη. Μέσα στη κάννη αυτή υπάρχει ατμόσφαιρα αργού, έτσι ώστε να μην οξειδωθούν τα τεμάχια που πρόκειται να λιώσουν (συνήθως είναι τεμάχια μαγνησίου και διάφορα κράματά του). Ένας κολχιομεταφορέας (*screw conveyor*), εντός της κάννης, προωθεί τα τεμάχια προς τα έξω, όπου υπάρχει ένας χώρος με υψηλή θερμοκρασία. Δημιουργείται έτσι μια ημιστερεά δομή των τεμαχίων (Εικόνα 3.18). Ο κοχλίας κινείται προς τα εμπρός και μόλις έχει συσσωρευθεί μεγάλη ποσότητα ημιστερεού μετάλλου, τον εγχύει σε μια χαλύβδινη μήτρα. Η συγκεκριμένη χύτευση είναι παρόμοια με τη χύτευση υπό κενό, και έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο πορώδες και καλύτερη αντοχή σε κόπωση σε σχέση με τη συμβατική χύτευση σε μήτρα. (Midson 2004).



Εικόνα 3.18 Thixomolding (πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/thixomolding>)

Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων χύτευσης ημι-στερεών μετάλλων είναι η πολυπλοκότητα των τεμαχίων που μπορούν να παραχθούν, η εξαιρετικά λεία επιφάνεια, η διαστασιολογική ακρίβεια, η ανυπαρξία πορώδους, οι άριστες, σχεδόν, μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν, καθώς και η εύκολη, μετέπειτα, θερμική κατεργασία τους. Στα μειονεκτήματα ανήκει το γεγονός ότι ο εξοπλισμός για αυτού του είδους τη χύτευση χρειάζεται τακτικό έλεγχο. Επίσης, ο χρόνος που διαρκεί η κάθε χύτευση είναι μεγάλος, δημιουργώντας μείωση του ρυθμού παραγωγής.

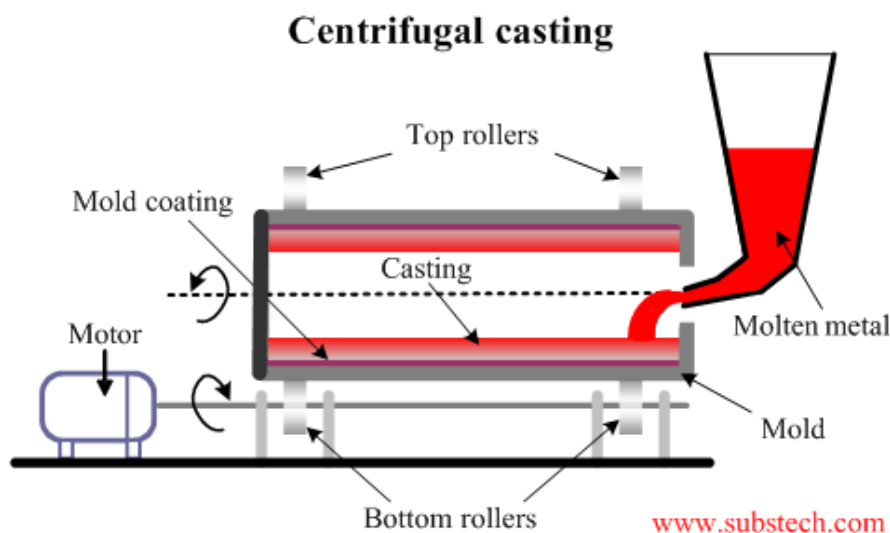
δ) Φυγοκεντρική χύτευση (*Centrifugal casting*)

Είναι μια μέθοδος χύτευσης που χρησιμοποιείται κυρίως στην αργυροχρυσοχοΐα. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται η φυγόκεντρος δύναμη, δηλαδή η φαινόμενη δύναμη που εμφανίζεται σε ένα σώμα, όταν αυτό εκτελεί κυκλική κίνηση, ως προς κάποιον θεωρητικό παρατηρητή που βρίσκεται στο περιστρεφόμενο, μη αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος ακολουθεί την εξής διαδικασία (Εικόνα 3.19):

Αρχικά, ένας αρθρωτός βραχίονας περιστρέφεται ελεύθερα σε έναν κατακόρυφο άξονα με τη βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα. Ο μηχανισμός αυτός είναι τοποθετημένος σε μια δεξαμενή όπου εγχέεται το λιωμένο μέταλλο. Δίπλα ακριβώς υπάρχει ένα χωνευτήρι (σαν κεραμικό ταψί) μέσα στο οποίο θερμαίνεται μια ποσότητα μετάλλου με τη βοήθεια ενός ειδικού πυρσού. Όταν το μέταλλο λιώσει, ο βραχίονας απελευθερώνεται, υποχρεώνοντάς το να πέσει μέσα στο καλούπι, που έχει τοποθετηθεί δίπλα ακριβώς

(μέσω της φυγοκέντρου). Τέλος, το μέταλλο στερεοποιείται, αποκαλύπτοντας το χυτό τεμάχιο.

Τα προϊόντα που προκύπτουν έχουν αρκετά καλή, λεία και ποιοτική επιφάνεια. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οικονομική τόσο από άποψη εξοπλισμού όσο και από άποψη υλικών, καθώς γίνεται πολύ καλή χρήση όλων των υλικών κατά τη χύτευση χωρίς να υπάρχουν απόβλητα υλικά.



Εικόνα 3.19 Φυγοκεντρική χύτευση (πηγή:

https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=centrifugal_casting.png)

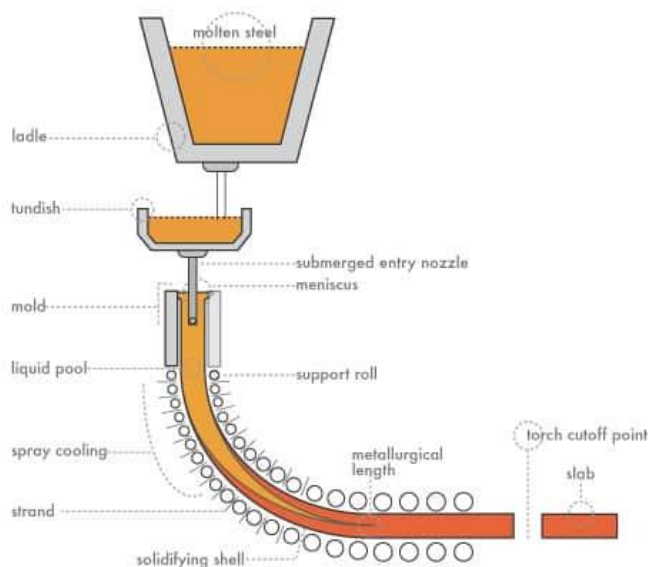
ε) Συνεχής χύτευση (*Continuous casting*)

Είναι μια μέθοδος, η οποία έχει λάβει διάφορες μετατροπές μέσα στα χρόνια. Η πρώτη φορά που εμφανίστηκε ήταν το 1858, από τον Βρετανό μηχανικό και εφευρέτη *Sir Henry Bessemer* (1813-1898). Η μέθοδος χύτευσης του *Bessemer* δεν απέκτησε ποτέ μεγάλη χρήση, λόγω των τεχνικών δυσκολιών που παρουσιάζονταν, με πιο χαρακτηριστικό την επικόλληση του κελύφους πάνω στο καλούπι, με αποτέλεσμα το λιωμένο μέταλλο να χύνεται έξω από το καλούπι. Το 1934, ο Γερμανός *Siegfried Junghans* (1915-1999) έλυσε το πρόβλημα αυτό με ορισμένες μετατροπές της προηγούμενης μεθόδου. Από τότε, η μέθοδος έχει υποστεί διάφορες νέες καινοτομίες και μετατροπές και σήμερα, μαζί με την χύτευση σε άμμο, αποτελούν τις δύο πιο πολυχρησιμοποιούμενες μεθόδους χύτευσης.

Η διαδικασία έχει ως εξής (Εικόνα 3.20):

Το λιωμένο μέταλλο (συνήθως χάλυβας) ρέει από μια δεξαμενή μέσω ενός αγωγού προς το καλούπι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20. Στη δεξαμενή υπάρχει αρκετό μέταλλο, έτσι ώστε η παροχή προς το καλούπι να είναι συνεχής και σταθερή. Η παροχή ελέγχεται με τη βοήθεια ενός ακροφυσίου, που συνδέει τη δεξαμενή με τον αγωγό και το καλούπι. Κατά τη διάρκεια που το μέταλλο βρίσκεται στην δεξαμενή, υπάρχει η δυνατότητα εξευγενισμού του, δηλαδή η απομάκρυνση τυχών εγκλεισμάτων που ίσως δημιουργήσουν σκωρία, διάφορες μικρό ρωγμές ή επιφανειακά ελαττώματα. Πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του μετάλλου εντός της δεξαμενής τοποθετείται κάλυμμα σκωρίας, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αντίδρασή του με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία μπορεί να επιφέρει επιζήμια αποτελέσματα. Μόλις το λιωμένο μέταλλο πληρώσει όλο το καλούπι, αφήνεται να στερεοποιηθεί, με τη βοήθεια των υδρόψυκτων τοιχωμάτων του καλουπιού («πρώτη ψύξη»). Έτσι, δημιουργείται ένα σκληρό κέλυφος περιμετρικά των τοιχωμάτων και το καλούπι ανακινείται κατακόρυφα, ώστε να αυτό να αποκολληθεί. Στη συνέχεια, μόλις το τεμάχιο βγει από το καλούπι, ακολουθεί ψεκάσμος με νερό («δεύτερη ψύξη»).

Συνήθως, μετά τη χύτευση και τις διαδικασίες ψύξης, τα τεμάχια κατεργάζονται μηχανικά για να αποκτήσουν τις ακριβείς, επιθυμητές διαστάσεις, από μηχανήματα έλασης και ολκής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για κατασκευή ελασμάτων, ράβδων και πλακών.



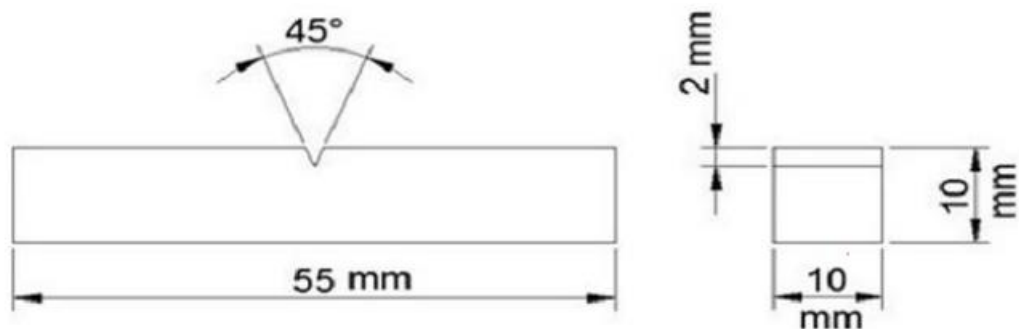
Εικόνα 3.20 Συνεχής χύτευση (πηγή: <https://www.calmet.com/wp-content/uploads/2017/12/diagram1.jpg>)

Κεφάλαιο 4: Κατασκευή χυτών δοκιμών κρούσης/εφελκυσμού

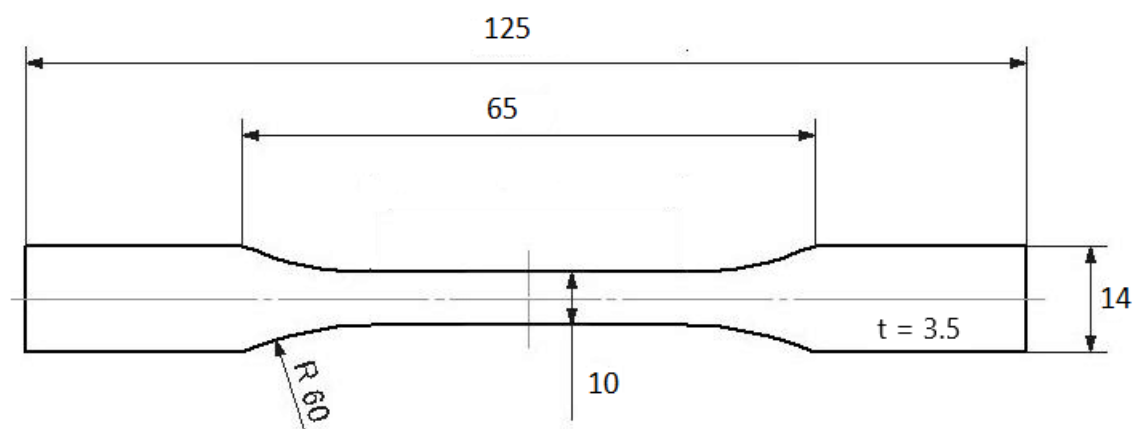
Η διαδικασία της χύτευσης έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών και στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μια επίσκεψη στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού.

4.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση μοντέλων δοκιμών

Αρχικά δημιουργήθηκαν πρότυπα μοντέλα των δοκιμών με τρισδιάστατη εκτύπωση, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως μοντέλα στα καλούπια χύτευσης. Οι διαστάσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών κρούσης καθορίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο *E8* της *ASTM* (*ASTM E8, 2013*) και απεικονίζονται στις Εικόνας 4.1 και 4.2.

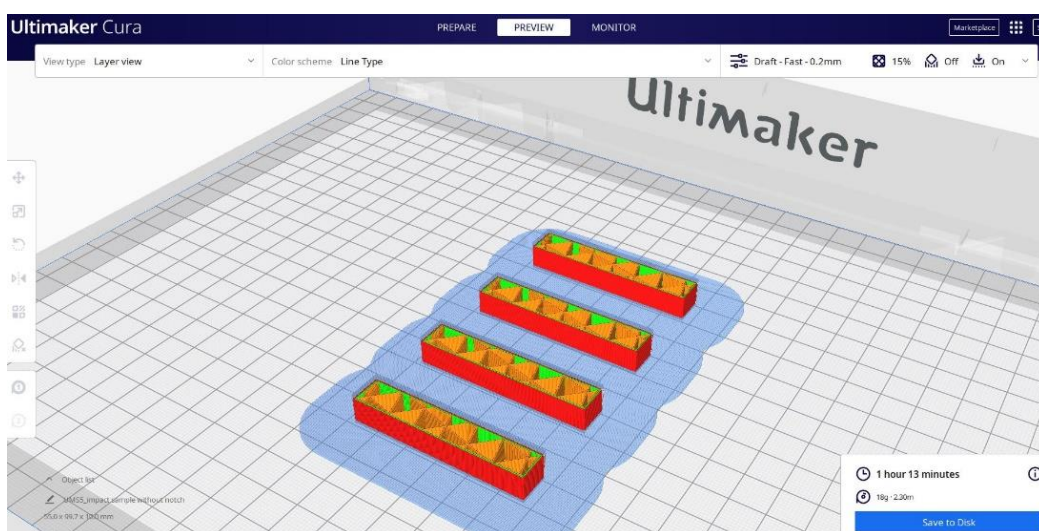


Εικόνα 4.1 Δοκίμιο κρούσης σύμφωνα με το πρότυπο *ASTM E8, 2013*

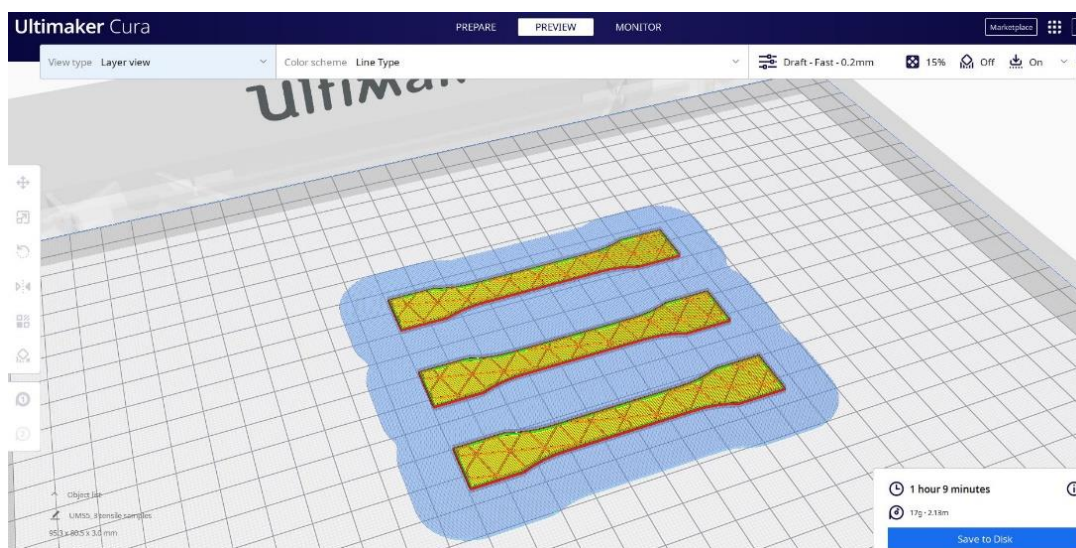


Εικόνα 4.2 Δοκίμιο εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο *ASTM E8, 2013*

Τα μοντέλα, αρχικά, σχεδιάστηκαν σε 3 διαστάσεις στο λογισμικό *AutoCAD*. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος εκτυπωτής *UltiMaker S5* (Εικόνα 4.5), που διαθέτει το Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, καθώς και το λογισμικό *UltiMaker Cura*, το οποίο υποστηρίζει τον έλεγχο ενός (οποιοδήποτε) τρισδιάστατου εκτυπωτή. Το Cura βοηθά τον χρήστη να προετοιμάσει και να επεξεργαστεί τα μοντέλα που πρόκειται να κατασκευαστούν, προσφέροντάς του τη δυνατότητα να προσομοιώσει την εκτύπωση, μέσω ενός εύχρηστου και φιλικού, προς τον χρήστη, γραφικού περιβάλλοντος. Στις Εικόνες 4.3 και 4.4. παρουσιάζεται η κύρια οθόνη του λογισμικού *Cura* και η τοποθέτηση των δοκιμών κρούσης και εφελκυσμού στο τραπέζι του εκτυπωτή καθώς και πληροφορίες για το χρόνο εκτύπωσης.



Εικόνα 4.3 Δοκίμια κρούσης στο λογισμικό *UltiMaker Cura*

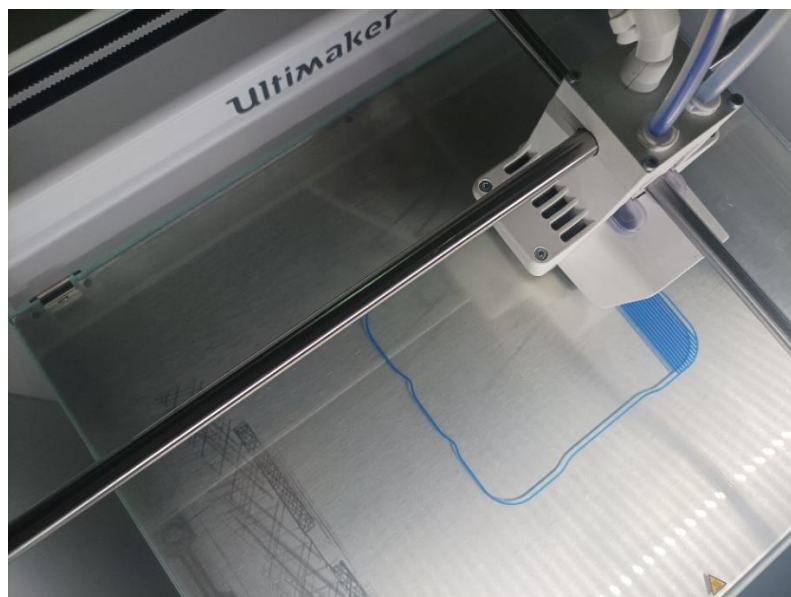


Εικόνα 4.4 Δοκίμια εφελκυσμού στο λογισμικό *UltiMaker Cura*

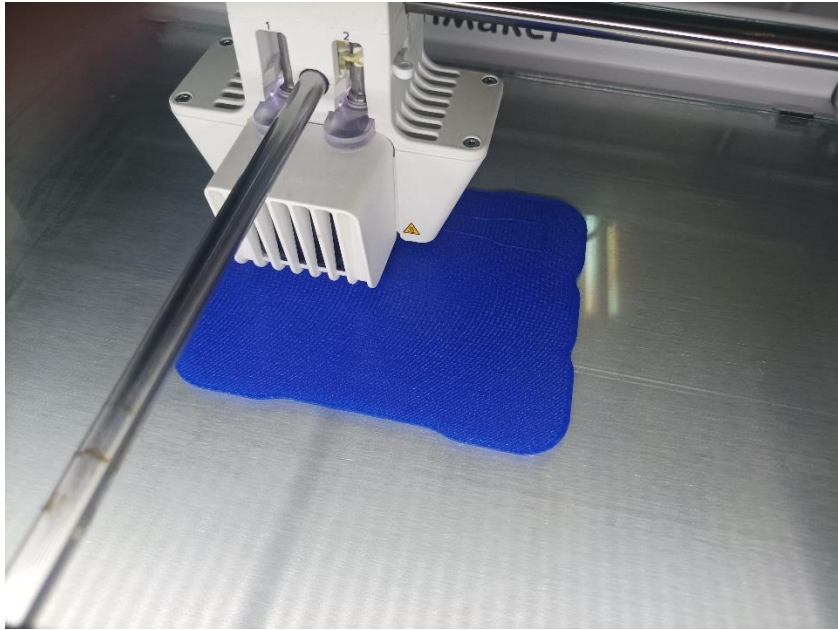
Αφού έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στον εκτυπωτή, επιλέχθηκε ως υλικό εκτύπωσης το *PLA (Polylactic acid)*, καθώς και ορισμένες παράμετροι όπως θερμοκρασία και ταχύτητα, και ξεκίνησε η τρισδιάστατη εκτύπωση. Η διαδικασία της εκτύπωσης διήρκησε μερικές ώρες για κάθε μια από τις ομάδες *3D* μοντέλων. Τα αποτελέσματα της εκτύπωσης, καθώς και ορισμένες φωτογραφίες κατά τη διάρκεια αυτής παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.5-4.14.



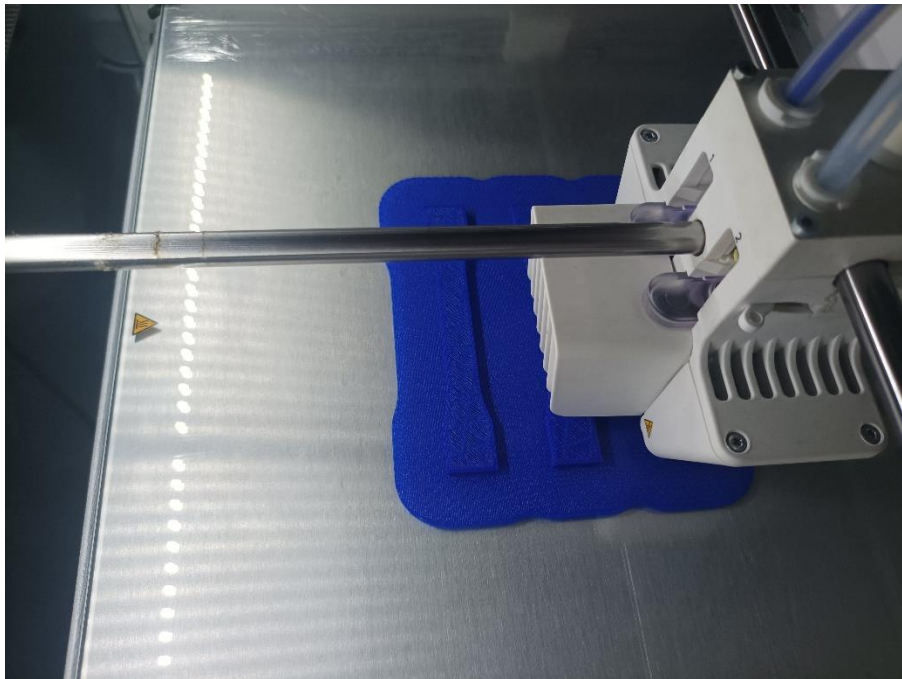
Εικόνα 4.5 Εκτυπωτής 3D UltiMaker S5



Εικόνα 4.6 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρότυπων δοκιμών εφελκυσμού (εκτύπωση βάσης raft)



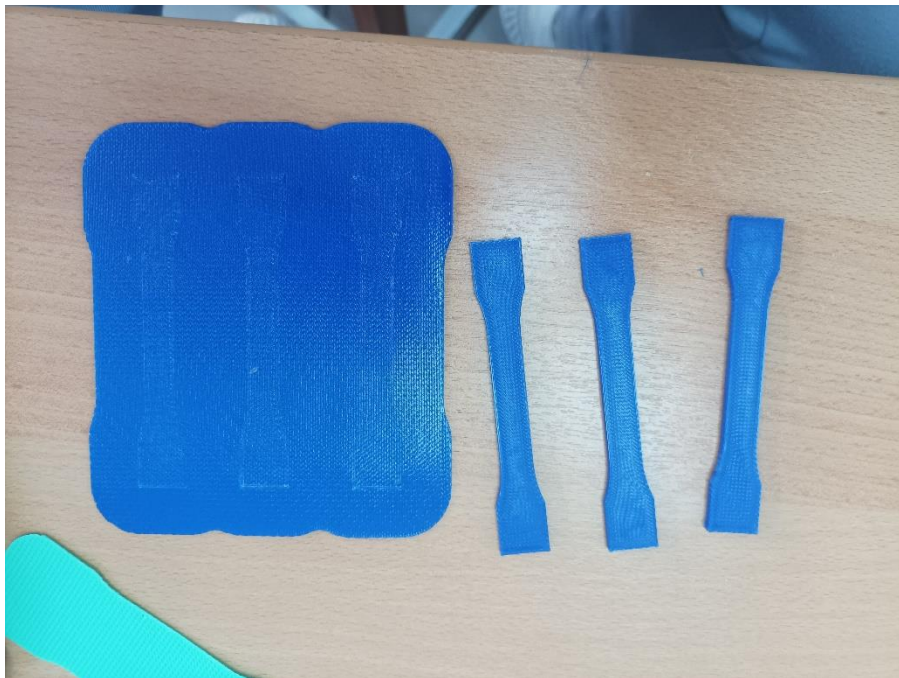
Εικόνα 4.7 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρότυπων δοκιμίων εφελκυσμού (αρχικές στρώσεις (layers))



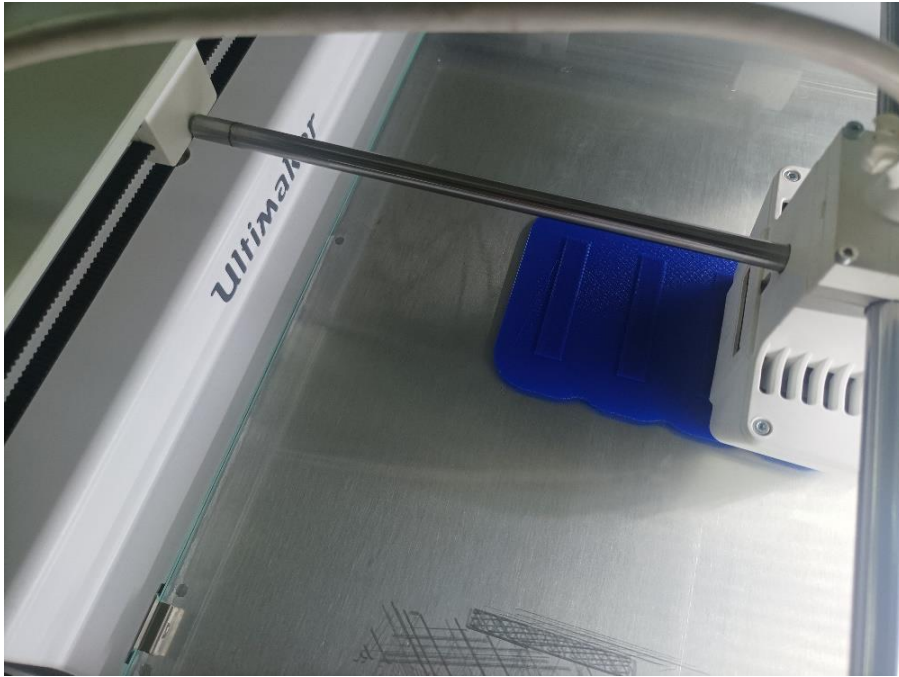
Εικόνα 4.8 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρότυπων δοκιμίων εφελκυσμού (τελικές στρώσεις (layers))



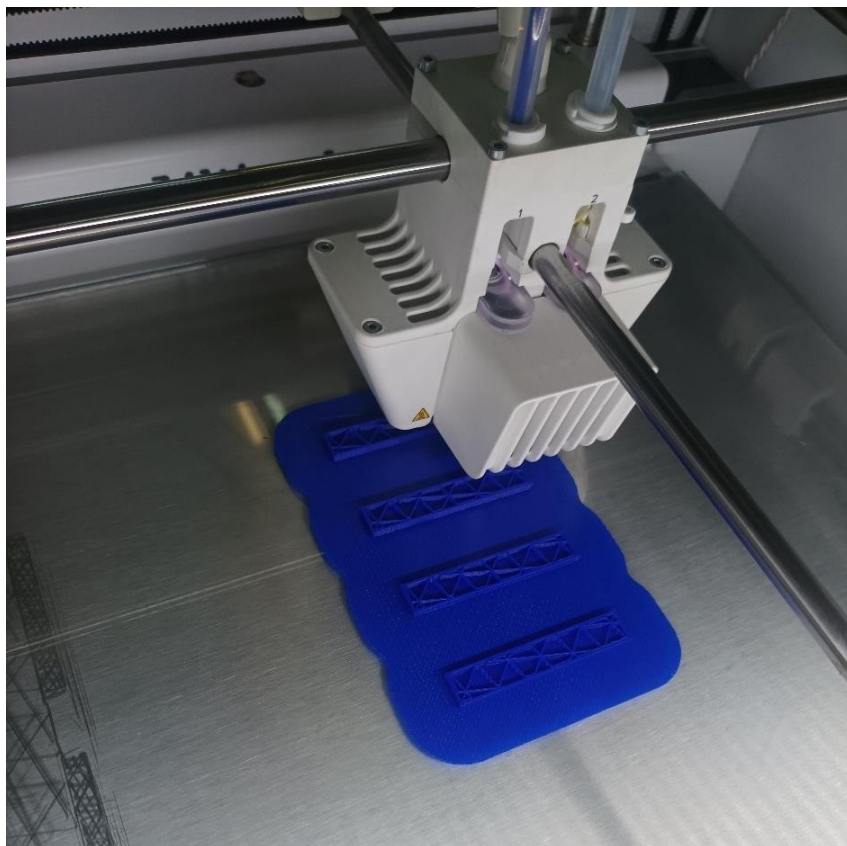
Εικόνα 4.9 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρότυπων δοκιμών εφελκυσμού (ολοκλήρωση εκτύπωσης)



Εικόνα 4.10 Πρότυπα δοκιμα εφελκυσμού



Εικόνα 4.11 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρότυπων δοκιμών κρούσης (ενδιάμεσες στρώσεις)



Εικόνα 4.12 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρότυπων δοκιμών κρούσης (μοτίβο γεμίματος)



Εικόνα 4.13 Τρισδιάστατη εκτύπωση πρτύπων δοκιμών κρούσης (ολοκλήρωση εκτύπωσης)

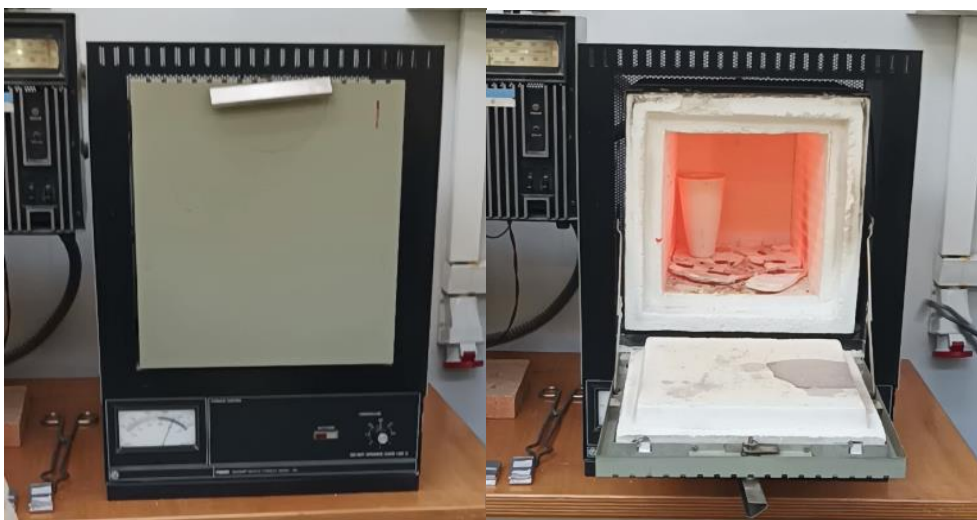


Εικόνα 4.14 Εκτυπωμένα πρότυπα δοκιμα κρούσης

Μετά τη δημιουργία των μοντέλων, ακολούθησε η διαδικασία κατασκευής των καλουπιών άμμου, που απαιτούνται για τη χύτευση σε άμμο.

4.2 Εξοπλισμός χύτευσης

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας, έγινε χρήση των συσκευών και οργάνων του Εργαστηρίου Μηχανουργικών Κατεργασιών και του Εργαστηρίου Υλικών. Η τήξη του αλουμινίου έγινε στους 700–750 °C σε ηλεκτρικό φούρνο *FISHER Model 186* (Εικόνα 4.2.1), ο οποίος λειτουργεί με μέγιστη θερμοκρασία τους 1100°C, (θερμοκρασία τήξης καθαρού αλουμινίου 660°C).



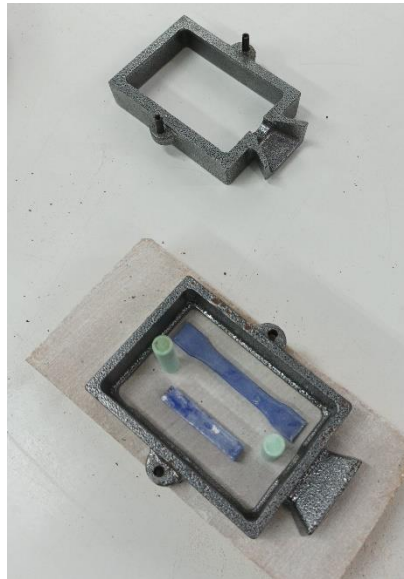
Εικόνα 4.15 Ηλεκτρικός φούρνος *FISHER Model 186*

Επιπλέον, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

- Μεταλλικά διαιρούμενα πλαίσια εσωτερικών διαστάσεων 10.5 x 7.0 cm (Εικόνα 4.16)
- Πυριτική άμμος χύτευσης (Εικόνα 4.17)
- Χωνευτήριο (Εικόνα 4.18)
- Ηλεκτρικός αναδευτήρας άμμου *Mini – Mite Sand Muller Model* (Εικόνα 4.19)
- Κόσκινο για το κοσκίνισμα της άμμου (Εικόνα 4.20)
- Διάφορα εξαρτήματα για ισοπέδωση της άμμου στα καλούπια
- Μεταλλικές λαβίδες
- Ζυγός ακριβείας ± 0.001 g, μοντέλο *Presica 800 M* (Εικόνα 4.21)
- Ηλεκτρικός αναδευτήρας τήγματος μετάλλου (Εικόνα 4.22)
- Ανθρακικό Ασβέστιο (CaCO_3), ως αντικολλητική ουσία, για εύκολη απομάκρυνση των μοντέλων από την άμμο

Για τη χύτευση, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά:

- Εμπορικά καθαρό αλουμίνιο *Al 1100* (τουλάχιστον 99% καθαρότητα αλουμινίου, με προσμίξεις χαλκού σε ποσοστό 0,05–0,2%, σιδήρου και πυριτίου σε ποσοστό 0,85%, μαγνησίου σε ποσοστό 0,05% και ψευδαργύρου σε ποσοστό 0,1%).
- Νιφάδες χαλκού (*Copper flakes*), μεγέθους 1–5 μm , της εταιρείας *Alfa Aesar*, περιεκτικότητας 99,99% *Cu*



Εικόνα 4.16 Μεταλλικό διαιρούμενο πλαίσιο



Εικόνα 4.17 Πυριτική άμμος χύτευσης



Εικόνα 4.18 Χωνευτήριο από γραφίτη (Μποτάς)



Εικόνα 4.19 Ηλεκτρικός αναδευτήρας άμμου Mini – Mite Sand Muller Model



Εικόνα 4.20 Μεταλλικό κόσκινο για το κοσκίνισμα άμμου



Εικόνα 4.21 Ζυγός ακριβείας Presica 800 M



Εικόνα 4.22 Ηλεκτρικός αναδευτήρας τμήματος μετάλλου

4.3 Δημιουργία καλουπιών

Εξ αιτίας του μικρού μεγέθους των μεταλλικών πλαισίων χρησιμοποιήθηκαν τρία ίδια πλαίσια και τοποθετήθηκαν 2 μοντέλα σε κάθε πλαίσιο με σκοπό τη δημιουργία των παρακάτω καλουπιών:

1^ο καλούπι: 2 δοκίμια εφελκυσμού

2^ο καλούπι: 2 δοκίμια κρούσης

3^ο καλούπι: 1 δοκίμιο κρούσης και 1 δοκίμιο εφελκυσμού

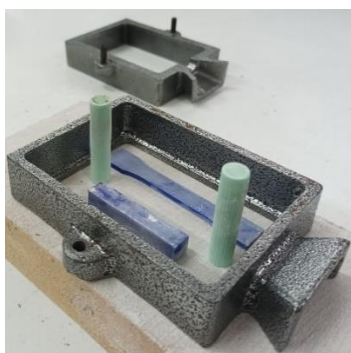
Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία δημιουργία ενός εκ των τριών καλουπιών. Η διαδικασία είναι ίδια και για τη δημιουργία των άλλων 2 καλουπιών.

1) Ανάμιξη άμμου με ηλεκτρικό αναδευτήρα και κοσκίνισμα (Εικόνα 4.23)



Εικόνα 4.23 Ανάδευση άμμου στον ηλεκτρικό αναδευτήρα

2) Τοποθέτηση 2 εκτυπωμένων μοντέλων στο πυθμένα του κάτω πλαισίου και επικάλυψή τους αρχικά με CaCO_3 , ώστε να μη «κολλήσει» στη συνέχεια η άμμος πάνω τους, και μετά με άμμο η οποία έχει πιεστεί πολύ δυνατά ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση διάλυσής της (Εικόνα 4.24 και 4.25).



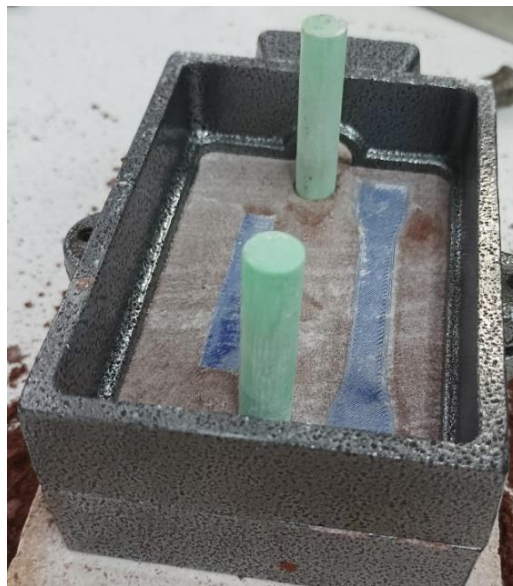
Εικόνα 4.24 Τοποθέτηση τεμαχίου κρούσης και εφελκυσμού στη μήτρα για κατασκευή του καλουπιού

Τα δύο πράσινα κυλινδρικά τεμάχια που φαίνονται στην Εικόνα 4.24 έχουν τοποθετηθεί για να καθοριστεί η ακριβής θέση των μοντέλων μέσα στο κάτω πλαίσιο ώστε να υπάρχει χώρος για τις διόδους εισαγωγής μετάλλου και εξαγωγής αέρα, και στη συνέχεια θα αφαιρεθούν.



Εικόνα 4.25 Γέμισμα με άμμο του κάτω πλαισίου του καλονπιού

3) Τοποθέτηση του πάνω πλαισίου, στήριξη των κυλίνδρων για τις διόδους εισαγωγής μετάλλου και εξαγωγής αέρα, και προσεκτικό γέμισμα με άμμο (Εικόνα 4.26 και Εικόνα 4.27).



Εικόνα 4.26 Προετοιμασία για γέμισμα του πάνω πλαισίου του καλονπιού



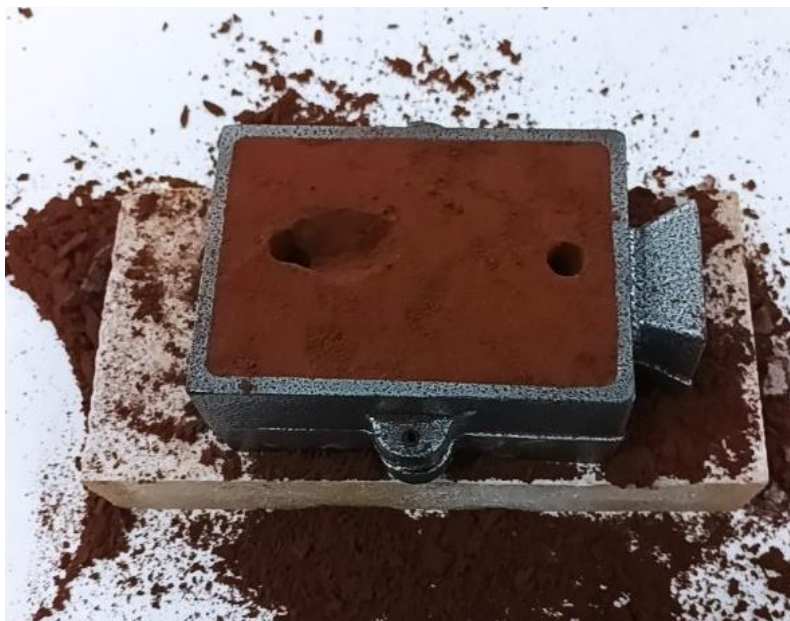
Εικόνα 4.27 Γέμισμα με άμμο του πάνω πλαισίου του καλουπιού

- 4) Προσεκτική αφαίρεση των μοντέλων από το καλούπι και διάνοιξη λεπτών διόδων παροχής, από τις οποίες θα περάσει το τήγμα του μετάλλου και θα διαμοιραστεί στις 2 κοιλότητες, και λεπτών διόδων εξαγωγής αέρα (Εικόνα 4.28).



Εικόνα 4.28 Απομάκρυνση μοντέλων και διάνοιξη λεπτών διόδων

- 5) Προσεκτικό κλείσιμο των δύο πλαισίων του καλουπιού και δημιουργία χοάνης πληρώσεως, για ευκολότερη είσοδο του τήγματος (Εικόνα 4.29)



Εικόνα 4.29 Καλούπι έτοιμο προς χύτευση

4.4 Διαδικασία χύτευσης με 95% Al και 5% Cu

Η χύτευση πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για το κάθε καλούπι. Η απαιτούμενες ποσότητες Al και Cu υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο των μοντέλων και προσαυξήθηκαν κατά περίπου 50% για την πλήρωση των διόδων εισαγωγής μετάλλου και εξαγωγής αέρα.

Οι ακριβείς ποσότητες για τα τρία καλούπια μετρήθηκαν στο ζυγό ακρίβειας και είναι οι εξής:

1^ο καλούπι: 66.728g Al και 3.514g Cu

2^ο καλούπι: 66.803g Al και 3.516g Cu

3^ο καλούπι: 66.935g Al και 3.523g Cu

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στα παρακάτω βήματα και απεικονίζεται στις Εικόνες 4.30–4.36.

- Τοποθέτηση της ποσότητας αλουμινίου στο κεραμικό χωνευτήριο.

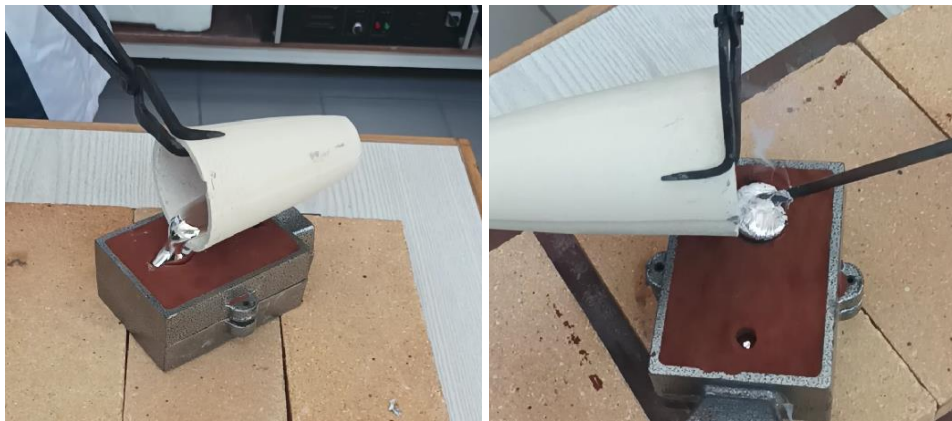
- Εισαγωγή του χωνευτηρίου στον ηλεκτρικό φούρνο, με τη χρήση μεταλλικής λαβίδας (πυράγρα). Ως ατομικά μέσα προστασίας χρησιμοποιήθηκαν πυρίμαχα γάντια, προστατευτικά γυαλιά και εργαστηριακή φόρμας εργασίας.
- Όταν η θερμοκρασία του φούρνου ξεπεράσει τους 700°C (μετά από 20 λεπτά περίπου, το χωνευτήριο αφαιρείται από τον φούρνο, προστίθεται μέσα σ' αυτό η σκόνη του χαλκού, ακολουθεί μια ελαφρά ανάδευση με μεταλλική ράβδο για λίγα δευτερόλεπτα (περίπου 30 δευτερόλεπτα) και το χωνευτήριο εισάγεται ξανά στον φούρνο για 5 επιπλέον λεπτά, περίπου, στους 700°C .
- Μετά τα 5 αυτά επιπλέον λεπτά, το χωνευτήριο εξάγεται από τον φούρνο, αναδεύεται ελαφρώς και το τήγμα εγχύεται προσεκτικά στην χοάνη πληρώσεως του καλουπιού, που δημιουργήθηκε.
- Το καλούπι αφήνεται να ψυχθεί και το μέταλλο εντός του καλουπιού να στερεωθεί εντελώς
- Αφού περάσει κατάλληλο χρονικό διάστημα (πάνω από μισή ώρα) και η θερμοκρασία του καλουπιού έχει φτάσει σε τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος, τα δύο πλαίσια ανοίγουν και αποκαλύπτεται το τεμάχιο.
- Η άμμος απομακρύνεται γύρω από το προϊόν και απορρίπτεται.



Εικόνα 4.30 Έγχυση νιφάδων χαλκού (5% κ.β) στο τήγμα αλουμινίου (95%κ.β) (αριστερά) και ανάδευση (δεξιά)



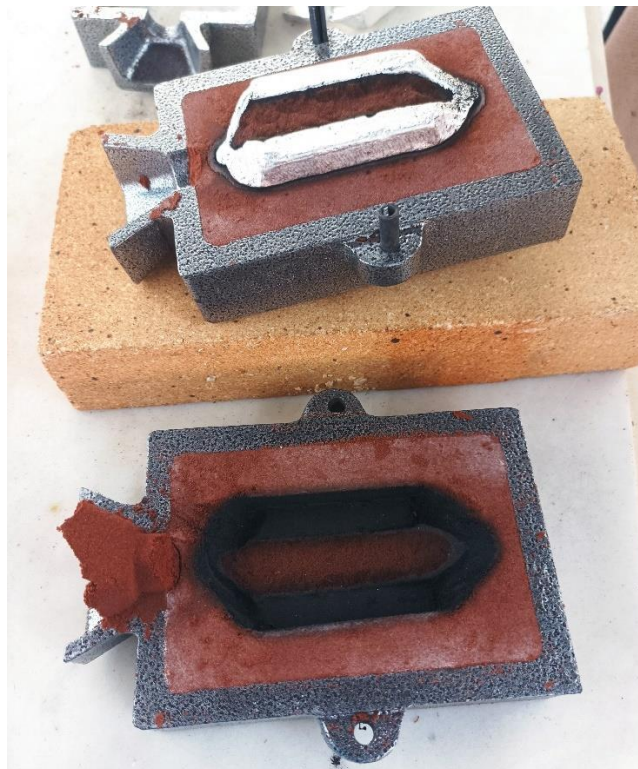
Εικόνα 4.31 Τήγμα 95% κ.β. αλουμινίου και 5% κ.β νιφάδων χαλκού μετά από ανάδευση, έτοιμο για έγχυση στο καλούπι



Εικόνα 4.32 Έγχυση τήγματος στο καλούπι (αριστερά) και έξοδός του από τη δίοδο αέρα (δεξιά)



Εικόνα 4.33 Άνοιγμα 1^ο καλουπιού με τα δύο δοκίμια εφελκυσμού (5% κ.β. Cu)



Εικόνα 4.34 Άνοιγμα 2^ο καλουπιού με τα δύο δοκίμια κρούσης (5% κ.β. Cu)



Εικόνα 4.35 Άνοιγμα 3^{ου} καλουπιού με ένα δοκίμιο κρούσης και ένα δοκίμιο εφελκυσμού (5% κ.β. Cu)



Εικόνα 4.36 Τα 3 χυτά προϊόντα της 1^{ης} χύτευσης, με 5% κ.β. νιφάδων Cu

4.5 Διαδικασία χύτευσης με 85% Al και 15% Cu

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αντίστοιχη με τη διαδικασία της 1^{ης} χύτευσης και απεικονίζεται στις Εικόνες 4.37–4.41. Οι μόνες διαφορές είναι η συνολική ποσότητα Al-Cu που υπολογίστηκε σε 80g περίπου, αντί για 70g στη 1^η χύτευση, καθώς και στις ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν:

1^ο καλούπι: 67.545g Al και 11.920g Cu

2^ο καλούπι: 67.835g Al και 11.974g Cu

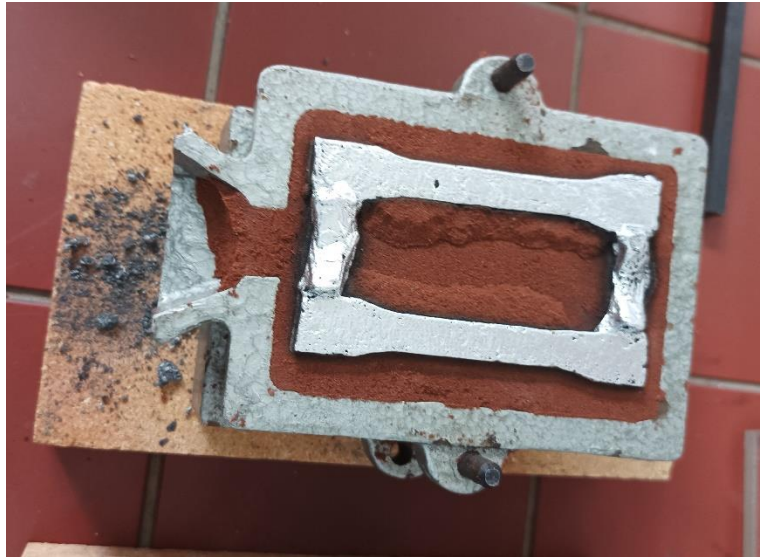
3^ο καλούπι: 67.785g Al και 11.962g Cu



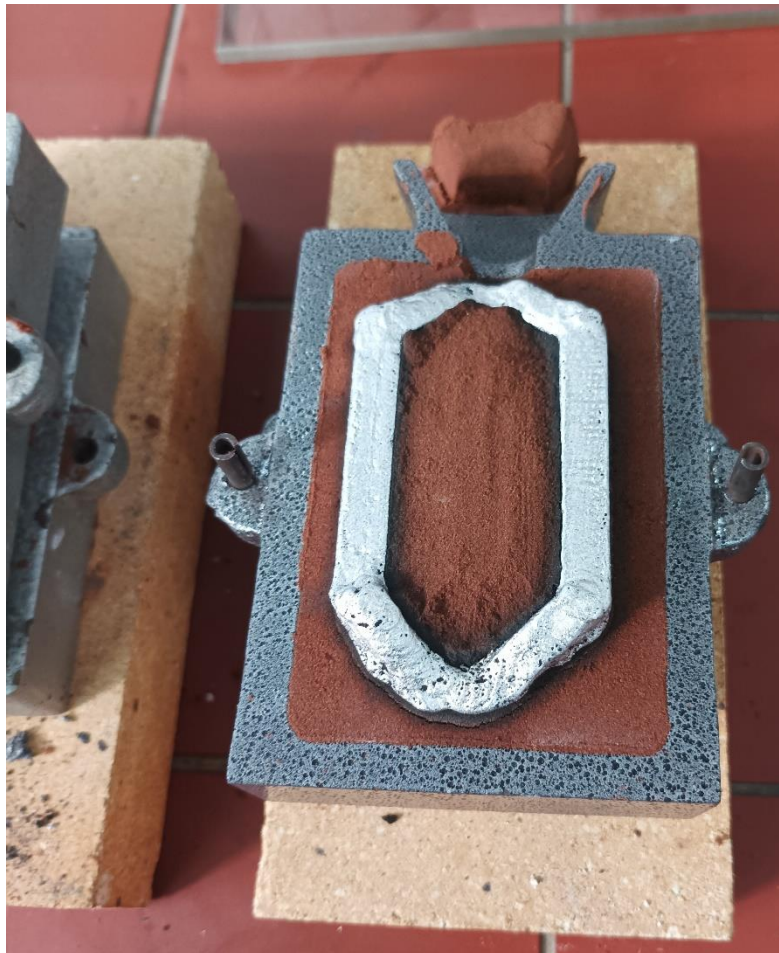
Εικόνα 4.37 Έγχυση νιφάδων χαλκού (15% κ.β) στο τήγμα αλουμινίου (85%κ.β) (αριστερά) και ανάδευση (δεξιά)



Εικόνα 4.38 Έγχυση τήγατος (15% Cu κ.β. και 85% Al κ.β.) στο καλούπι



Εικόνα 4.39 Άνοιγμα 1^ο καλουπιού με δύο δοκίμια εφελκυσμού (15% κ.β. Cu)



Εικόνα 4.40 Άνοιγμα 2^ο καλουπιού με δύο δοκίμια κρούσης (15% κ.β. Cu)



Εικόνα 4.41 Άνοιγμα 3^{ου} καλουπιού με ένα δοκίμιο κρούσης και ένα δοκίμιο εφελκυσμού (15% κ.β. Cu)

Στην Εικόνα 4.41 παρατηρείται ότι το λιωμένο τήγμα αλουμινίου – χαλκού δεν πέρασε από την κοιλότητα του καλουπιού που προοριζόταν για το δοκίμιο του εφελκυσμού. Αυτό, πιθανόν, οφείλεται σε κάποιο λάθος που συνέβη κατά τη δημιουργία του καλουπιού. Πιο συγκεκριμένα, το λιωμένο μέταλλο δε κατάφερε να πληρώσει την κοιλότητα πιθανότατα γιατί δεν ανοίχθηκε σωστά η δίοδος εισαγωγής τήγματος, δηλαδή βαθύτερα από όσο έπρεπε.

Επιπλέον, τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν με τη 2η χύτευση (15% κ.β Cu – 85% κ.β. Al), δεν παρουσίασαν, κατά τον έλεγχο που ακολούθησε, αποδεκτά αποτελέσματα σχετικά με το ποσοστό Cu που περιείχαν. Σύμφωνα με τη μεταλλογραφική εξέταση, ένα πολύ μικρό ποσοστό χαλκού εντοπίστηκε μέσα στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν, και φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των νιφάδων χαλκού παρέμεινε ως ίζημα στον πυθμένα του χωνευτηρίου και δεν αναμείχθηκε με το τήγμα του αλουμινίου ώστε να γίνει πλήρης ομογενοποίηση του μίγματος.

Έτσι, αποφασίστηκε ότι η συγκεκριμένη χύτευση θα πρέπει να επαναληφθεί, με πιο γρήγορη και σωστή ανάδευση, έτσι ώστε να έχουμε ικανοποιητική ανάμειξη των νιφάδων χαλκού στο τηγμένο αλουμίνιο. Για τον λόγο αυτό, η 2^η χύτευση πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Το εργαστήριο αυτό διαθέτει ηλεκτρικό αναδευτήρα του μεταλλικού τήγματος, με αποτέλεσμα η ανάμειξη

του τηγμένου αλουμινίου με τις νιφάδες χαλκού να γίνεται γρήγορα και αποτελεσματικά. Η διαδικασία της 3^{ης} χύτευσης απεικονίζεται στις Εικόνες 4.42 – 4.48.



Εικόνα 4.42 Ηλεκτρικός αναδευτήρας στο εργαστήριο του ΕΜΠ



Εικόνα 4.43 Ηλεκτρικός φούρνος χύτευσης στο εργαστήριο χύτευσης του ΕΜΠ



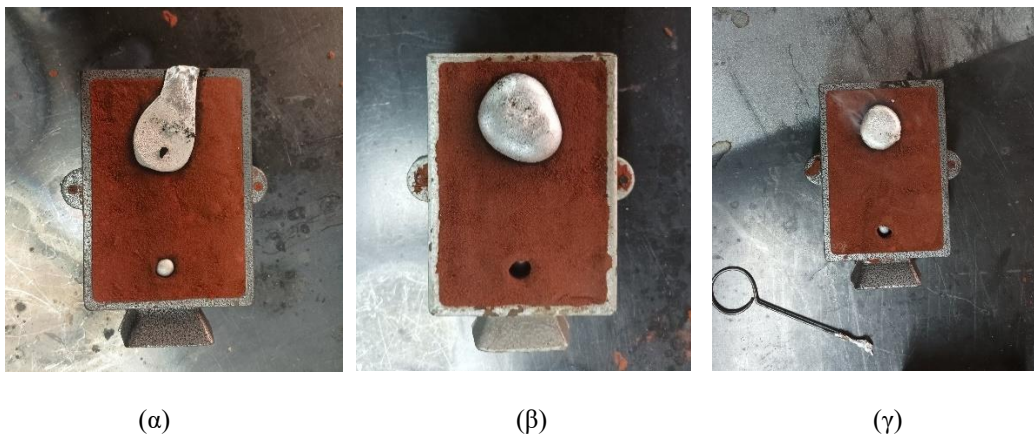
Εικόνα 4.44 Έγχυση νιφάδων χαλκού (15%κ.β.) στο λιωμένο αλουμίνιο



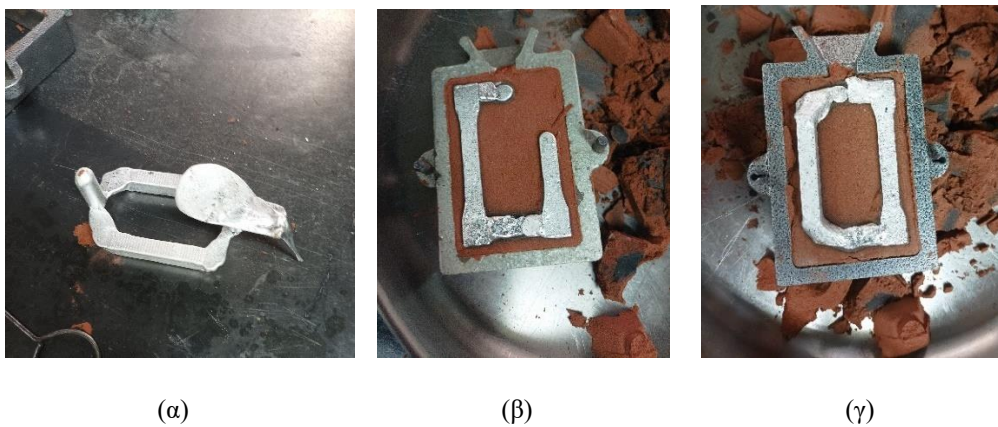
Εικόνα 4.45 Ανάδευση νιφάδων χαλκού (15% κ.β) στο τήγμα αλουμινίου (85%κ.β) με ηλεκτρικό αναδευτήρα



Εικόνα 4.46 Έγχυση τήγματος (15% Cu κ.β. και 85% Al κ.β.) στα καλούπια



Εικόνα 4.47 Καλούπια μετά τη χύτευση. Παρατηρείται στο (β) ότι το τηγμένο μέταλλο δεν έχει εξέλθει από τη δίοδο εξόδου αέρα



Εικόνα 4.48 Άνοιγμα καλουπιών 3^{ης} χύτευσης

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, στο καλούπι με τα δοκίμια εφελκυσμού δεν πραγματοποιήθηκε σωστά η πλήρωση της μιας κοιλότητας. Το λιωμένο μέταλλο, κατά την είσοδό του στο καλούπι, πέρασε μόνο στη μια κοιλότητα ενώ έφτασε μέχρι τη μέση της δεύτερης. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι κατά τη συγκεκριμένη χύτευση, η ποσότητα του τήγματος ήταν λίγο μικρότερη από την απαιτούμενη και αυτό γιατί υπήρξε απώλεια υλικού, καθώς ορισμένη ποσότητα χύθηκε έξω από την κοιλότητα πλήρωσης κατά την έγχυση του τήγματος.

Τα χυτά προϊόντα της 3^{ης} χύτευσης, με περιεκτικότητα 15%κ.β χαλκού και 85%κ.β. αλουμινίου, που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο στο ΕΜΠ, απεικονίζονται στην Εικόνα 4.49.



Εικόνα 4.49 Τα 3 χυτά προϊόντα της 3^{ης} χύτευσης, με 15% κ.β. νιφάδων Cu

4.6 Μηχανουργική Κατεργασία των χυτών δοκιμίων

Όπως προαναφέρθηκε, τα δοκίμια εφελκυσμού και κρούσης σχεδιάστηκαν με βάση το πρότυπο *ASTM E8, 2013*. Για να προκύψουν οι απαραίτητες διαστάσεις που ορίζουν τα πρότυπα είναι αναγκαία η μηχανουργική κατεργασία των χυτών τεμαχίων. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη μηχανουργική κατεργασία περιλαμβάνει τα εξής:

- 1) Ηλεκτρικό δισκοπρίο (Willy 225) (Εικόνα 4.50)



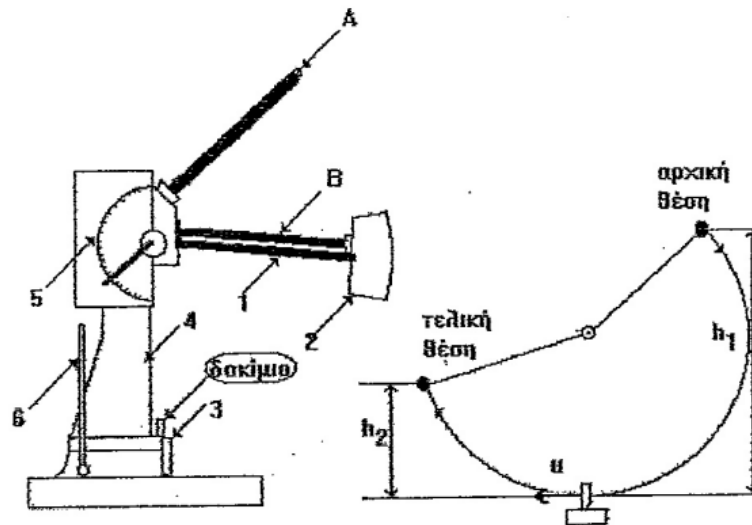
Εικόνα 4.50 Ηλεκτρικό δισκοπρίο Willy 225

- 2) Λίμα, για ελαφρά λείανση των επιφανειών και των αιχμηρών γωνιών, για φινίρισμα και για αποφυγή τραυματισμών.
- 3) Σιδεροπρίο, για την κοπή τμημάτων των χυτών τεμαχίων.
- 4) Μέγγενη, για τη στερέωση των δοκιμίων κατά την κοπή τους με το σιδεροπρίο.
- 5) Παχύμετρο, για τη μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων, καθώς και του βάθους της εγκοπής στα δοκίμια κρούσης που απαιτούνται από το πρότυπο *ASTM E8, 2013*.

Κεφάλαιο 5: Πειραματικός Έλεγχος Δοκιμίων

5.1 Δοκιμασία αντοχής σε κρούση

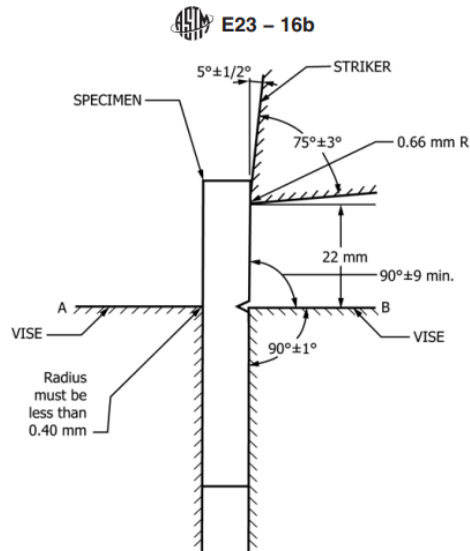
Ως δυσθραυστότητα ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση ενός υλικού, κατά τη στατική ή τη δυναμική φόρτίσή του. Για την πειραματική μέτρηση του μεγέθους αυτού, χρησιμοποιείται η μέθοδος *Izod* και το πρότυπο *ASTM E23, 2016*.



Εικόνα 5.1 Μέθοδος προσδιορισμού αντοχής σε κρούση με τη μέθοδο *Izod*: η συσκευή που χρησιμοποιείται (αριστερά) και η αναπαράσταση της κίνησης της σφύρας (δεξιά)

Στην Εικόνα 5.1 παρουσιάζονται τα παρακάτω εξαρτήματα:

- A – Μοχλός χειρισμού κρουσιμέτρου
- B, 1 – Ράβδοι συγκράτησης σφύρας
- 2 – Σφύρα, που ασκεί το κρουστικό φορτίο
- 3 – Μέγγενη συγκράτησης δοκιμίου κρούσης
- 4 – Βασικό κορμός του κρουσιμέτρου
- 5 – Κλίμακα μέτρησης ενέργειας θραύσης (kJ)
- 6 – Προστατευτική ράβδος (συγκράτηση της σφύρας μετά τη κρούση)



NOTE 1—All dimensional tolerances shall be ± 0.05 mm unless otherwise specified.
 NOTE 2—The clamping surfaces of A and B shall be flat and parallel within 0.025 mm.
 NOTE 3—Surface finish on striker and vise shall be $2 \mu\text{m}$ (R_a).
 NOTE 4—Striker width must be greater than that of the specimen being tested.

Εικόνα 5.2 Γεωμετρική απεικόνιση της διάταξης στήριξης του δοκιμίου κρούσης κατά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση με τη μέθοδο Izod (πηγή: <https://pppars.com/wp-content/uploads/2020/12/ASTM-E23-%E2%88%92-16b.pdf>)

Κατά τη δοκιμή *Izod*, τα δοκίμια είναι είτε ορθογωνικής διατομής (όπως αυτά που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας), είτε κυκλικής διατομής, όπου θα ήταν απαραίτητες περισσότερες από μια εγκοπές για καλύτερη στήριξη των δοκιμίων στο μηχάνημα.

Για δοκίμια ορθογωνικής διατομής, η δοκιμασία *Izod* περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

(α) Το δοκίμιο συγκρατείται σε κατακόρυφη θέση, τέτοια ώστε η εγκοπή να έχει προσανατολισμό προς την αντίθετη κατεύθυνση από τη μεριά κίνησης της σφύρας.

(β) Η σφύρα αφήνεται να πέσει και χτυπάει το δοκίμιο στην πλευρά της εγκοπής, σε ύψος 22 mm πάνω από αυτή.

(γ) Στη συνέχεια, όταν η κίνηση της σφύρας σταματήσει, το δοκίμιο απομακρύνεται από τη μέγγενη του κρουσιμέτρου. Το κρουσίμετρο που διαθέτει το Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του ΠΑΔΑ είναι μοντέλο *Avery – Denison* με δυνατότητα μέτρησης της απορροφούμενης ενέργειας 0–15 J (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3 Κρουσίμετρο Avery - Denison

Κατά το πείραμα κρούσης, η σφύρα ανυψώνεται κατά 61 cm και αφήνεται ελεύθερη να πέσει και να χτυπήσει το δοκίμιο που στηρίζεται στη μέγγενη του κρουσιμέτρου. Η μάζα της σφύρας είναι $2,5\text{ kg}$ και η ταχύτητα τη στιγμή της σύγκρουσης με το δοκίμιο είναι $3,6\text{ m/s}$. Η δοκιμασία έγινε σε συνθήκες θερμοκρασίας 32°C και πίεσης 1 atm .

Για τη δοκιμασία αυτή, μετρήθηκαν αρχικά με χρήση παχυμέτρου το πλάτος (a) και το πάχος (b) στην τομή των δοκιμίων (Εικόνα 5.4) και από τογίνόμενό τους υπολογίστηκε το εμβαδό της διατομής (A) που δέχεται το κρουστικό φορτίο.



Εικόνα 5.4 Δοκίμια κρούσης

Μετά από κάθε κρούση καταγράφηκε η τιμή της ενέργειας (E) που χρειάστηκε για να επέλθει θραύση. Η δυσθραυστότητα (G) υπολογίστηκε ως το πηλίκο της απαιτούμενης ενέργειας προς το εμβαδό της άκοπης διατομής A . Οι μετρήσεις δίνονται στον πίνακα 5.1

Πίνακας 5.1 Μετρήσεις δοκιμασίας αντοχής σε κρούση

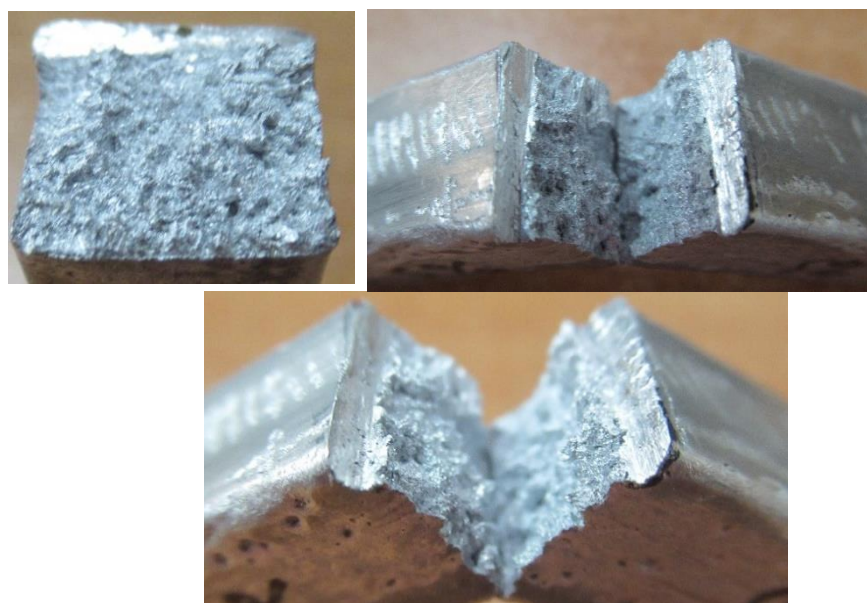
A/A	Δοκίμιο	Πλάτος (a) (mm)	Πάχος (b) (mm)	Εμβαδόν διατομής ($A=a*b$) (cm^2)	Ενέργεια θραύσης (E) (Joule)	Δυσθραυστότητα (G) (Joule/cm^2)
1	Al + 5%Cu	10,60	8,15	0,864	7,62	8,820
2	Al + 5%Cu	9,73	8,58	0,835	6,60	7,906
3	Al +10%Cu	9,80	7,65	0,750	5,22	6,963
4	Al +15%Cu	10,35	7,68	0,795	0,68	0,855
5	Al +15%Cu	10,50	7,78	0,817	0,62	0,759

Διαπιστώνεται από τις παραπάνω μετρήσεις, ότι η αύξηση του ποσοστού των νιφάδων χαλκού στα δοκίμια επιφέρει μείωση της δυσθραυστότητας, δηλαδή κάνει το υλικό πιο ψαθυρό. Τα τελικά αποτελέσματα αναγράφονται στον Πίνακα 5.2:

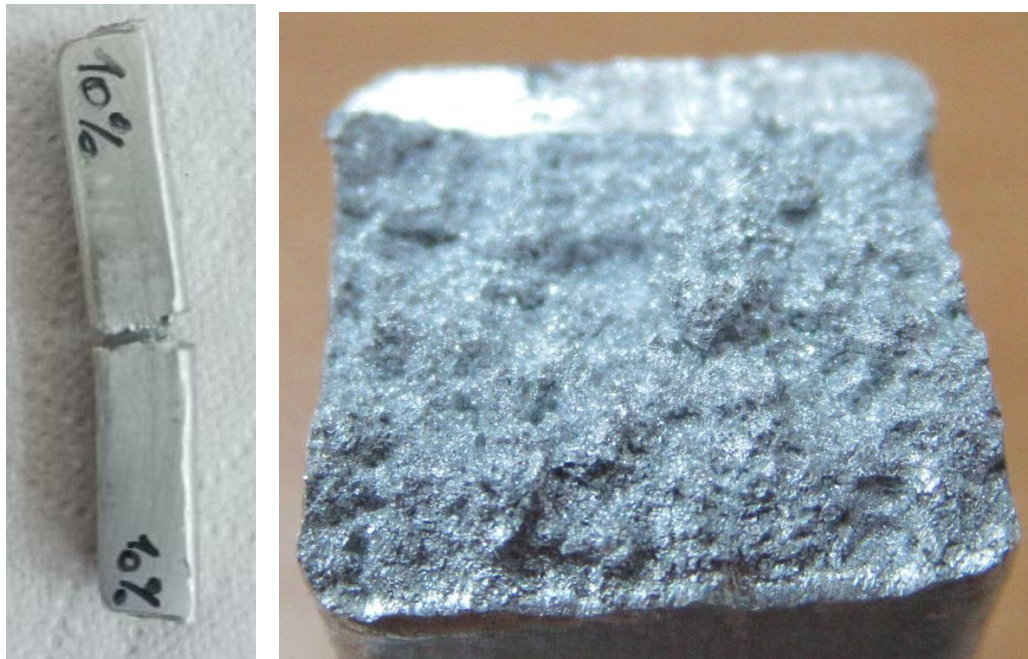
Πίνακας 5.2 Τελικά αποτελέσματα δοκιμασία κρούσης

Δοκίμιο	Δυσθραυστότητα (G) (Joule/cm^2)
Al + 5%Cu	$8,363 \pm 0,457$
Al +10%Cu	6,963
Al +15%Cu	$0,807 \pm 0,048$

Στις Εικόνες 5.5 – 5.10 φαίνονται τα δοκίμια μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση.



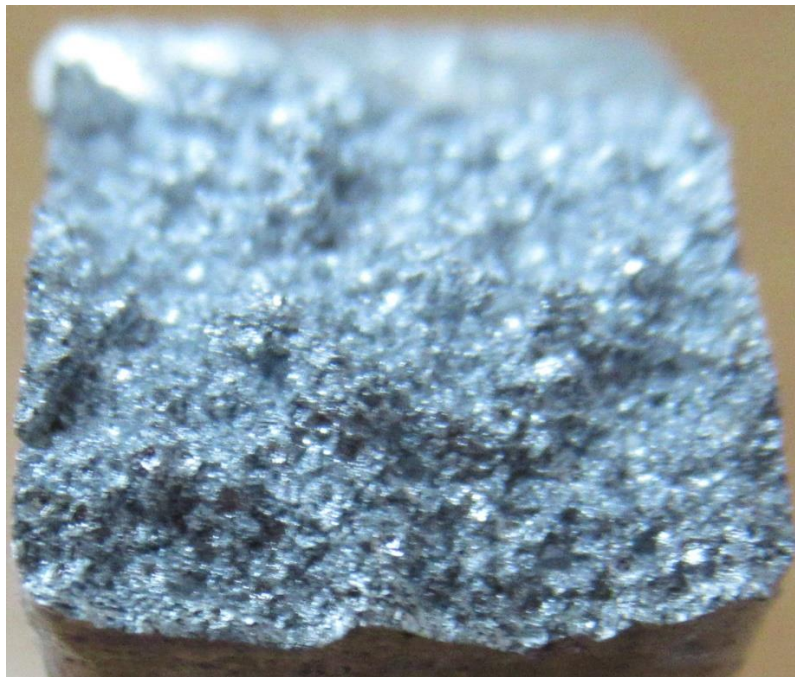
Εικόνα 5.5 Δοκίμια αλουμινίου περιεκτικότητας 5% κ.β. σε flakes χαλκού μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση



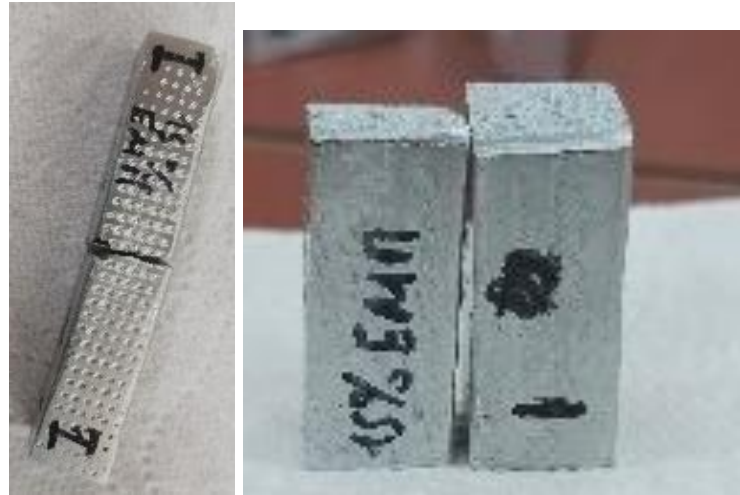
Εικόνα 5.6 Δοκίμια αλουμινίου περιεκτικότητας 10% κ.β. σε flakes χαλκού μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση



Εικόνα 5.7 Δοκίμια αλουμινίου περιεκτικότητας 15% κ.β. σε flakes χαλκού μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση (1^η κατασκευή)



Εικόνα 5.8 Δοκίμια αλουμινίου περιεκτικότητας 15% κ.β. σε flakes χαλκού μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση (1η κατασκευή)



Εικόνα 5.9 Δοκίμια αλουμινίου περιεκτικότητας 15% κ.β. σε flakes χαλκού μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση (2^η κατασκευή)

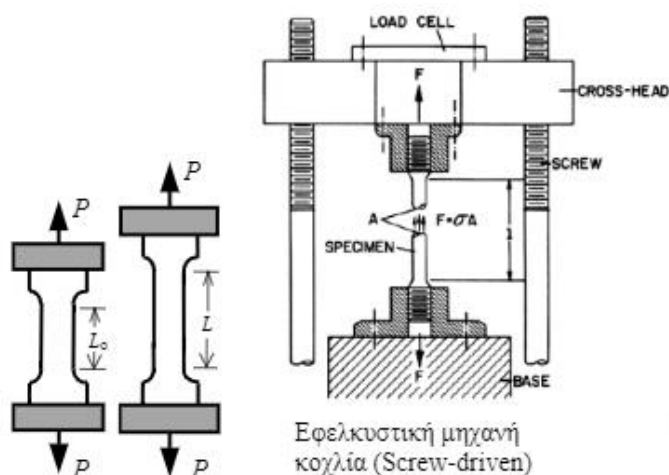


Εικόνα 5.10 Δοκίμια αλουμινίου περιεκτικότητας 15% κ.β. σε flakes χαλκού μετά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση (2^η κατασκευή)

5.2 Δοκιμασία σε εφελκυσμό

Ως εφελκυσμός ορίζεται η εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα υλικό σώμα, όταν σε αυτό ασκούνται δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, οι οποίες τείνουν να επιμηκύνουν το σώμα. Η δοκιμασία του εφελκυσμού είναι μια από τις συνηθέστερες μηχανικές δοκιμές που πραγματοποιούνται για τη μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών. Το δοκίμιο εφελκυσμού υποβάλλεται στην άσκηση εφελκυστικών δυνάμεων, οι οποίες προκαλούν την επιμήκυνσή του (ΔL).

Κατά τη δοκιμασία σε μονοαξονικό εφελκυσμό, το δοκίμιο αρχικού μήκους L_0 και εγκάρσιας διατομής A_0 , υφίσταται διαρκώς αυξανόμενες, μονοαξονικές, εφελκυστικές δυνάμεις, (Εικόνα 5.11). Ταυτόχρονα, καταγράφεται το φορτίο F που ασκείται στο δοκίμιο καθώς και η επιμήκυνση του δοκιμίου μέχρι το σημείο θραύσης, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού επιμηκυνσιομέτρου (Εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.11 Διάταξη δοκιμασίας εφελκυσμού

Η επιμήκυνση ΔL μετριέται καθ' όλη τη διάρκεια του εφελκυσμού μέσω ηλεκτρονικού επιμηκυνσιομέτρου *Kraft – Wegmeßgerät* της εταιρείας *PWYWE*, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.12. Για κάθε τιμή που παρατηρείται στο επιμηκυνσιόμετρο, καταγράφεται η τιμή του φορτίου που δέχεται το δοκίμιο, όπως λαμβάνεται από το μετρητικό ρολόι του δυναμομέτρου (Εικόνα 5.12).

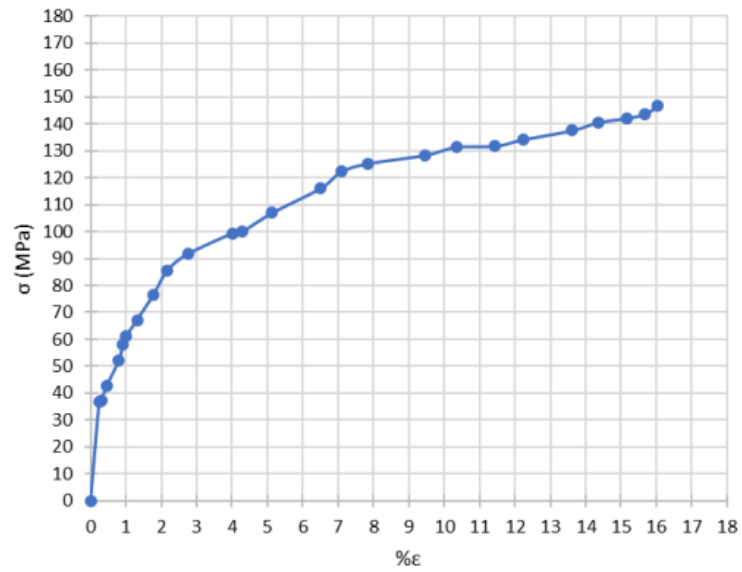


Εικόνα 5.12 Πειραματική διάταξη δοκιμασίας εφελκυσμού

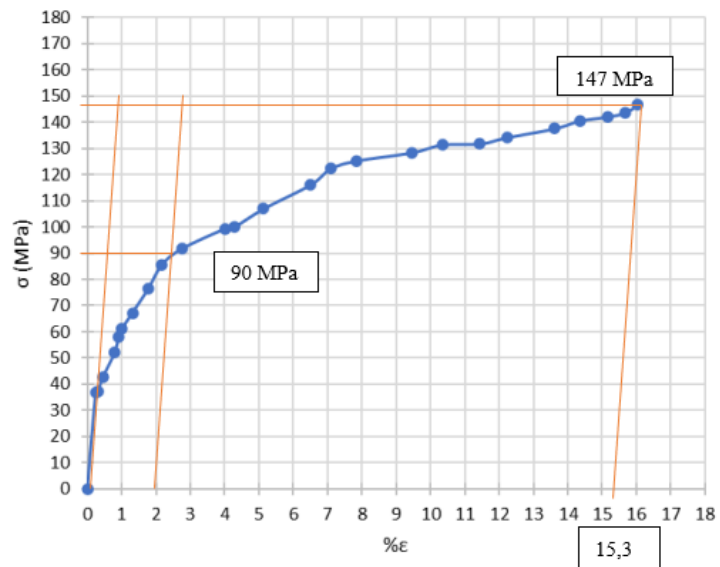
Τα μεγέθη που λαμβάνονται υπόψιν για τους υπολογισμούς είναι τα εξής:

- Φορτίο F (N)
- Τελικό μήκος L (mm)
- Επιμήκυνση ΔL (mm), όπου $\Delta L = L - L_0$
- Αρχικό εμβαδό διατομής A (mm^2), όπου $A = b \cdot d$
- Ονομαστική (μηχανική) τάση $\sigma = \frac{F}{A}$ (N/mm^2 ή MPa)
- Παραμόρφωση ε %, η οποία ισούται με $\frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$

Η σχέση τάσης - παραμόρφωσης καθώς και υπολογισμοί των τάσεων για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 5.1 – 5.7 και στους Πίνακες 5.3 – 5.9. Τα αποτελέσματα της δοκιμασίας εφελκυσμού συγκριτικά με την περιεκτικότητα % Cu καταγράφονται στον Πίνακα 5.9.



(α)

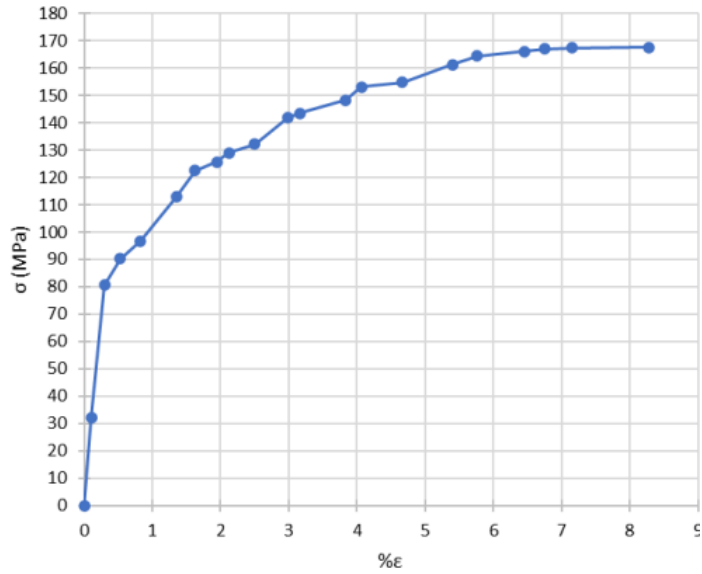


(β)

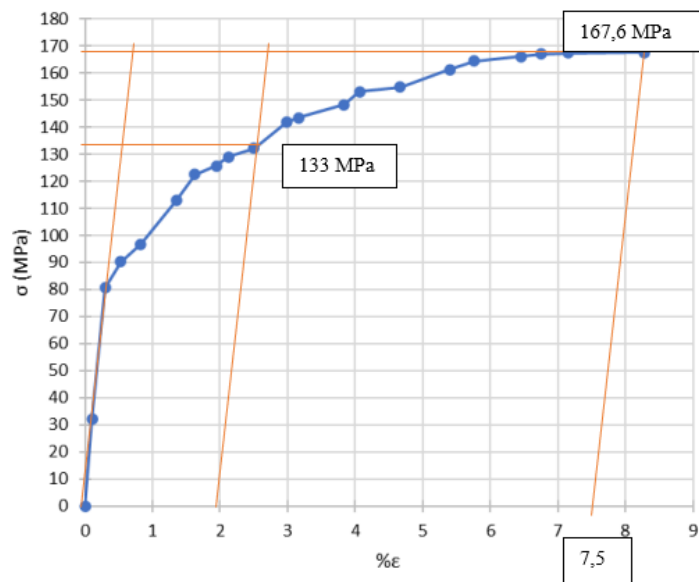
Διάγραμμα 5.1 (α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης εφελκυσμού 1^{ου} δοκιμίου Al και (β) πειραματικός υπολογισμός αντοχής και παραμόρφωσης (Νέστωρας 2022)

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα εφελκυσμού 1^{ου} δοκιμίου Al

L ₀ (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{Max} (N)	ΔL _{Max} (mm)	ε _θ %	σ _{uts} (MPa)	σ _{Υ0,2%} (MPa)
66,5	9,62	3,4	32,70	4800	7,95	15,3	147,0	90



(α)

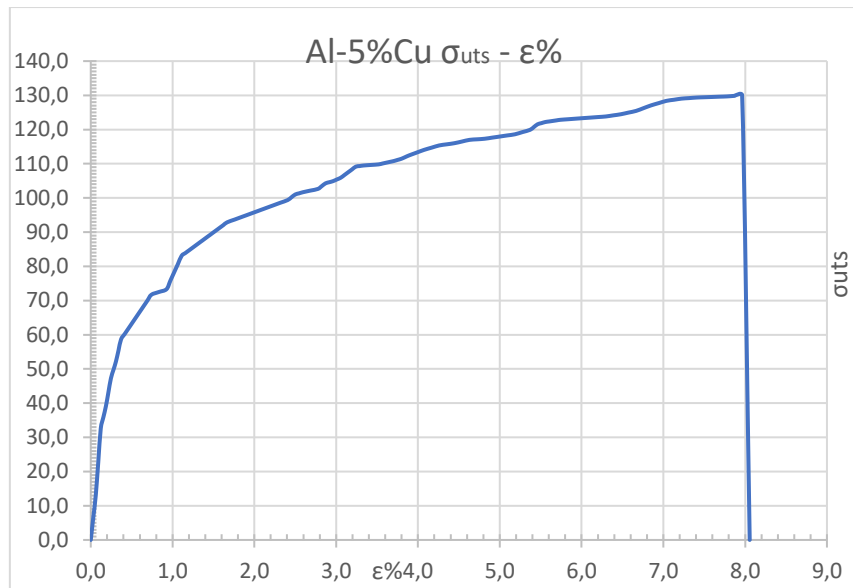


(β)

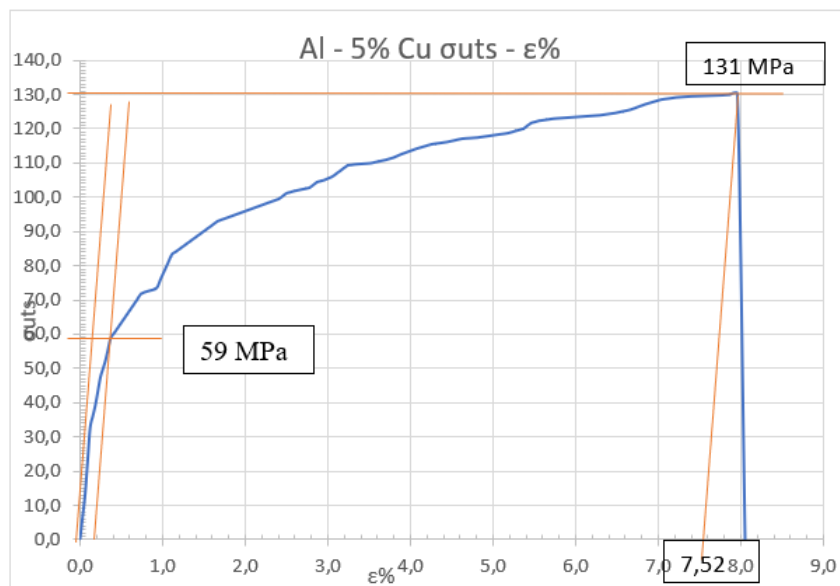
Διάγραμμα 5.2 (α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού 2^{ου} δοκιμίου Al και (β) πειραματικός υπολογισμός αντοχής και παραμόρφωσης (Νέστωρας 2022)

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα εφελκυσμού 2^{ου} δοκιμίου Al

L ₀ (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{Max} (N)	ΔL _{Max} (mm)	ε _θ %	σ _{uts} (MPa)	σ _{Υ0,2%} (MPa)
66,5	9,39	3,3	31,0	5200	5,50	7,5	167,6	133



(α)

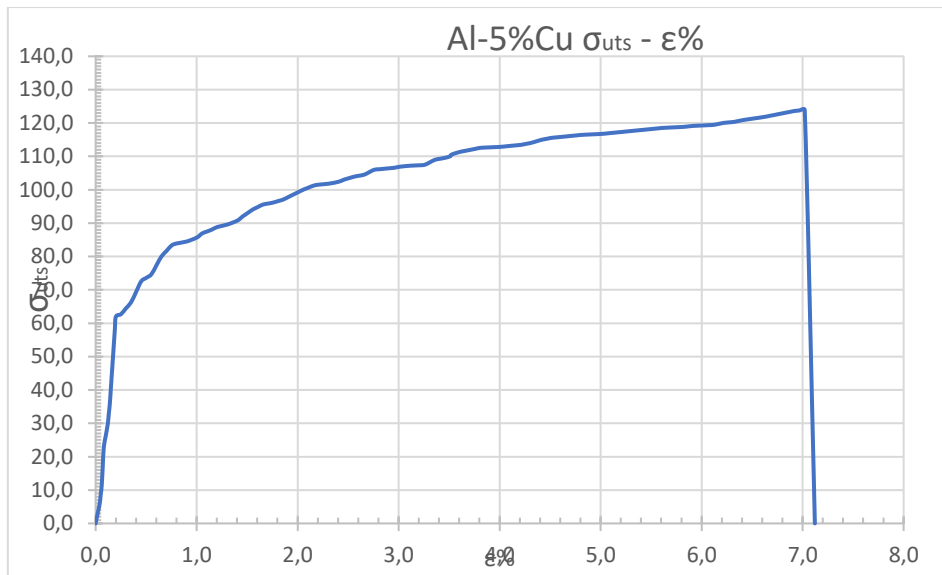


(β)

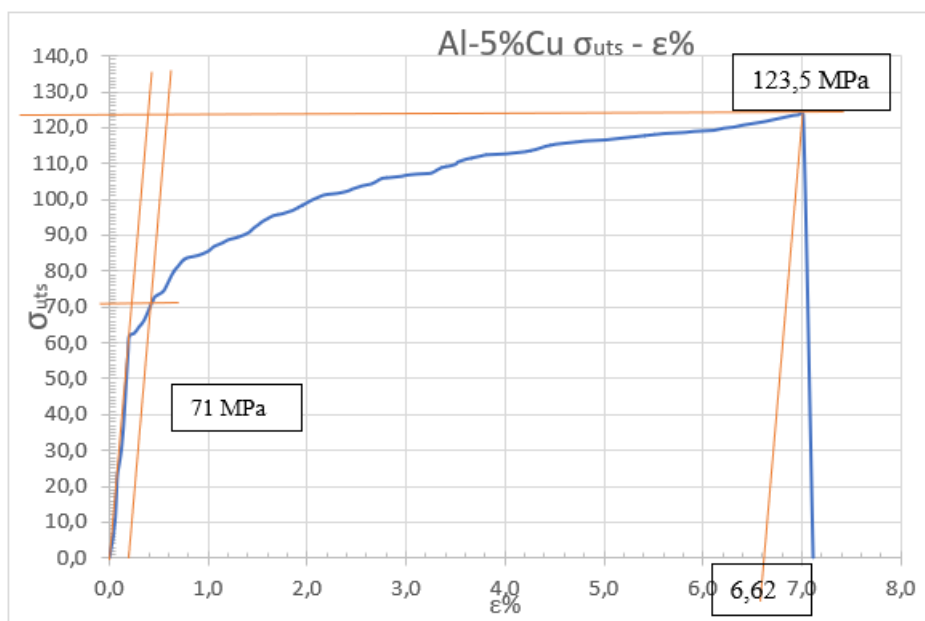
Διάγραμμα 5.3 (α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού 1^{ου} δοκιμίου Al+5%Cu και (β) πειραματικός υπολογισμός τάσεων

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα εφελκυσμού 1^{ου} δοκιμίου Al+5%Cu

L_0 (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F_{Max} (N)	ΔL_{Max} (mm)	ϵ_{θ} %	σ_{uts} (MPa)	$\sigma_{\gamma 0,2\%}$ (MPa)
54,0	9,90	3,1	30,69	3990	4,30	7,52	131,0	59



(α)

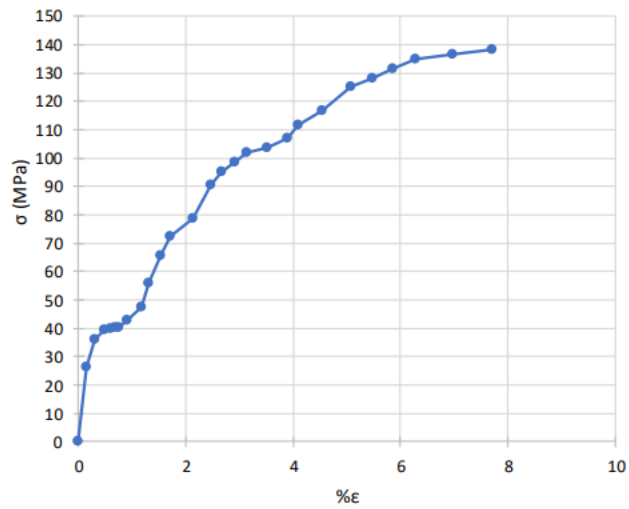


(β)

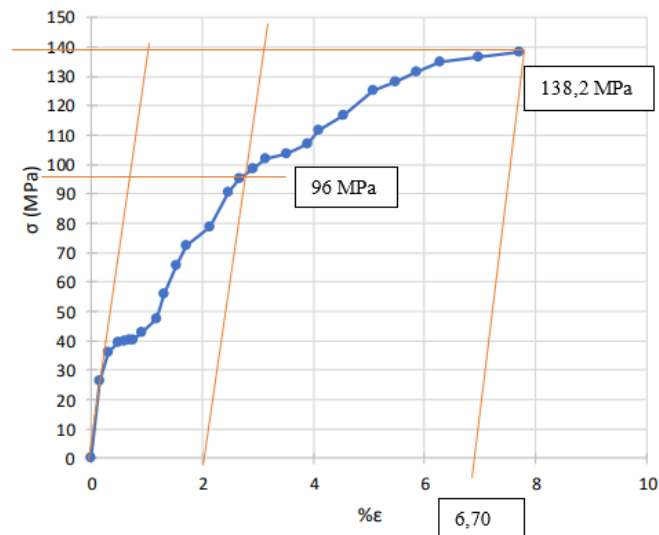
Διάγραμμα 5.4 (α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού 2^{ου} δοκιμίου Al+5%Cu και (β) πειραματικός υπολογισμός αντοχής και παραμόρφωσης

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα εφελκυσμού 2^{ου} δοκιμίου Al+5%Cu

L ₀ (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{Max} (N)	ΔL _{Max} (mm)	ε _θ %	σ _{uts} (MPa)	σ _{Υ0,2%} (MPa)
49,85	9,85	3,4	33,39	4150	3,50	6,62	123,5	71



(α)

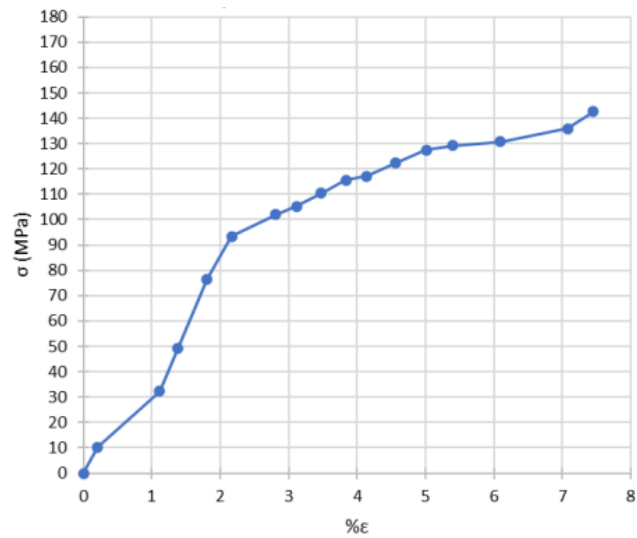


(β)

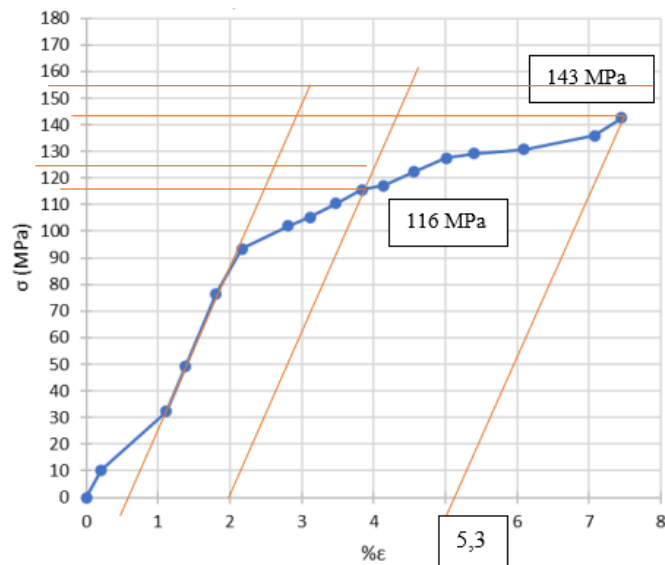
Διάγραμμα 5.5 (α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού 1^{ov} δοκιμίου Al+10%Cu και (β) πειραματικός υπολογισμός αντοχής και παραμόρφωσης (Νέστωρας 2022)

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα εφελκυσμού 1^{ov} δοκιμίου Al+10%Cu

L ₀ (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{Max} (N)	ΔL _{Max} (mm)	ε _θ %	σ _{uts} (MPa)	σ _{Y0,2%} (MPa)
66,5	9,81	3,1	30,4	4200	5,95	6,90	138,2	96



(α)

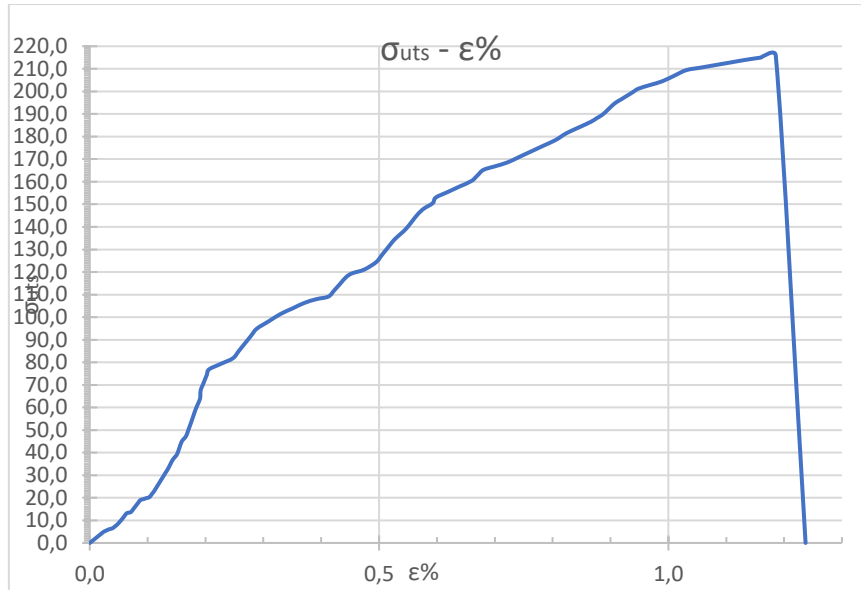


(β)

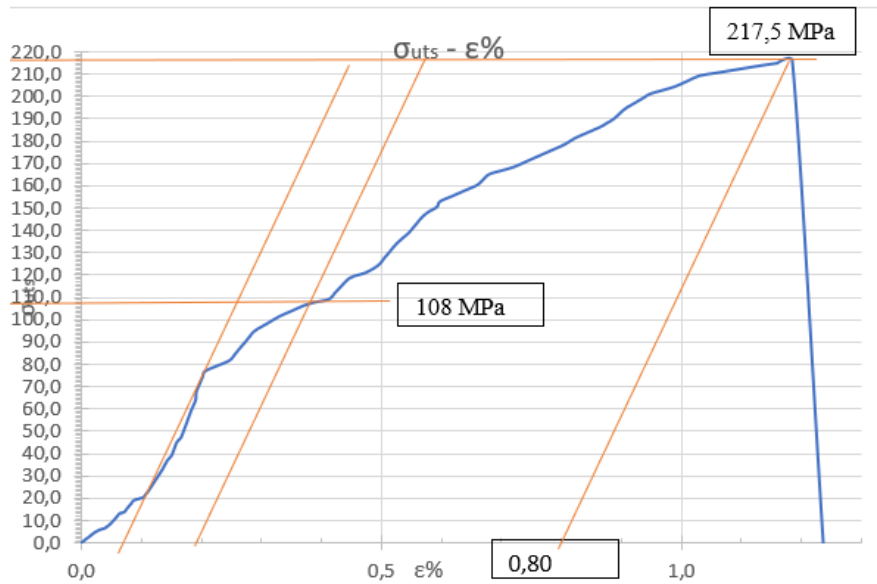
Διάγραμμα 5.6 (α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού 2^{ου} δοκιμίου Al+10%Cu και (β) πειραματικός υπολογισμός αντοχής και παραμόρφωσης (Νέστωρας 2022)

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα εφελκυσμού 2^{ου} δοκιμίου Al+10%Cu

L ₀ (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F _{Max} (N)	ΔL _{Max} (mm)	ε _θ %	σ _{uts} (MPa)	σ _{Y0.2%} (MPa)
66,5	9,48	3,1	29,4	4200	5,95	5,30	142,7	116



(α)



(β)

Διάγραμμα 5.7 α) Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης λόγω εφελκυσμού δοκιμίου Al+15%Cu και (β) πειραματικός υπολογισμός αντοχής και παραμόρφωσης

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα εφελκυσμού δοκιμίου Al+15%Cu

L_0 (mm)	b (mm)	d (mm)	A (mm ²)	F_{Max} (N)	ΔL_{Max} (mm)	ϵ_{θ} %	σ_{uts} (MPa)	$\sigma_{Y0,2\%}$ (MPa)
48,50	9,55	3,2	30,56	6600	0,575	0,80	217,5	108

Πίνακας 5.10 Τελικά αποτελέσματα δοκιμασίας εφελκυσμού

Δοκίμιο	σ_{uts} (MPa)	$\sigma_{\gamma 0,2\%}$ (MPa)	ϵ_{θ} (%)
Al	157,3	111,5	9,75
Al + 5% Cu	127,25	65	7,07
Al + 10% Cu	140,45	106	6,1
Al + 15% Cu	217,5	108	0,8

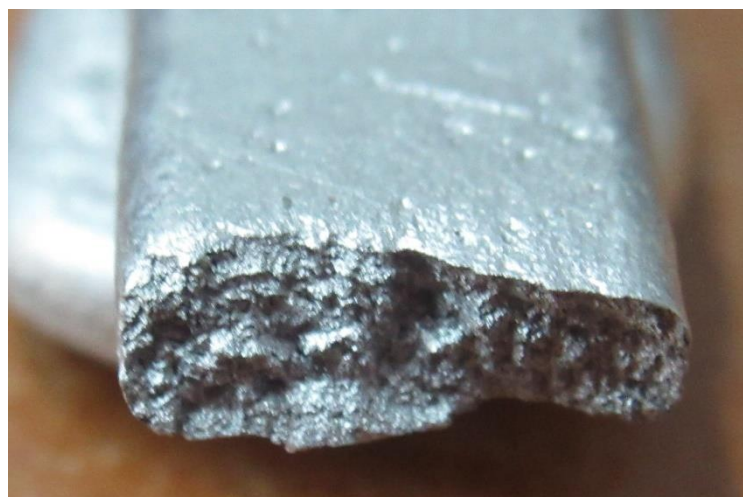
Με εξαίρεση τα δοκίμια του καθαρού αλουμινίου, τα οποία για απροσδιόριστο λόγο παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και διαρροή, για τα υπόλοιπα δοκίμια, παρατηρείται ότι η αντοχή σε εφελκυσμό και σε διαρροή αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του χαλκού, από τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης που καταγράφηκαν. Από τα διαγράμματα εκτιμάται ότι η αντοχή σε διαρροή (ως η τάση σε παραμόρφωση 0.2%) είναι $\sigma_{\gamma 0,2\%} = 111 \pm 12 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια καθαρού αλουμινίου, $\sigma_{\gamma 0,2\%} = 65 \pm 6 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 5% κ.β., $\sigma_{\gamma 0,2\%} = 106 \pm 10 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 10% κ.β. και $\sigma_{\gamma 0,2\%} = 108 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 15% κ.β.. Η παραμόρφωση σε θραύση εμφανίζει σαφή μείωση με την αύξηση της περιεκτικότητας του χαλκού από $\epsilon_{\theta} \% = 9,75 \pm 2,50$ για τα δοκίμια καθαρού αλουμινίου, $\epsilon_{\theta} \% = 7,07 \pm 0,60$ για τα δοκίμια με 5% κ.β. χαλκό, $\epsilon_{\theta} \% = 6,1 \pm 0,8$ για τα δοκίμια με 10% κ.β. χαλκό και $\epsilon_{\theta} \% = 0,8$ για τα δοκίμια με 15% κ.β. χαλκό.

Παρατηρείται επίσης ότι τα δοκίμια με 15% κ.β. περιεκτικότητα σε χαλκό παρουσιάζουν έντονη ψαθυρότητα, πράγμα που παρατηρήθηκε και από την δοκιμασία αντοχής σε κρούση που προηγήθηκε.

Στις Εικόνες 5.13 – 5.15 απεικονίζεται η επιφάνεια της τομής θραύσης που επήλθε κατά τη δοκιμασία εφελκυσμού των δοκιμίων. Η ψαθυρότητα του δοκιμίου με ενίσχυση νιφάδων χαλκού περιεκτικότητας 15% κ.β. γίνεται αντιληπτή στην Εικόνα 5.15, καθώς η επιφάνεια απεικονίζεται πιο λεία σε σύγκριση με τις επιφάνειες των υπολοίπων δοκιμίων με διαφορετική περιεκτικότητα σε χαλκό.



Εικόνα 5.13 Εγκάρσια τομή (μετά τη θραύση) δοκιμίου αλουμινίου περιεκτικότητας 5% κ.β. σε flakes χαλκού, που υποβλήθηκε σε μονοαξονικό εφελκυσμό



Εικόνα 5.14 Εγκάρσια τομή (μετά τη θραύση) δοκιμίου αλουμινίου περιεκτικότητας 10% κ.β. σε flakes χαλκού, που υποβλήθηκε σε μονοαξονικό εφελκυσμό



Εικόνα 5.15 Εγκάρσια τομή (μετά τη θραύση) δοκιμίου αλουμινίου περιεκτικότητας 15% κ.β. σε flakes χαλκού, που υποβλήθηκε σε μονοαξονικό εφελκυσμό

5.3 Οπτική Μικροσκοπία

Η εξέταση των επιφανειών των δοκιμίων έγινε με χρήση του μικροσκοπίου *LABORLUX 12 ME S*, της εταιρείας *Leitz*, στο οποίο έχει προσαρμοστεί η φωτογραφική μηχανή *Moticam – S1* (Εικόνα 5.16). Χρησιμοποιήθηκε αντικειμενικός φακός *X100*, με τον οποίο επιτυγχάνεται μεγέθυνση κατά 100 φορές.



Εικόνα 5.16 Μικροσκόπιο *LABORLUX 12 ME S* και διάταξη μικροσκοπίου – κάμερας – υπολογιστή

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν τμήματα των χυτών δοκιμίων κρούσης τα οποία εγκιβωτίστηκαν σε καλούπια με ρητίνη. Στη μια από τις δύο πλευρές έγινε λείανση και στίλβωση όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Για την οπτική μικροσκοπία των επιφανειών απαιτείται συγκεκριμένη μεθοδολογία και προετοιμασία των δειγμάτων, η οποία περιγράφεται ακολούθως:

- Εγκιβωτισμός

Είναι διαδικασία «εγκλωβισμού» ενός δοκιμίου μέσα σε ένα καλούπι, το οποίο γεμίζει με ρητίνη. Η ρητίνη στερεοποιείται μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα και το δοκίμιο πλέον δε μπορεί να αφαιρεθεί. Κατά την έγχυση της ρητίνης στο καλούπι, πρέπει το δοκίμιο να τοποθετηθεί σε θέση τέτοια ώστε η μια εγκάρσια τομή του να βρίσκεται στην επιφάνεια του καλουπιού, να μη καλυφθεί δηλαδή από ρητίνη, έτσι

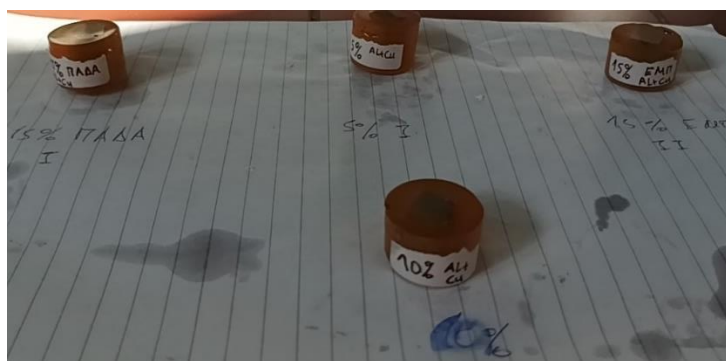
ώστε να είναι δυνατή η εξέτασή της στο μικροσκόπιο. Ο ρόλος του εγκιβωτισμού είναι η δημιουργία μιας λείας, επίπεδης επιφάνειας, έτσι ώστε να μπορούν να εστιάζουν σωστά οι φακοί του μικροσκοπίου. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή τη διαδικασία είναι τα εξής:

- , Πλαστικά κυλινδρικά καλούπια εγκιβωτισμού διαμέτρου 30 mm και ύψους 25 mm
- Βαζελίνη για την κάλυψη του εσωτερικού του καλουπιού ώστε να μη στερεοποιηθεί η ρητίνη πάνω του (Εικόνα 5.17α).
- Εποξική ρητίνη δύο συστατικών της εταιρείας *Gurit*. Η μίξη πρέπει να γίνει σε ποσοστό 26%κ.β. ρητίνης και 74%κ.β σκληρυντικού και να ακολουθήσει αργή ανάδευση για 1-2 λεπτά (Εικόνα 5.17β).

Αφού το μείγμα ποτίσει το δοκίμιο (αφήνοντας μια εγκάρσια τομή κενή στην επιφάνεια), αφήνεται για μερικές ώρες να στερεοποιηθεί. Όταν στερεοποιηθεί, το καλούπι αφαιρείται (Εικόνα 5.18). Ακολουθεί πολύ καλό πλύσιμο των δοκιμίων με νερό, σαπούνι και παράλληλα καθαρισμός με σφουγγάρι.



Εικόνα 5.17 (α) Βαζελίνη και (β) Ρητίνη και επιταχυντής σκλήρυνσης



Εικόνα 5.18 Εγκιβωτισμένα δοκίμια (5%, 10% και 15% κ.β. χαλκού)

- Λείανση (*grinding*)

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο λειαντικό τροχό *Struers LaboPol – 5*, που διαθέτει το εργαστήριο Υλικών (Εικόνα 5.19), με λειαντικούς δίσκους καρβιδίου του πυριτίου (*SiC*), τύπου *N500*, *N800*, *N1000* και *N4000* σε συνδυασμό με μικρή παροχή νερού, με ταχύτητα 300 στροφές (*rpm*).



Εικόνα 5.19 Λείανση εγκιβωτισμένων δοκιμίων στο λειαντικό τροχό

- Στίλβωση (*Polishing*)

Η διαδικασία της στίλβωσης γίνεται σε 2 στάδια:

(α) Λείανση των εγκιβωτισμένων δοκιμίων με λειαντικούς δίσκους καρβιδίου του πυριτίου (*SiC*), τύπου *N400*, σε συνδυασμό με λιπαντικό υγρό (*Diamond Lubricant Oil*) (Εικόνα 5.20) με ταχύτητα 300 στροφές (*rpm*). Στη συνέχεια γίνεται καθαρισμός των δοκιμίων με απόλυτη αλκοόλη (*absolute alcohol*).



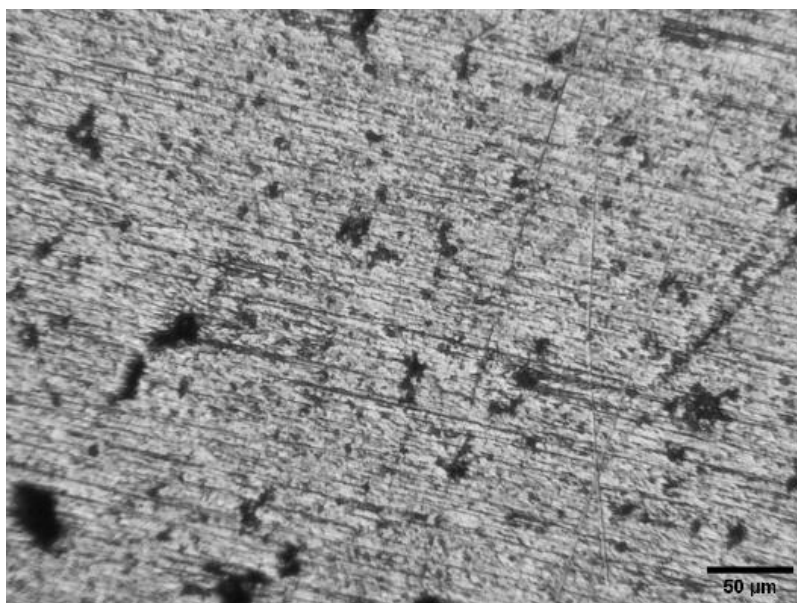
Εικόνα 5.20 *Diamond Lubricant Oil* για χρήση στο λειαντικό τροχό

(β) Στίλβωση των δειγμάτων με μείγμα μονοκρυσταλλικής αδαμαντόπαστας $0,25\mu\text{m}$ διαλυμένη σε λιπαντικό υγρό (*Diamond Lubricant Oil*). Οι λιπαντικοί δίσκοι καρβιδίου του πυριτίου αντικαθίστανται από δίσκο με βελούδινο πανί, ο οποίος εμποτίζεται με το μείγμα (Εικόνα 5.21), και η στίλβωση πραγματοποιείται επίσης στις 300 στροφές (*rpm*).

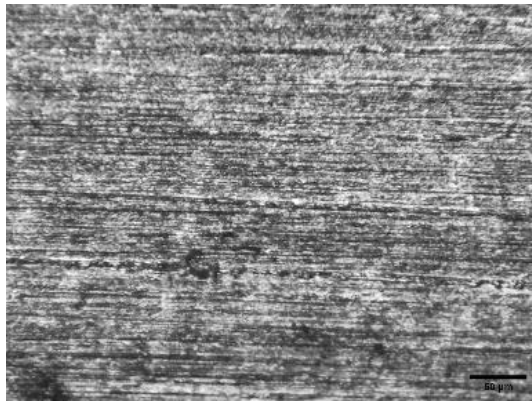


Εικόνα 5.21 Μείγμα αδαμαντόπαστας – λιπαντικού σε βελούδινο λιπαντικό δίσκο

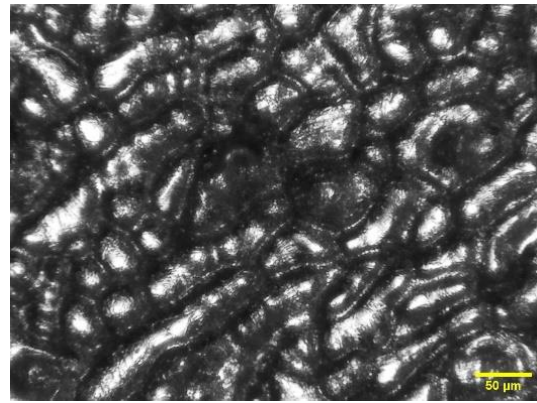
Μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας των δειγμάτων, έγινε παρατήρηση όλων των δοκιμίων στο μικροσκόπιο. Στις επόμενες εικόνες (Εικόνες 5.22 – 5.25) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οπτικής μικροσκοπίας για τις δύο επιφάνειες, τη λεία εγκάρσια επιφάνεια και την εξωτερική επιφάνεια χωρίς λείανση.



Εικόνα 5.22 Μικροφωτογραφία της επιφάνειας δοκιμίου καθαρού Al

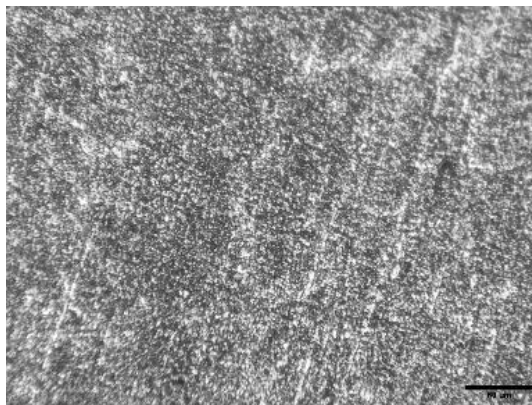


(α)

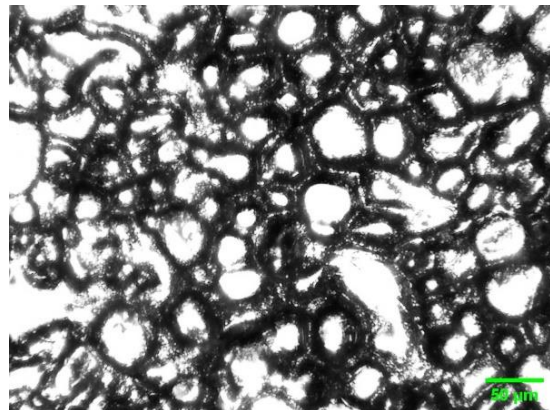


(β)

Εικόνα 5.23 Μικροφωτογραφίες της επιφάνειας των δοκιμίων Al - 5% Cu (α) λεία εγκάρσια τομή, (β) εξωτερική επιφάνεια του χυτού χωρίς λείανση

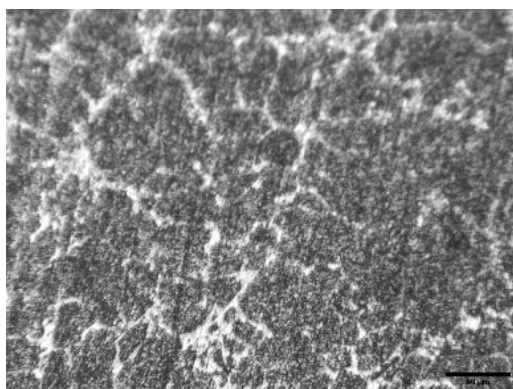


(α)

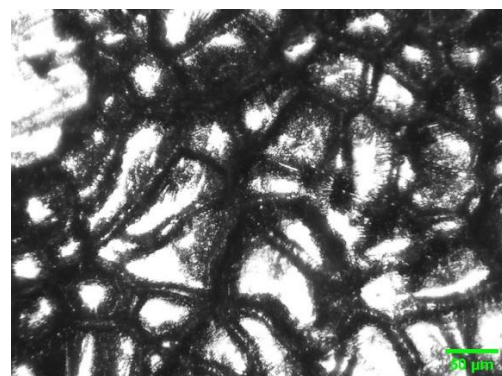


(β)

Εικόνα 5.24 Μικροφωτογραφίες της επιφάνειας των δοκιμίων Al - 10% Cu (α) λεία εγκάρσια τομή, (β) επιφάνεια του χυτού επιφάνεια



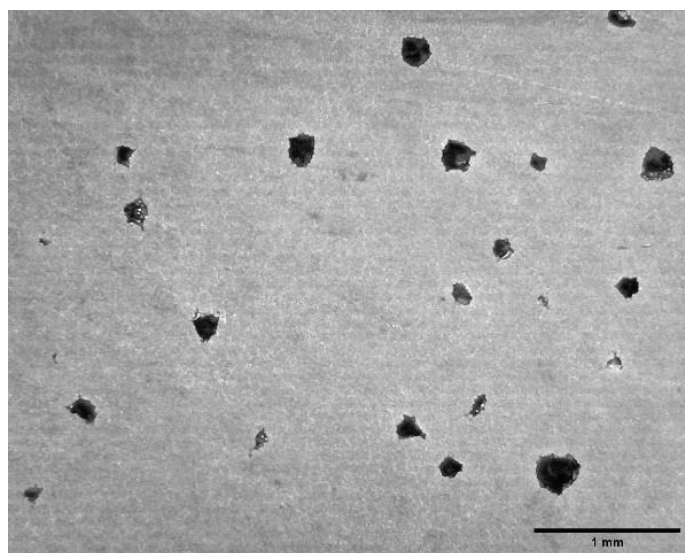
(α)



(β)

Εικόνα 5.25 Μικροφωτογραφίες της επιφάνειας των δοκιμίων Al - 15% Cu (α) λεία εγκάρσια τομή, (β) επιφάνεια του χυτού επιφάνεια

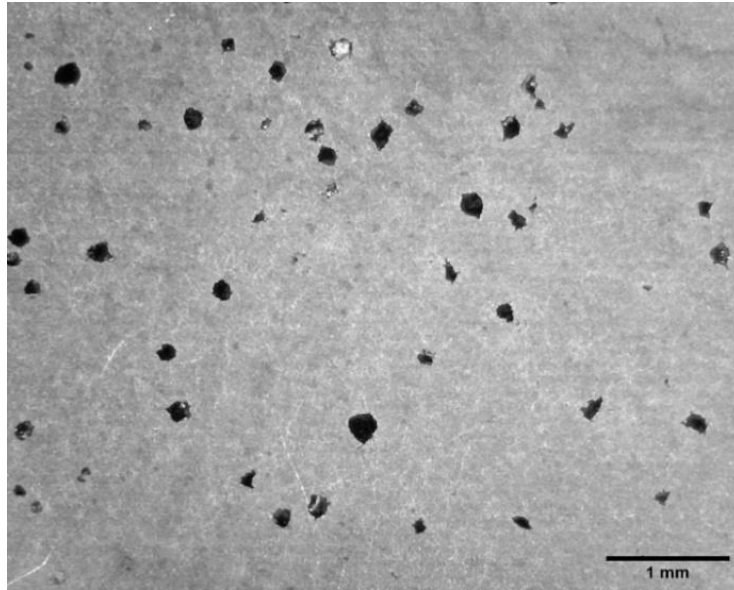
Διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του εκάστοτε δοκιμίου σε χαλκό τόσο το μέγεθος των επιφανειακών σχηματισμών που δημιουργούνται κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου αυξάνεται, ενώ το πλήθος τους μειώνεται (Εικόνες 5.23β-25β). Το γεγονός αυτό ίσως σχετίζεται με τη μειωμένη ρευστότητα του τήγματος, όσο αυξάνεται η ποσότητα του χαλκού, μιας και αυτή μένει άτηκτη, με αποτέλεσμα να προσδίδεται πιο «ανώμαλη» επιφάνεια. Αντίθετα, η εσωτερική δομή των χυτών δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις από την προσθήκη ενίσχυσης νιφάδων χαλκού, με μικρή εξαίρεση τα δοκίμια στα οποία προστέθηκε 15% χαλκού, όπου παρατηρήθηκαν δενδριτικές μορφές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.31α. Επιπλέον, στα δοκίμια $Al+15\%Cu$ εμφανίζονται οπές διαφορετικού μεγέθους, όπως απεικονίζεται στις Εικόνες 5.26 και 5.27. Η μέτρηση των διαμέτρων των οπών (Πίνακες 5.11 - 5.12) έδειξε μέση διάμετρο οπών ίση με 0,173 mm και 0,1183 mm αντίστοιχα για δύο περιοχές Α και Β.



Εικόνα 5.26 Δημιουργία οπών στο χυτό δοκίμιο $Al + 15\%Cu$ (Περιοχή Α)

Πίνακας 5.11 Μετρήσεις μέγιστων διαμέτρων των οπών της Εικόνας 5.32

Οπή	Διάμετρος (mm)	Οπή	Διάμετρος (mm)	Οπή	Διάμετρος (mm)
1	0,2058	8	0,1279	15	0,2992
2	0,1933	9	0,1808	16	0,1576
3	0,1412	10	0,1739	17	0,1413
4	0,2148	11	0,1946	18	0,1362
5	0,2304	12	0,1230	19	0,1424
6	0,1188	13	0,2230	20	0,1736
7	0,2197	14	0,1457	21	0,08347



Εικόνα 5.27 Δημιουργία οπών στο δοκίμιο Al + 15% Cu (Περιοχή Β)

Πίνακας 5.12 Μετρήσεις μέγιστων διαμέτρων των οπών της Εικόνας 5.33

Οπή	Διάμετρος (mm)	Οπή	Διάμετρος (mm)	Οπή	Διάμετρος (mm)
1	0,1605	15	0,1829	29	0,1378
2	0,0544	16	0,2342	30	0,1120
3	0,0691	17	0,1228	31	0,0932
4	0,0439	18	0,1696	32	0,1350
5	0,0559	19	0,1295	33	0,1631
6	0,1180	20	0,0509	34	0,1494
7	0,0776	21	0,1088	35	0,0894
8	0,1355	22	0,1669	36	0,1574
9	0,0747	23	0,1158	37	0,1092
10	0,1565	24	0,1540	38	0,0755
11	0,1358	25	0,0897	39	0,1120
12	0,1463	26	0,0772	40	0,0843
13	0,1926	27	0,1212	41	0,0843
14	0,0955	28	0,1320	42	0,0950

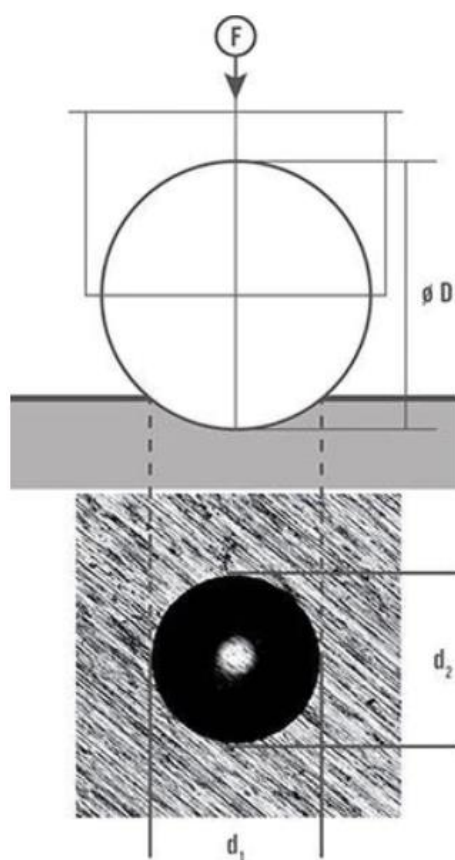
5.4 Σκληρομέτρηση

Η σκληρότητα είναι το μέτρο της αντίστασης ενός υλικού στην άσκηση εξωτερικού φορτίου από κάποιο άλλο υλικό. Η μέτρησή της γίνεται με τη δοκιμασία σκληρομέτρησης.

Οι σπουδαιότερες μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας είναι:

1) Η μέθοδος *Brinell*

Ακολουθεί τα πρότυπα *ISO 6506* και *ASTM E*. Χρησιμοποιεί ένα χαλύβδινο, σφαιρικό διεισδυτή που ασκεί κάθετη δύναμη στο υλικό προς σκληρομέτρηση, με φορτίο από 1 έως και 3000 *kgf* ($1\text{kgf} = 9,81\text{ Newton}$). Ο διεισδυτής έχει ποικιλία διαμέτρων με 1, 2.5, 5 ή 10 *mm*. Στη συνέχεια, το φορτίο αποσύρεται και μετριέται το μήκος των 2 κάθετων διαμέτρων του αποτυπώματος (d_1, d_2) σε *mm* (Εικόνα 5.28). Η σκληρότητα *Brinell* (*HB*) ορίζεται ως το πηλίκο του εφαρμοζόμενου φορτίου προς την επιφάνεια του αποτυπώματος, για τον υπολογισμό της οποίας χρησιμοποιείται ο αριθμητικός μέσος των δύο διαμέτρων.



Εικόνα 5.28 Αποτύπωμα σκληρομέτρησης κατά *Brinell* (πηγή:

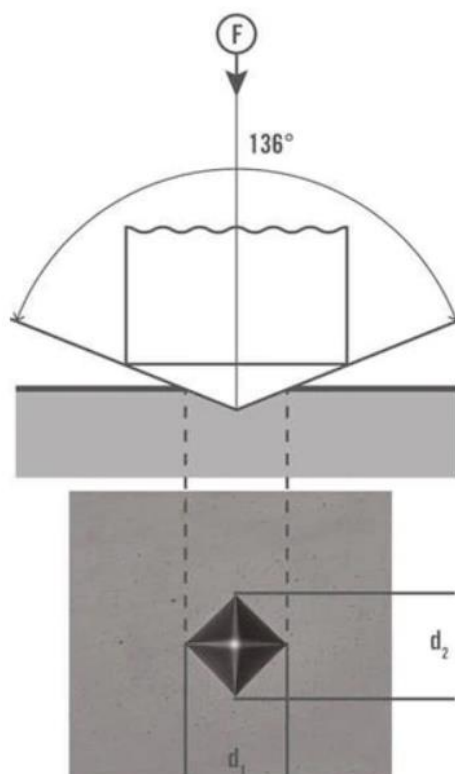
<https://organametrisis.gr/blogs/%CF%83%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B1/brinell>)

2) Μέθοδος *Vickers*

Ακολουθεί τα πρότυπα *ISO 6507*, *ASTM E92* και *ASTM E384*. Χρησιμοποιεί διεισδυτή σχήματος ισόπλευρης πυραμίδας τετραγωνικής βάσης, από διαμάντι, με επίπεδη γωνία κορυφής 136° . Ο διεισδυτής ασκεί δύναμη στο προς σκληρομέτρηση υλικό, με φορτίο από 1 έως 120 *kgf*, για 10–15 δευτερόλεπτα, ανάλογα με το πρότυπο που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια, το φορτίο απομακρύνεται και μετρούνται οι 2 διαγώνιοι του ρομβικού αποτυπώματος (d_1 , d_2) σε *mm* (Εικόνα 5.29). Η σκληρομέτρηση *Vickers* (*HV*) δίνεται από τον τύπο:

$$HVF = \frac{1,854 * F}{d_1 * d_2}$$

όπου *F* το φορτίο που εφαρμόζεται και d_1 , d_2 οι διαγώνιοι του αποτυπώματος σε *mm*.



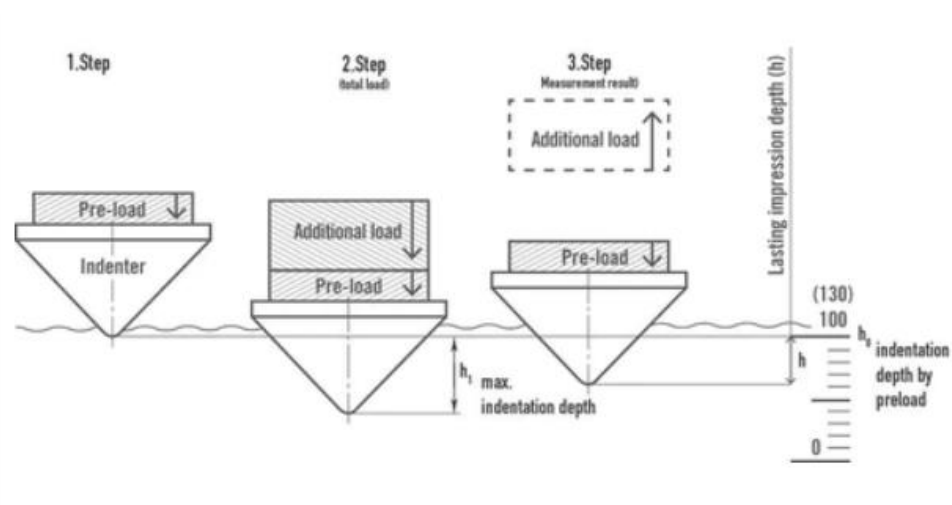
Εικόνα 5.29 Αποτύπωμα σκληρομέτρησης κατά *Vickers* (πηγή:

<https://organametrisis.gr/blogs/%CF%83%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%B5%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82-%CE%BC%CE%AD%CF%84%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82-%CF%83%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%CF%82-vickers>)

3) Μέθοδος *Rockwell*

Ακολουθεί τα πρότυπα *ISO 6508* και *ASTM E18*. Χρησιμοποιεί διεισδυτή από διαμάντι σε κωνικό σχήμα (γωνίας 120°) ή σφαιρικό σχήμα (ακτίνα σνήθως ίση με $\frac{1}{16}$ της ίντσας). Ο διεισδυτής εφαρμόζει φορτίο στο προς σκληρομέτρηση υλικό από 60 έως 150 *kgf*. Η διείσδυση αρχικά φτάνει σε αρχικό βάθος h_0 εντός του υλικού (στάδιο προφόρτισης). Στη φάση αυτή εφαρμόζεται εκ νέου φορτίο, με αποτέλεσμα ο διεισδυτής να φτάσει σε ένα νέο βάθος h_1 εντός του υλικού. Το άθροισμα της αρχικής και της νέας δύναμης που εφαρμόστηκαν δίνουν τη συνολική δύναμη ή αλλιώς το κύριο φορτίο. Η συνολική δύναμη εφαρμόζεται στο δοκίμιο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μετά το πέρας του οποίου η νέα, πρόσθετη δύναμη σταματάει να εφαρμόζεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την προς τα πάνω κίνηση του διεισδυτή σε βάθος h_2 (Εικόνα 5.30). Η σκληρότητα κατά *Rockwell (HR)* ορίζεται ως το υπολειπόμενο βάθος:

$$HR = h = h_2 - h_1$$



Εικόνα 5.30 Αποτύπωμα σκληρομέτρησης κατά *Rockwell* (πηγή:

<https://organametrisis.gr/en/blogs/%CF%83%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%B1/rockwell>)

Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας, η μέτρηση της σκληρότητας των δοκιμίων έγινε με σκληρόμετρο *WOLPERT* (Εικόνα 5.31) στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το συγκεκριμένο σκληρόμετρο χρησιμοποιεί τη μέθοδο *Vickers*. Η πυραμίδα ασκεί φορτίο στο δοκίμιο, γίνεται μέτρηση των κύριων διαγώνιων του

αποτυπώματος μέσω της κλίμακας και του μικροσκοπίου που φέρει στο άνω μέρος, και η σκληρότητα υπολογίζεται από τον τύπο $HVF = \frac{1,854 * F}{d_1 * d_2}$.



Εικόνα 5.31 Σκληρόμετρο WOLPERT (μέθοδος Vickers) που χρησιμοποιήθηκε για τη σκληρομέτρηση των δοκιμίων

Κατά τη σκληρομέτρηση, το φορτίο που ασκήθηκε ήταν 5kg ($F=5kg$). Οι τιμές που μετρήθηκαν για τα μήκη των διαγώνιων σε μm , καθώς και οι τιμές σκληρότητας για τα διάφορα δοκίμια συνοψίζονται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13 Τιμές διαμέτρων αποτυπώματος και σκληρότητας δοκιμίων

A/A	Δοκίμιο	Διάμετρος 1 (μm)	Διάμετρος 2 (μm)	Σκληρότητα HV5 (kg/mm^2)
1	Al+5%Cu	440	410	51,39
2	Al+5%Cu	410	440	51,39
3	Al+5%Cu	470	460	42,88
4	Al	462	436	46,02
5	Al	438	436	48,54
6	Al+10%Cu	428	417	51,94
7	Al+10%Cu	411	419	53,83
8	Al	442	443	47,34
9	Al + 15% Cu	300	310	99,68
10	Al+15%Cu	322	309	93,17
11	Al+15% Cu	304	317	96,19
12	Al + 15% Cu	319	275	105,67

Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης με βάση την περιεκτικότητα σε χαλκότεων δοκιμίων. Διαπιστώνεται ότι όσο περισσότερο αυξάνεται η περιεκτικότητα του χαλκού, τόσο αυξάνεται η σκληρότητα του υλικού. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς ο χαλκός είναι σκληρότερο υλικό από το καθαρό αλουμίνιο και η ενίσχυση με αυτό αυξάνει τη σκληρότητα μιας δεδομένης ποσότητας υλικού, σε σχέση με την ίδια την ποσότητα καθαρού αλουμινίου.

Πίνακας 5.14 Μέσος όρος σκληρότητας δοκιμίων

Δοκίμια	M.O. <i>HV5</i> (kg/mm^3)
<i>Al</i>	47,30
<i>Al + 5% Cu</i>	48,45 ± 2,94
<i>Al + 10% Cu</i>	52,88 ± 0,94
<i>Al + 15% Cu</i>	98,68 ± 6,99

5.5 Μέτρηση πυκνότητας

Πυκνότητα είναι το φυσικό μέγεθος το οποίο ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας ενός υλικού προς τον όγκο του (εξίσωση $\rho = \frac{m}{V}$). Παριστάνεται συνήθως με το ελληνικό γράμμα ρ ή με το λατινικό d (από τη λέξη *density*). Η μονάδα μέτρησης στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (*SI*) είναι το kg/m^3 , αλλά χρησιμοποιείται και η μονάδα g/cm^3 .

$$\rho = \frac{m}{V}$$

όπου m η μάζα ενός σώματος και V ο όγκος του.

Η πυκνότητα κάθε υλικού δεν διατηρείται σταθερή σε μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης, καθώς τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με τον όγκο του υλικού.

Για απλοποίηση των συγκρίσεων της πυκνότητας σε διαφορετικά συστήματα μονάδων, το μέγεθος της πυκνότητας αντικαθίσταται από το ειδικό βάρος, δηλαδή το πηλίκο της πυκνότητας ενός υλικού προς την πυκνότητα του νερού. Το ειδικό βάρος είναι ένα αδιάστατο μέγεθος. Κάθε υλικό με ειδικό βάρος μικρότερου του νερού (<1) επιπλέει σε αυτό, ενώ κάθε υλικό με ειδικό βάρος μεγαλύτερο του νερού (>1) βυθίζεται σε αυτό.

Η πειραματική μέτρηση της πυκνότητας γίνεται με τη μέθοδο που ορίζεται από το πρότυπο *ASTM D792*, δηλαδή την έμμεση μέτρηση της πυκνότητας μικρών δειγμάτων

(1 μέχρι 5 g) μέσω της άνωσης που δέχονται από το νερό. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής (Εικόνα 5.32):

- Δοκίμια προς μέτρηση πυκνότητας
- Δοχείο με υγρό γνωστής πυκνότητας (νερό)
- Ζυγός ακριβείας ± 0.001 g
- Σύρμα ανάρτησης
- Μεταλλικό στήριγμα



Εικόνα 5.32 Διάταξη πειραματικής μέτρησης πυκνότητας

Το πρότυπο *ASTM D792* χρησιμοποιεί τον ακόλουθο τύπο:

$$d = d_L \times \frac{M_3 - M_1}{(M_3 - M_1) - (M_4 - M_2)}$$

όπου

- d : η πυκνότητα του υλικού που ψάχνουμε, σε g/cm^3
- d_L : η πυκνότητα του υγρού (νερού) στη θερμοκρασία που γίνεται η μέτρηση
- M_1 : το βάρος του σύρματος ανάρτησης στον αέρα, σε g
- M_2 : το βάρος του σύρματος ανάρτησης στο υγρό (νερό), σε g
- M_3 : το βάρος του σύρματος και του δείγματος στον αέρα, σε g
- M_4 : το βάρος του σύρματος και του δείγματος στο υγρό (νερό), σε g

Η διαδικασία μέτρησης της πυκνότητας περιγράφεται στη συνέχεια:

Αρχικά, στη ζυγαριά ακριβείας ζυγίζεται το σύρμα της διάταξης (M_1) και το δοκίμιο μαζί με το σύρμα ανάρτησης (M_3). Κατόπιν, τοποθετείται το μεταλλικό στήριγμα πάνω από τη ζυγαριά και τοποθετείται το δοχείο με το υγρό (νερό) πάνω από τον δίσκο ζύγισης. Η μια άκρη του σύρματος στηρίζεται από το μεταλλικό στήριγμα και ζυγίζεται εκ νέου καθώς τμήμα του σύρματος βρίσκεται βυθισμένο στο υγρό (M_2). Στη συνέχεια, το τμήμα του σύρματος ανάρτησης που βρίσκεται βυθισμένο εντός του υγρού, τυλίγεται γύρω από το δοκίμιο και προσδιορίζεται το βάρος του δοκιμίου μαζί με το σύρμα ανάρτησης καθώς βρίσκονται βυθισμένα εντός του υγρού (M_4). Αφού καταγράφονται όλες οι παραπάνω τιμές, με γνωστή τη πυκνότητα του υγρού που χρησιμοποιήθηκε στο δοχείο (νερό), υπολογίζεται η πυκνότητα του δοκιμίου, μέσω της εξίσωσης $d = d_L \times \frac{M_3 - M_1}{(M_3 - M_1) - (M_4 - M_2)}$ του πρότυπου *ASTM D792*. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις μετρήσεις ήταν $T = 33^\circ\text{C}$ και η πυκνότητα του νερού στη θερμοκρασία αυτή βρέθηκε ίση με 0.99349 g/cm^3 . Στον Πίνακα 5.15 καταγράφονται οι μετρήσεις για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 5.15 Μετρήσεις πυκνότητας δοκιμίων αλουμινίου – χαλκού

A/A	Δοκίμιο	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	M_4 (g)	d (g/cm ³)
1	Al	0,475	0,357	11,186	7,102	2,683
2	Al	0,475	0,357	6,086	3,893	2,686
3	Al	0,475	0,357	8,295	5,277	2,679
4	Al+10%Cu	0,475	0,357	6,731	4,303	2,691
5	Al+10%Cu	0,475	0,357	14,355	8,988	2,627
6	Al+5%Cu	0,475	0,357	15,228	9,557	2,639
7	Al+15%Cu	0,474	0,355	1,752	1,179	2,797
8	Al+15%Cu	0,474	0,355	2,322	1,551	2,816
9	Al+15%Cu	0,474	0,355	1,555	1,035	2,678
10	Al+15%Cu	0,474	0,355	6,167	4,061	2,846
11	Al+10%Cu	0,474	0,355	5,034	3,199	2,640
12	Al+10%Cu	0,474	0,355	4,766	3,027	2,632
13	Al+10%Cu	0,474	0,355	2,759	1,785	2,655
14	Al+5%Cu	0,474	0,355	2,044	1,319	2,574
15	Al+5%Cu	0,474	0,355	4,389	2,799	2,644
16	Al+5%Cu	0,474	0,355	2,663	1,708	2,601

Στα πλαίσια της εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί το πορώδες των δοκιμίων ως όγκος των περιεχομένων κενών. Το πορώδες υπολογίστηκε μέσω της ακόλουθης σχέσης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.16.

$$V_v = 1 - \left(\frac{d_{c,πειραματική}}{d_{c,θεωρητική}} \right)$$

όπου,

- V_v : το πορώδες (%)
- $d_{c,πειραματική}$: πυκνότητα μετάλλου που βρέθηκε πειραματικά
- $d_{c,θεωρητική}$: θεωρητική πυκνότητα μετάλλου

Πίνακας 5.16 Υπολογισμός πορώδους δοκιμίων

A/A	Δοκίμιο	$d_{c,πειρ.}$ (g/cm ³)	$d_{c,θεωρ.}$ (g/cm ³)	V_v (%)
1	Al	2,683	2,699	0,589
2	Al	2,686	2,699	0,478
3	Al	2,679	2,699	0,737
4	Al+10%Cu	2,691	3,325	19,068
5	Al+10%Cu	2,627	3,325	20,993
6	Al+5%Cu	2,639	3,012	12,382
7	Al+15%Cu	2,797	3,638	23,118
8	Al+15%Cu	2,816	3,638	22,596
9	Al+15%Cu	2,678	3,638	26,389
10	Al+15%Cu	2,846	3,638	21,772
11	Al+10%Cu	2,64	3,325	20,602
12	Al+10%Cu	2,632	3,325	20,842
13	Al+10%Cu	2,655	3,325	20,151
14	Al+5%Cu	2,574	3,012	14,541
15	Al+5%Cu	2,644	3,012	12,216
16	Al+5%Cu	2,601	3,012	13,644

Στον Πίνακα 5.17 παρουσιάζεται ο μέσος όρος της πυκνότητας και ο μέσος όρος του πορώδους για τα δοκίμια. Διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε χαλκό το ποσοστό του πορώδους είναι μεγαλύτερο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κακή αναμειξιμότητα των 2 μετάλλων και στο γεγονός ότι οι νιφάδες χαλκού από κάποιο ποσοστό και πάνω αλληλοεπιδρούν πολύ έντονα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συσσωματώματα τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα την καθίζηση στερεών νιφάδων χαλκού. Έτσι οι νιφάδες χαλκού που προστέθηκαν ως ενίσχυση της μήτρας αλουμινίου, δεν ενσωματώνονται σε ικανοποιητικό ποσοστό μέσα σε αυτή. Το πρόβλημα της καθίζησης του χαλκού φαίνεται να προκαλεί επίσης τη μειωμένη τιμή της πυκνότητας των δοκιμίων, ιδιαίτερα των δοκιμίων με 5% *Cu*, καθώς, διαπιστώνεται ότι η μέση πυκνότητά τους είναι μικρότερη από εκείνη του καθαρού αλουμινίου. Η προσθήκη χαλκού δημιουργεί πορώδες που αντισταθμίζει την αύξηση της πυκνότητας που επιφέρει η ενσωμάτωση του χαλκού.

Πίνακας 5.17 Μέσος όρος πυκνότητας και πορώδους δοκιμίων

Δοκίμια	M.O. Πυκνότητας (g/cm³)	M.O. Πορώδους (%)
<i>Al</i>	2,683 ± 0,003	0,601
<i>Al + 5% Cu</i>	2,615 ± 0,041	13,196
<i>Al + 10% Cu</i>	2,649 ± 0,042	20,331
<i>Al + 15% Cu</i>	2,784 ± 0,062	23,469

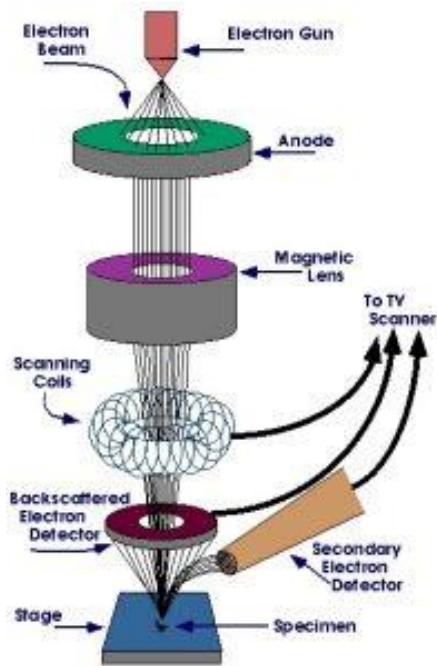
5.6 Ηλεκτρονική μικροσκοπία και φασματοσκοπία ακτινών-*X* ενεργειακής διασποράς

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (*Scanning Electron Microscopy – SEM*) και η φασματοσκοπία ακτινών-*X* ενεργειακής διασποράς (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy – EDS*) είναι μέθοδοι ανάλυσης επιφανειών. Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μελέτη επιφανειών μεγάλου εύρους υλικών, για τη διερεύνηση επιφανειακών αστοχιών, τον εντοπισμό ρύπων, την ταυτοποίηση των στοιχείων που περιέχονται στο προς μελέτη υλικό, την ανάλυση συγκολληήσεων και σε διάφορες άλλες μελέτες. Πρωτοεμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1950 ως μέθοδοι

ανάλυσης μεταλλικών επιφανειών. Έκτοτε, έχουν σημειωθεί αρκετές σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, ωστόσο το θεμελιώδες φυσικό υπόβαθρο παραμένει το ίδιο.

Βασική λειτουργία SEM

Η μέθοδος χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης το οποίο, σε αντίθεση με ένα κοινό οπτικό μικροσκόπιο, χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια μεταφράζοντας ουσιαστικά τις αλληλεπιδράσεις που προκαλούνται μεταξύ αυτών και των ατόμων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού, σε οπτικό σήμα. Η αλληλεπίδραση αυτή καθορίζει τη μεγέθυνση και την ανάλυση, επιτρέποντας μεγαλύτερο βάθος εστίασης σε σύγκριση με κοινά μικροσκόπια. Τα ηλεκτρόνια που χρησιμοποιεί η τεχνική επιταχύνονται με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής τάσης από την κάθοδο προς την άνοδο ενός μεταλλικού νήματος. Στην άνοδο τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται σε μια στήλη η οποία δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από τη στήλη και κατευθύνονται προς την επιφάνεια του δείγματος. Η πρόσκρουσή τους στην επιφάνεια του προς ανάλυση υλικού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία δευτερογενών ηλεκτρονίων και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια δημιουργούνται από την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων στο υλικό και «συλλέγονται» από έναν ανιχνευτή, ο οποίος τα χρησιμοποιεί ώστε να φθορίσει ένα σπινθηροβόλο υλικό στην επιφάνειά του. Το φθορίζον υλικό μεταφράζεται σε ηλεκτρονικό σήμα με τη χρήση ενός φωτοπολλαπλασιαστή. Η θέση του σήματος αυτού καθορίζεται μέσω της σάρωσης του προς μελέτη δείγματος με τη δέσμη ηλεκτρονίων και το σήμα του ανιχνευτή. Αντίθετα, τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια αναπηδούν στο δείγμα και επιστρέφουν στη συνέχεια έξω από αυτό, λόγω της πολύ χαμηλότερης ενέργειας που διαθέτουν. Τα ηλεκτρόνια αυτά χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό περιοχών με διαφορετικό μέσο ατομικό αριθμό, λόγω της ικανότητάς τους να παρουσιάζουν διαφορές στην απορρόφηση μεταξύ των στοιχείων (Εικόνα 5.33).



Εικόνα 5.33 Αρχή λειτουργίας Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) (πηγή: <https://vaccoat.com/wp-content/uploads/Figure-2.-Different-parts-of-SEM.-200x300.jpg>)

Βασική λειτουργία EDS

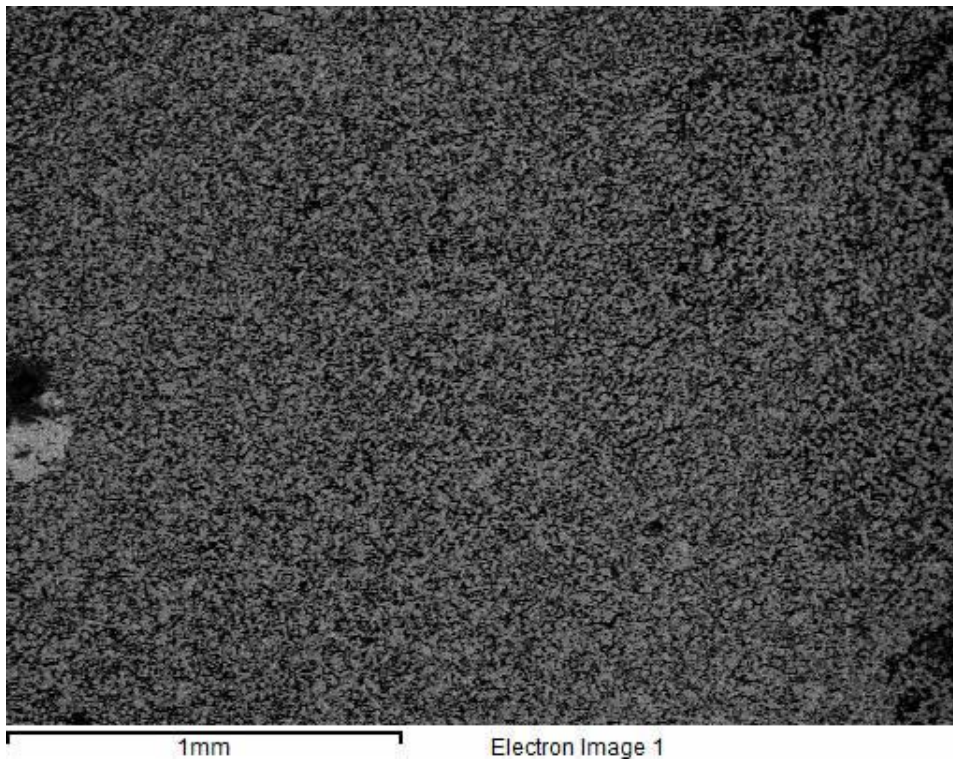
Κατά την πρόσκρουση των ηλεκτρονίων στο δείγμα, που αναλύθηκε ανωτέρω, ένας αριθμός φυσικών φαινομένων λαμβάνει χώρα, εκτός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ηλεκτρονίων. Καθώς δημιουργούνται δευτερογενή ηλεκτρόνια για την απεικόνιση, το άτομο που αλληλοεπιδρά, ιονίζεται, και πρέπει να προσλάβει ένα ηλεκτρόνιο εξωτερικής στιβάδας για να επιστρέψει στη βασική (θεμελιώδη) κατάσταση. Έτσι, εκπέμπεται ένα φωτόνιο, του οποίου η ενέργεια μετριέται με τη βοήθεια του ανιχνευτή EDS στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα των ακτίνων- X . Ο ανιχνευτής αυτός είναι ένα τσιπ ή ένας στερεός κρύσταλλος που ψύχεται σε υπεραγώγιμη θερμοκρασία για να έχει μεγαλύτερη κβαντική απόδοση. Βρίσκεται εκτός του άξονα της δέσμης των ηλεκτρονίων που προσκρούουν στο δοκίμιο. Οι ακτίνες- X που ανιχνεύονται διαχωρίζονται σε ενεργειακά κανάλια βάσει της αλληλεπίδρασής τους με τον ανιχνευτή και έτσι σχηματίζεται φάσμα ανιχνευόμενων ενεργειών. Η μελέτη του φάσματος αυτού επιτρέπει την αναγνώριση των μέγιστων ενεργειών και προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται στο δοκίμιο. Σε συνδυασμό με την τεχνική απεικόνισης SEM, υπάρχει η δυνατότητα σχηματισμού «χαρτών» ακτίνων- X , για την παρουσίαση περιοχών της επιφάνειας του δοκιμίου με υψηλές συγκεντρώσεις μεμονωμένων στοιχείων.

Εφαρμογές μεθόδου SEM/EDS

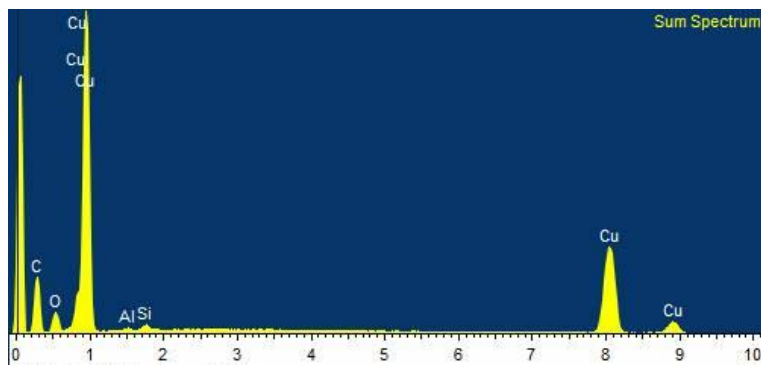
Οι σημαντικότερες εφαρμογές της μεθόδου είναι οι εξής (*RTI LAB 2023*):

- Ανάλυση χαρακτηριστικών επιφανειών για ποσοστιαία περιεκτικότητα συστατικών και μικροσυστατικών
- Περιεκτικότητα μικροεγκλεισμάτων σε επιφάνειες
- Ποσοτικός προσδιορισμός της μορφολογίας των επιφανειακών κρυστάλλων
- Ανάλυση του μεγέθους των σωματιδίων και της κατανομής της σύνθεσης του υλικού
- Ανάλυση αστοχίας μεταλλικών και πλαστικών εξαρτημάτων
- Προσδιορισμός ρυπογόνων ουσιών βαφής
- Εντοπισμός τρόπων αστοχίας μεταλλικών συγκολλήσεων
- Χαρακτηρισμός της διαμεταλλικής κατανομής σε διεπιφάνειες μεταλλικών συγκολλήσεων και μεταλλικών επικαλύψεων (π.χ. πλακέτες κυκλωμάτων)
- Ταυτοποίηση άγνωστων υλικών
- Ταυτοποίηση κραμάτων καθώς και των φάσεων στις οποίες βρίσκονται
- Μετρήσεις πάχους επικάλυψης και ομοιομορφίας
- Προσδιορισμός προέλευσης υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε εγκλήματα

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης τύπου *JEOL JSM-6510 LV (Oxford Instruments)* με ανάλυση ηλεκτρονίων δευτερογενούς εκπομπής (secondary emission electrons), ηλεκτρικού φορτίου *20kVolt*. Στόχος είναι να μετρηθούν τα πραγματικά ποσοστά αλουμινίου και χαλκού που περιέχονται μέσα στα χυτά δείγματα καθώς και άλλες μικροποσότητες στοιχείων που μπορεί να υπάρχουν. Στις Εικόνες 5.34 – 5.59 και τους Πίνακες 5.18 – 5.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα διάφορα δείγματα και σε διάφορες περιοχές της επιφάνειας των δειγμάτων.



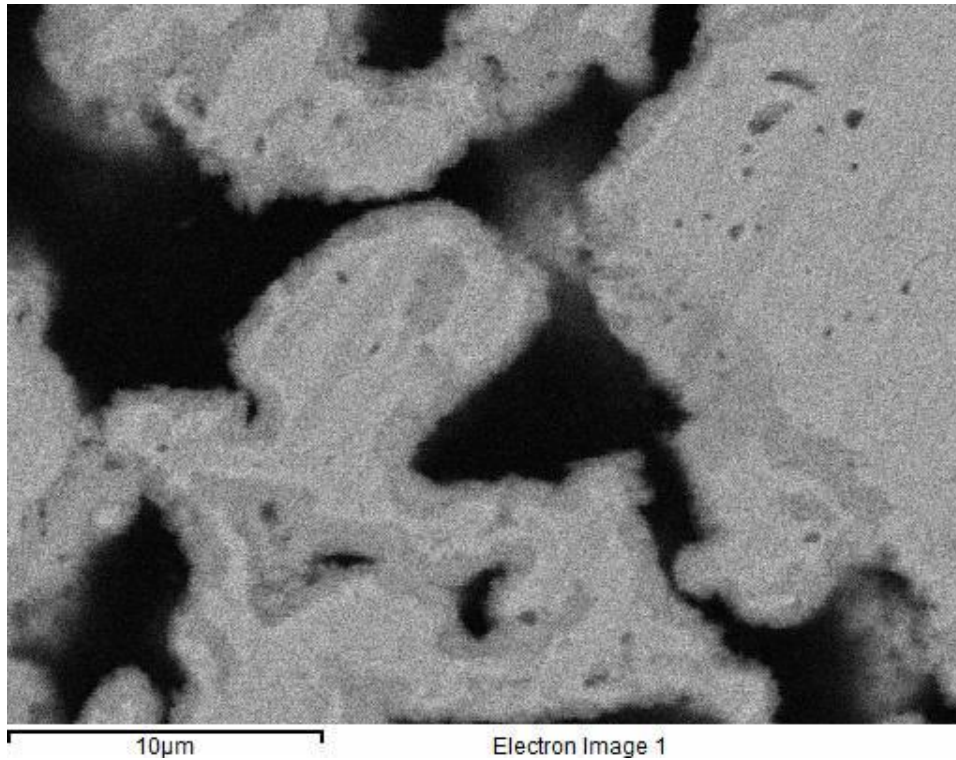
Εικόνα 5.34 Μικροφωτογραφία δείγματος συσσωματώματος χαλκού



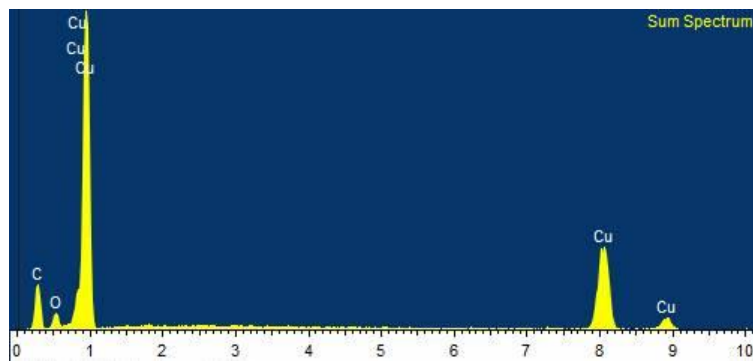
Εικόνα 5.35 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δείγματος συσσωματώματος χαλκού

Πίνακας 5.18 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δείγματος συσσωματώματος χαλκού, με την ποσότητα κάθε συστατικού

<i>Element</i>	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Cu</i>
<i>Weight%</i>	39,59	8,50	0,29	0,53	51,10



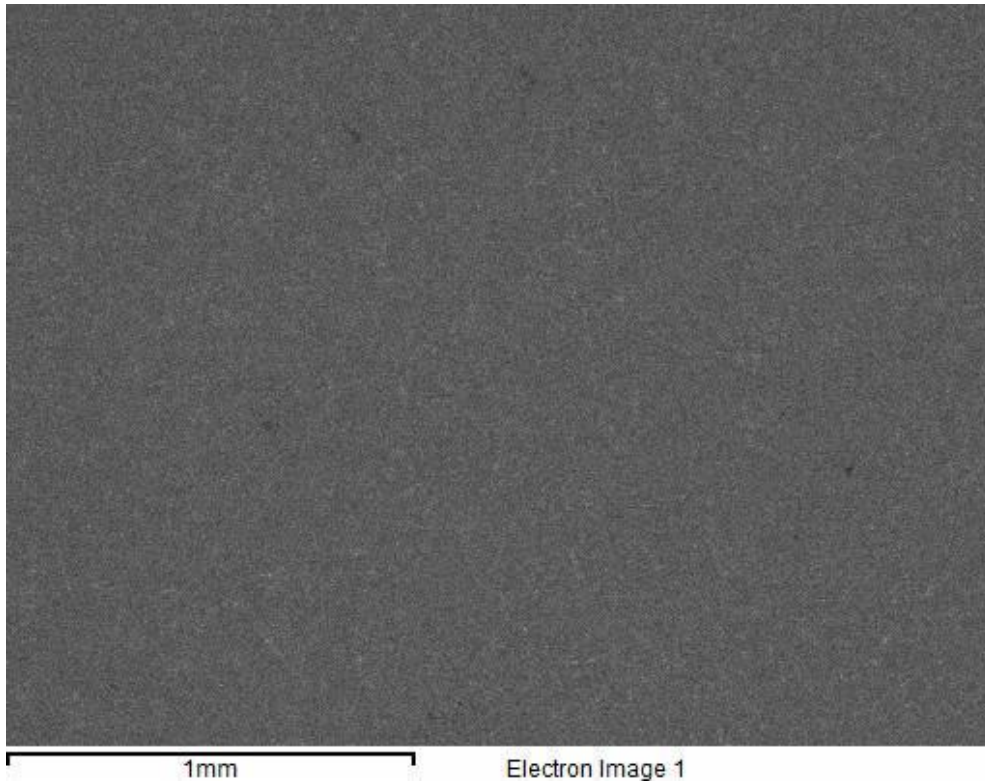
Εικόνα 5.36 Μικροφωτογραφία δείγματος συσσωματώματος χαλκού. Διακρίνονται οι νιφάδες (flakes) χαλκού που χρησιμοποιήθηκαν ως προστιθέμενο υλικό στο εμπορικά διαθέσιμο αλουμίνιο.



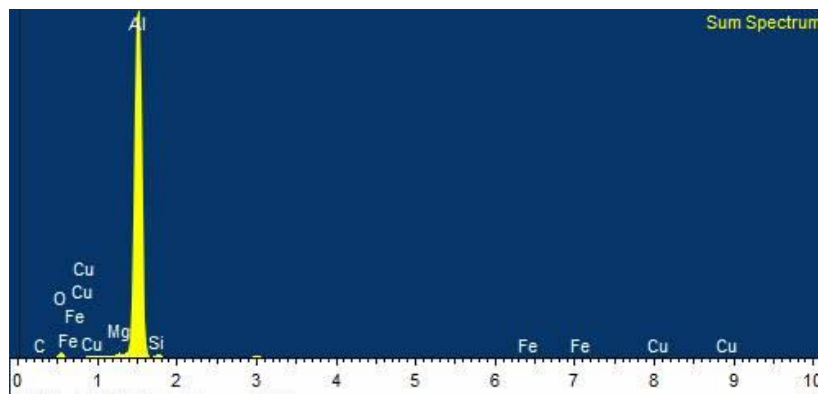
Εικόνα 5.37 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δείγματος συσσωματώματος χαλκού

Πίνακας 5.19 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δείγματος συσσωματώματος χαλκού, με την ποσότητα κάθε συστατικού

<i>Element</i>	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Cu</i>
<i>Weight%</i>	36,82	7,38	55,80



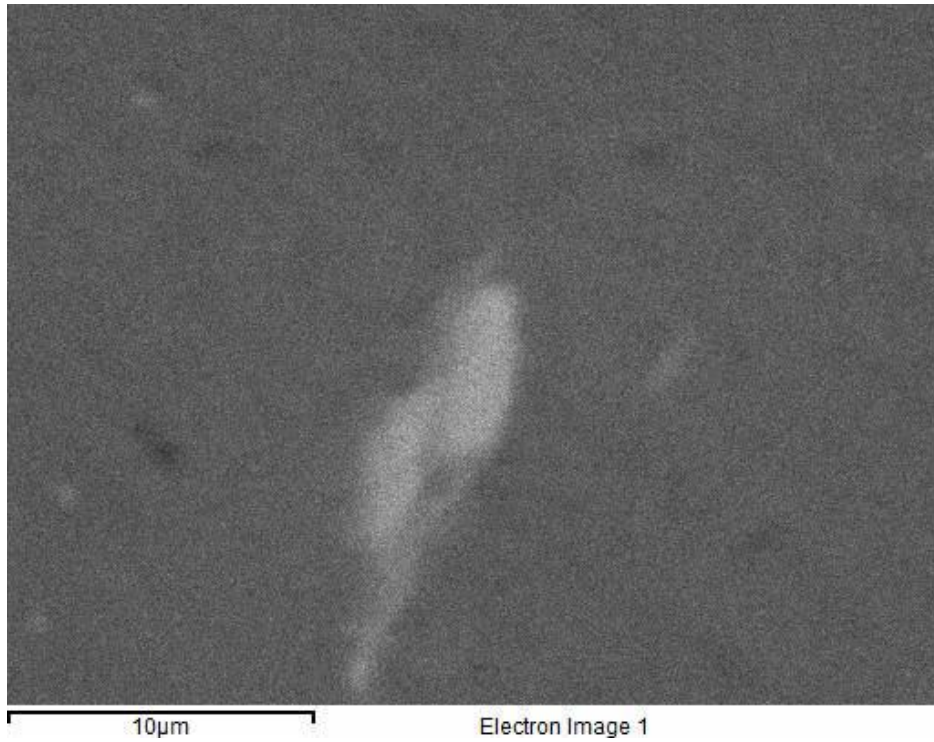
Εικόνα 5.38 Μικροφωτογραφία δοκιμίου Al με προσθήκη 10% χαλκού



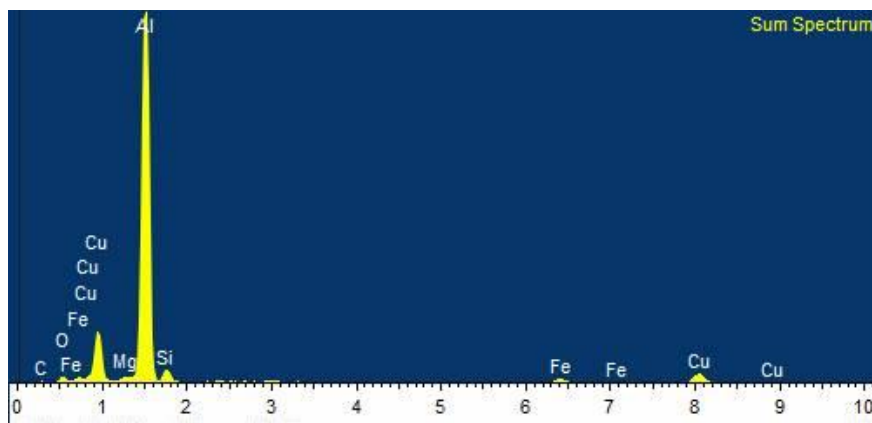
Εικόνα 5.39 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 10% χαλκού

Πίνακας 5.20 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+10%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu
Weight%	6,24	9,31	0,51	81,13	1,99	0,24	0,57



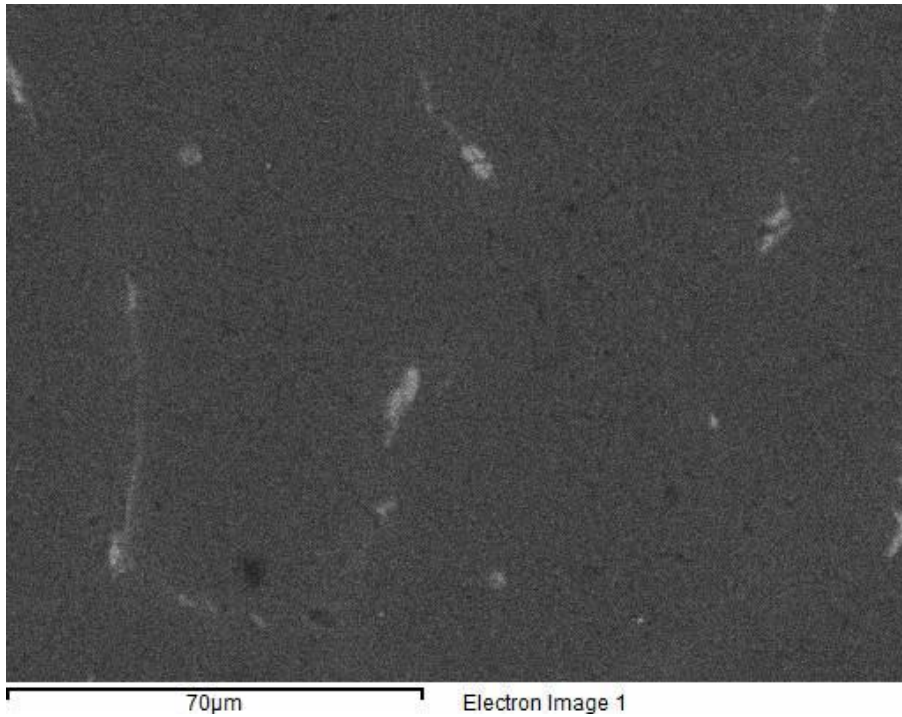
Εικόνα 5.40 Μικροφωτογραφία νιφάδας χαλκού ενσωματωμένης στη μήτρα αλουμινίου. Η μικροφωτογραφία αφορά το δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 10% κ.β. νιφάδες χαλκού



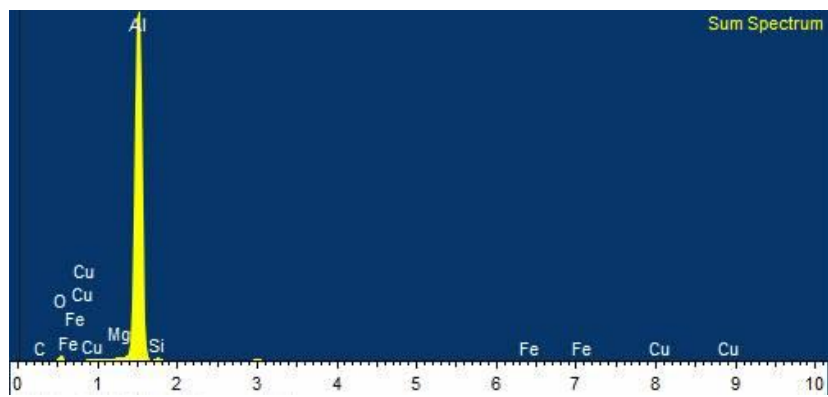
Εικόνα 5.41 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 10% χαλκού

Πίνακας 5.21 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+10%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu
Weight%	6,78	6,00	0,43	65,66	4,08	2,92	14,12



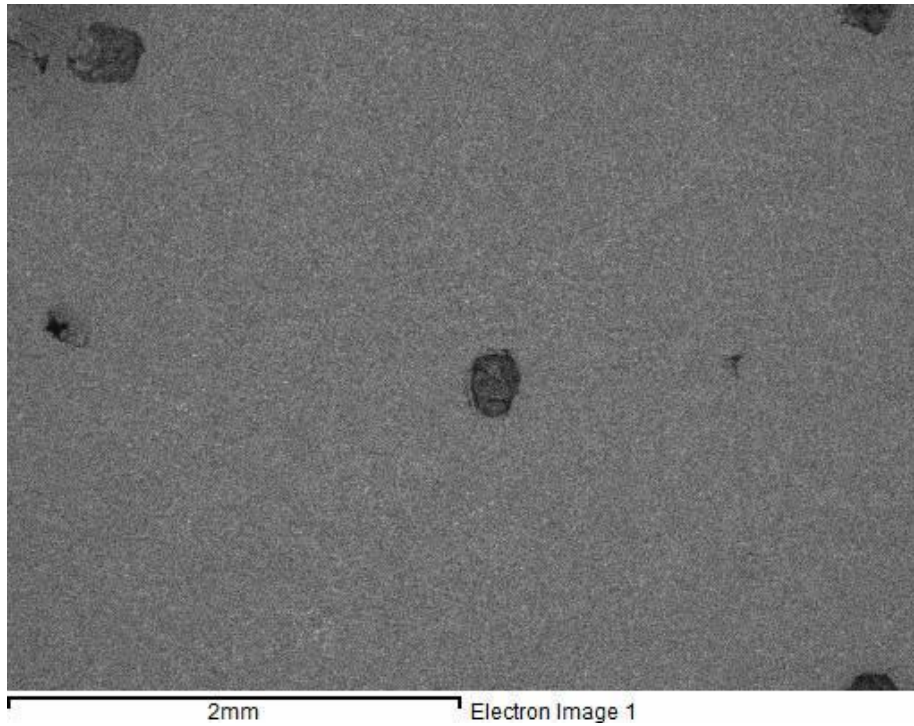
Εικόνα 5.42 Νιφάδες χαλκού ενσωματωμένες στη μήτρα αλουμινίου. Η μικροφωτογραφία αφορά το δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 10% κ.β. νιφάδες χαλκού.



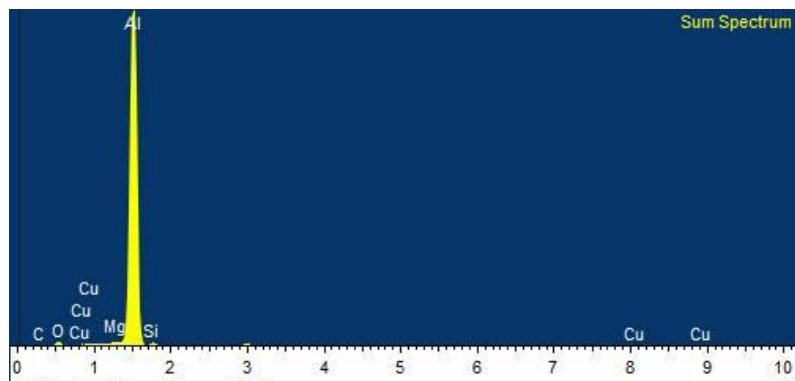
Εικόνα 5.43 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 10% χαλκού

Πίνακας 5.22 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+10%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu
Weight%	6,53	9,38	0,48	80,97	1,90	0,20	0,53



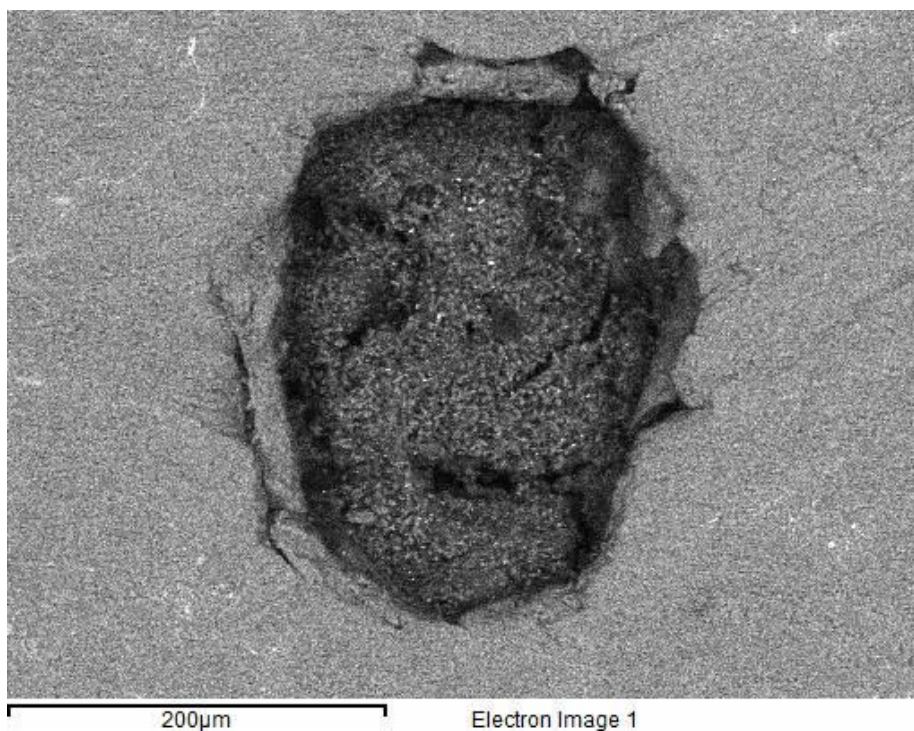
Εικόνα 5.44 Κενά (οπές) στην επιφάνεια του δοκιμίου Al κατά τη χύτευση του οποίου προστέθηκαν 15% κ.β. νιφάδες χαλκού.



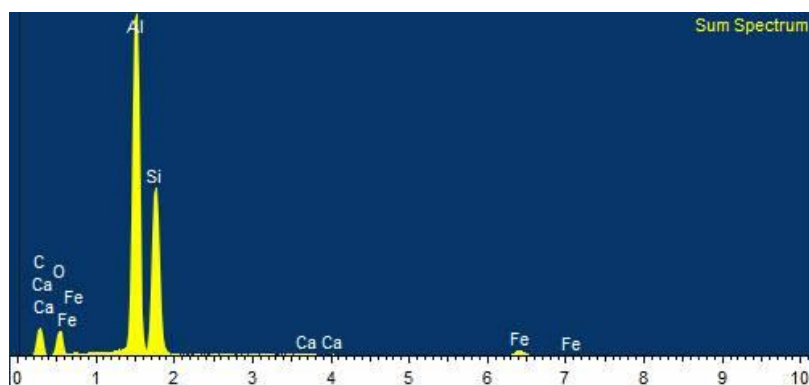
Εικόνα 5.45 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 15% χαλκού

Πίνακας 5.23 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+15%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Cu
Weight%	8,18	8,74	0,44	80,55	1,62	0,47



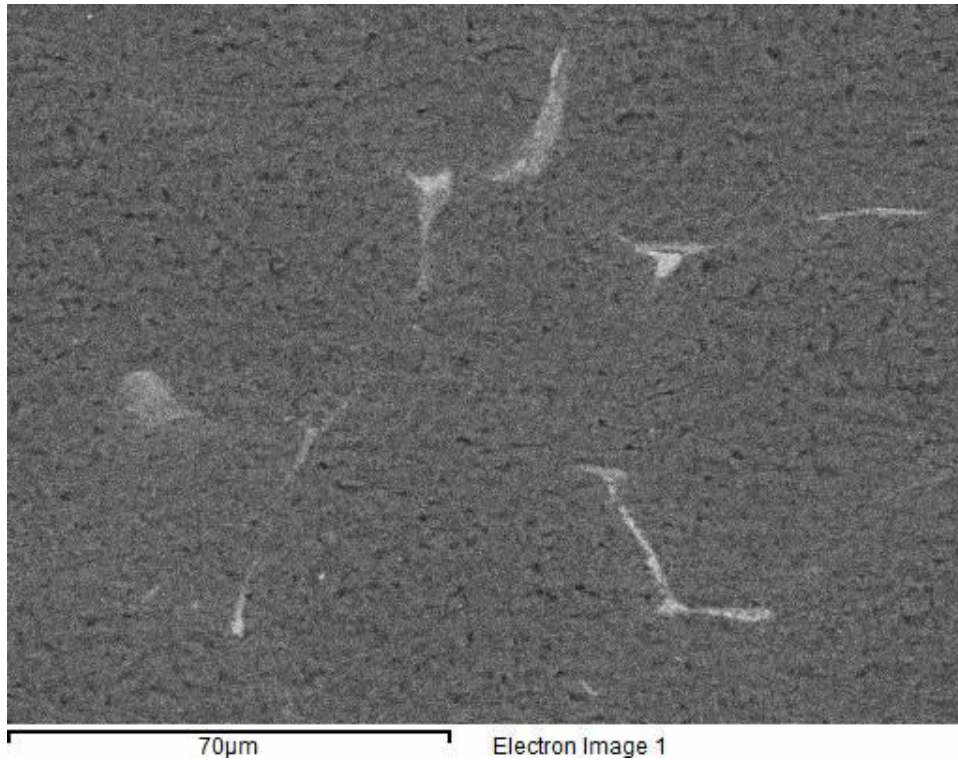
Εικόνα 5.46 Λεπτομέρεια της σπής της Εικόνας 5.44. Σημειώνεται η απουσία χαλκού στην περιοχή που απεικονίζεται.



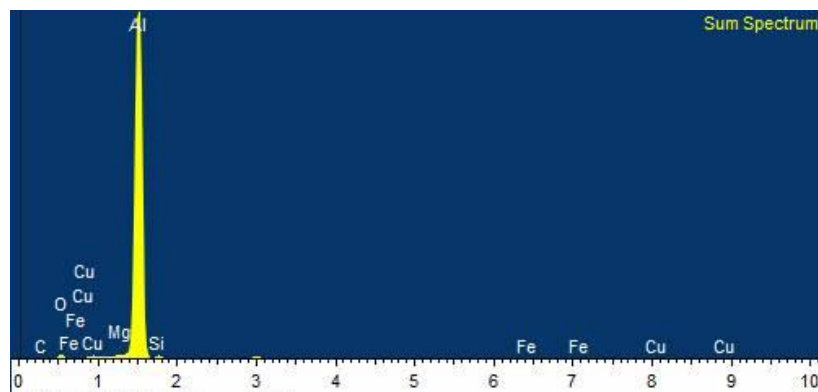
Εικόνα 5.47 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS της σπής της Εικόνας 5.46

Πίνακας 5.24 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+10%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Al	Si	Ca	Fe
Weight%	39,75	16,65	24,40	16,98	0,20	2,01



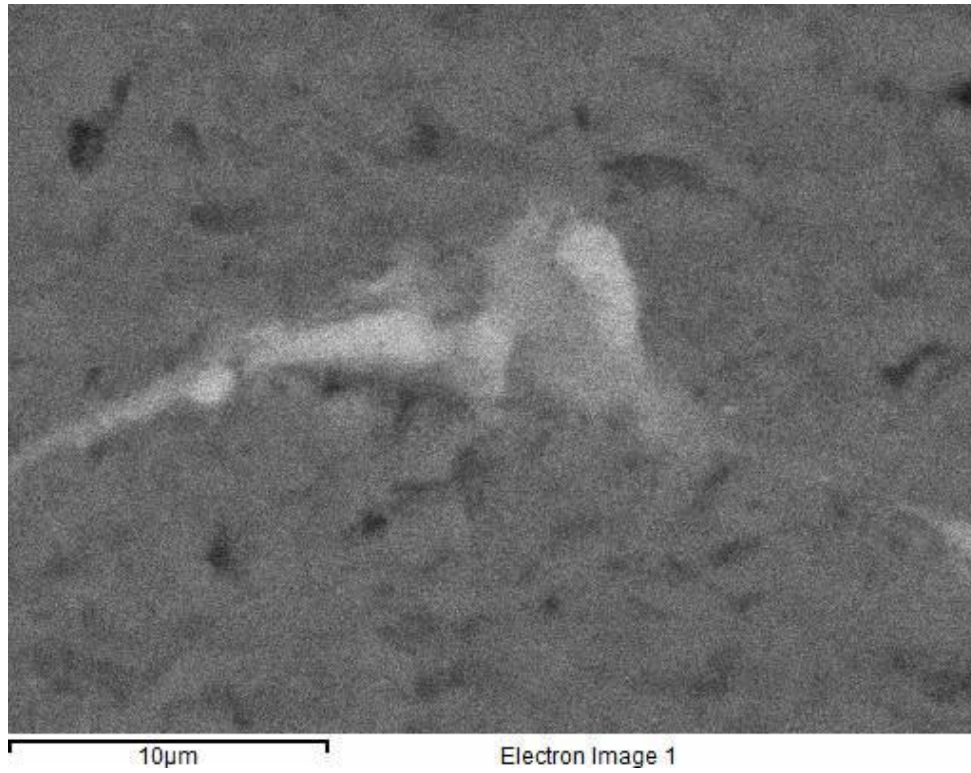
Εικόνα 5.48 Νιφάδες χαλκού ενσωματωμένες στη μήτρα αλουμινίου. Η μικροφωτογραφία αφορά το δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 15% κ.β. νιφάδες χαλκού.



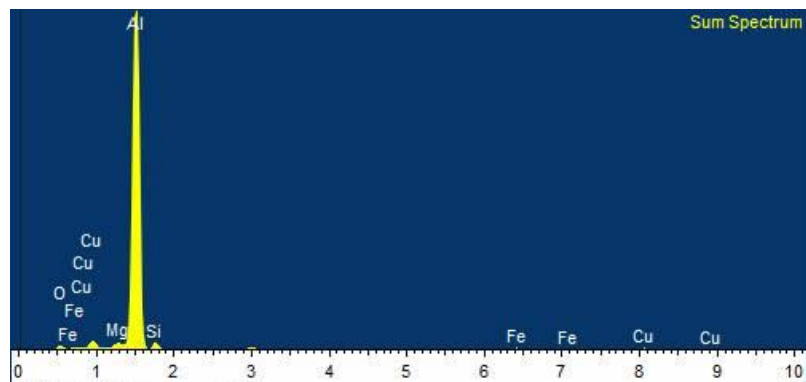
Εικόνα 5.49 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 15% χαλκού

Πίνακας 5.25 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+15%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu
Weight%	7,19	8,12	0,49	81,39	1,64	0,44	0,74



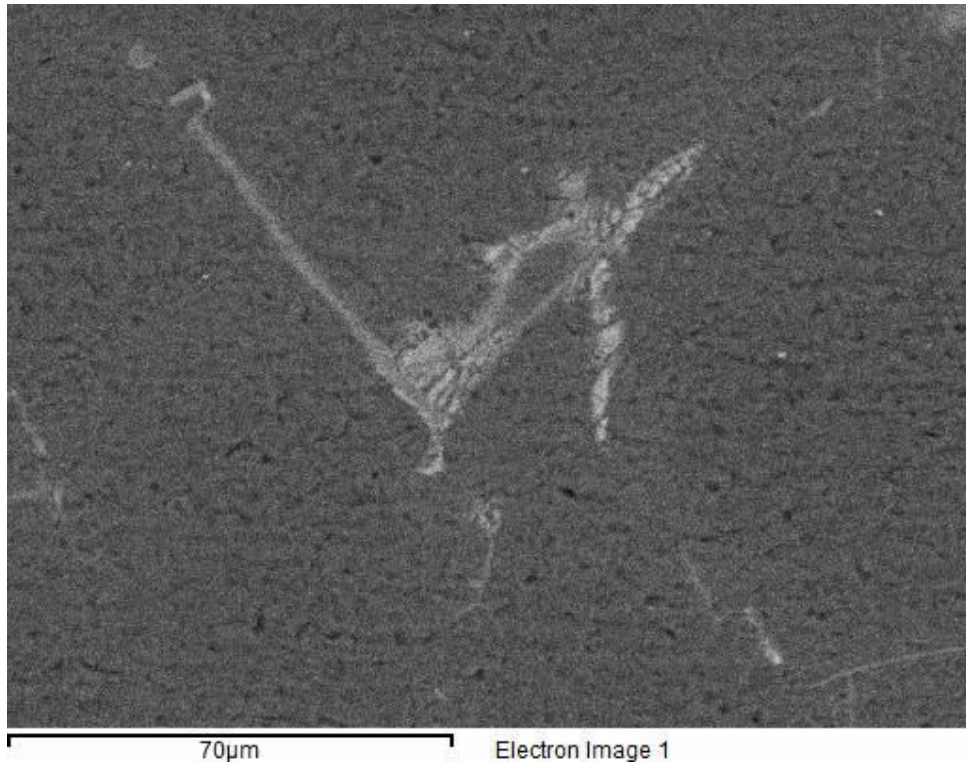
Εικόνα 5.50 Νιφάδες χαλκού ενσωματωμένες στη μήτρα αλουμινίου. Η μικροφωτογραφία αφορά το δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 15% κ.β. νιφάδες χαλκού.



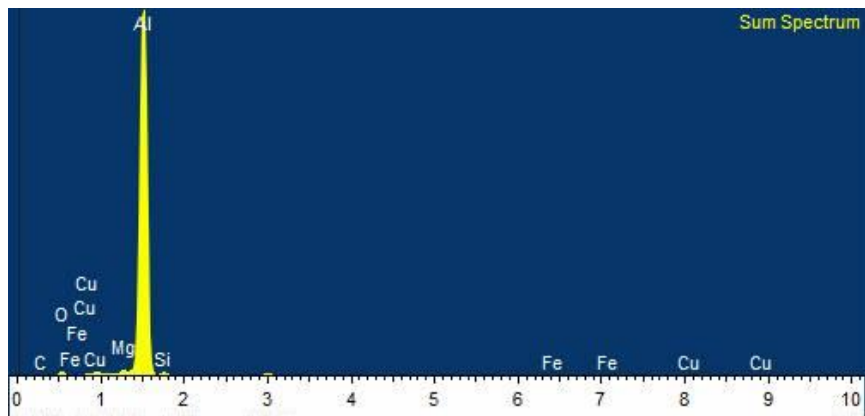
Εικόνα 5.51 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 15% χαλκού

Πίνακας 5.26 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+15%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu
Weight%	7,22	0,94	82,72	3,95	1,72	3,44



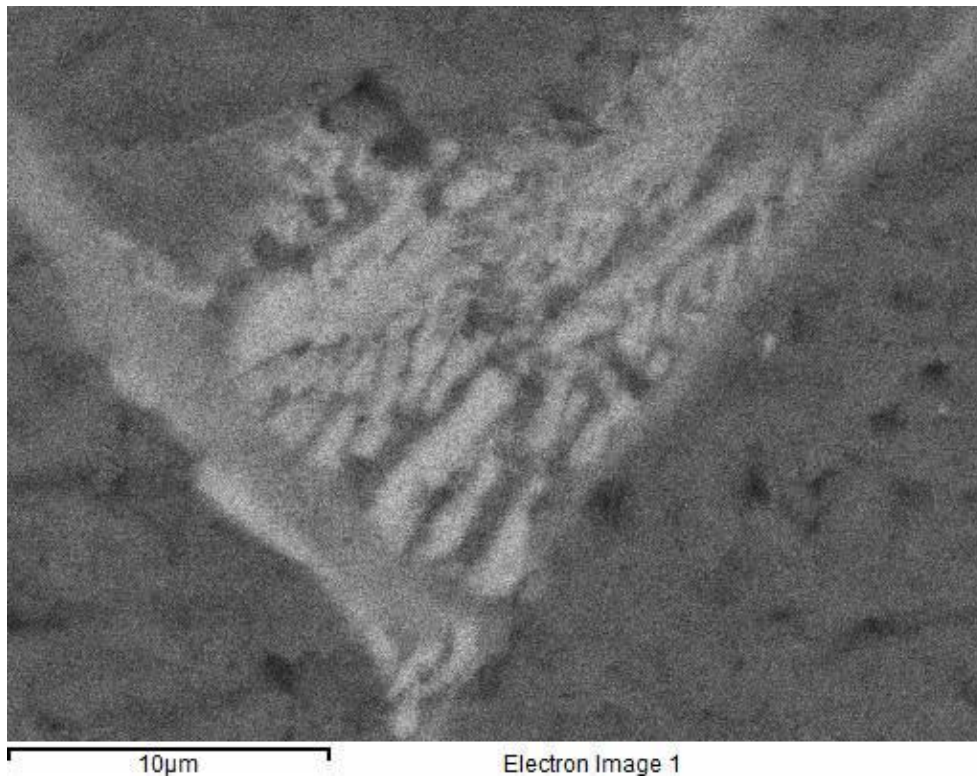
Εικόνα 5.52 Νιφάδες χαλκού ενσωματωμένες στη μήτρα αλουμινίου. Η μικροφωτογραφία αφορά το δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 15% κ.β. νιφάδες χαλκού.



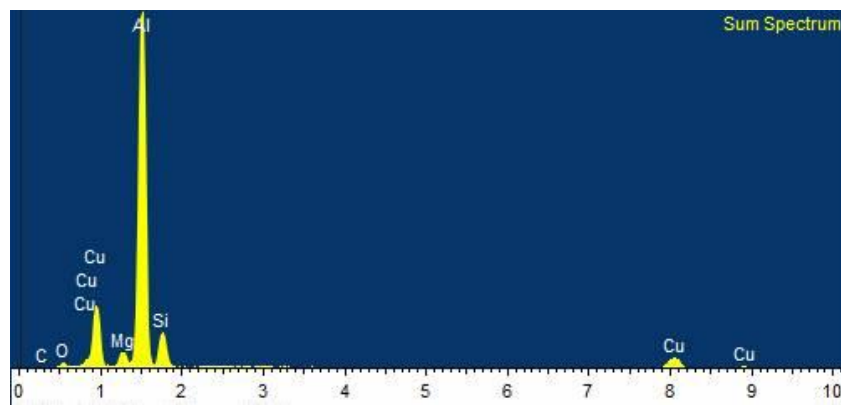
Εικόνα 5.53 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al με προσθήκη 15% χαλκού

Πίνακας 5.27 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+15%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu
Weight%	7,13	7,59	0,66	80,88	1,87	0,38	1,49



Εικόνα 5.54 Μεγέθυνση της λευκής περιοχής της Εικόνας 5.52

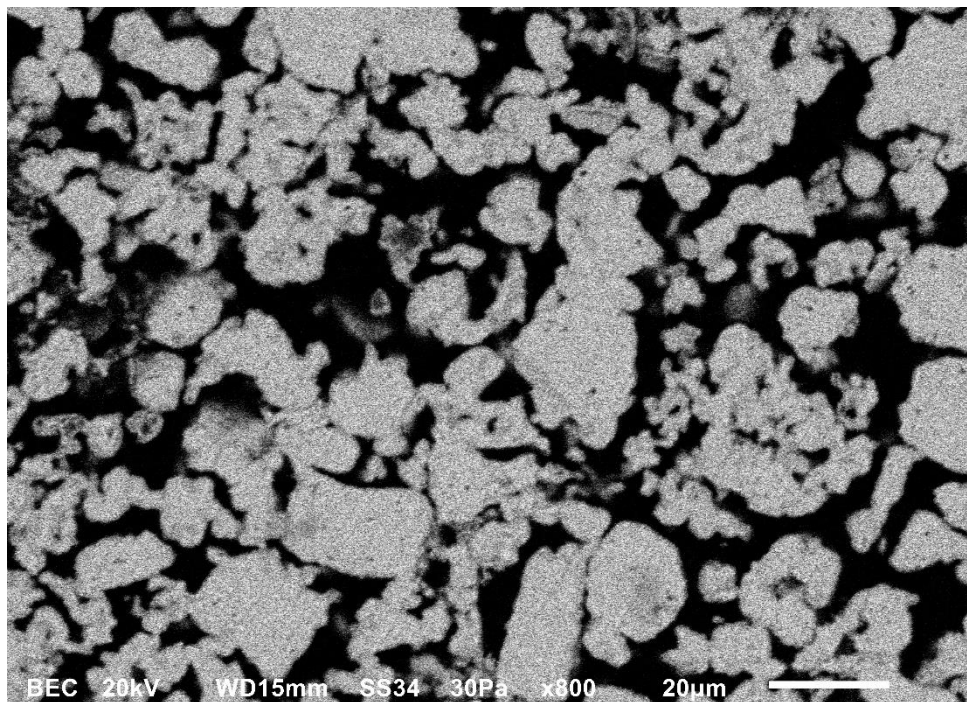


Εικόνα 5.55 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS της λευκής περιοχής της Εικόνας 5.54

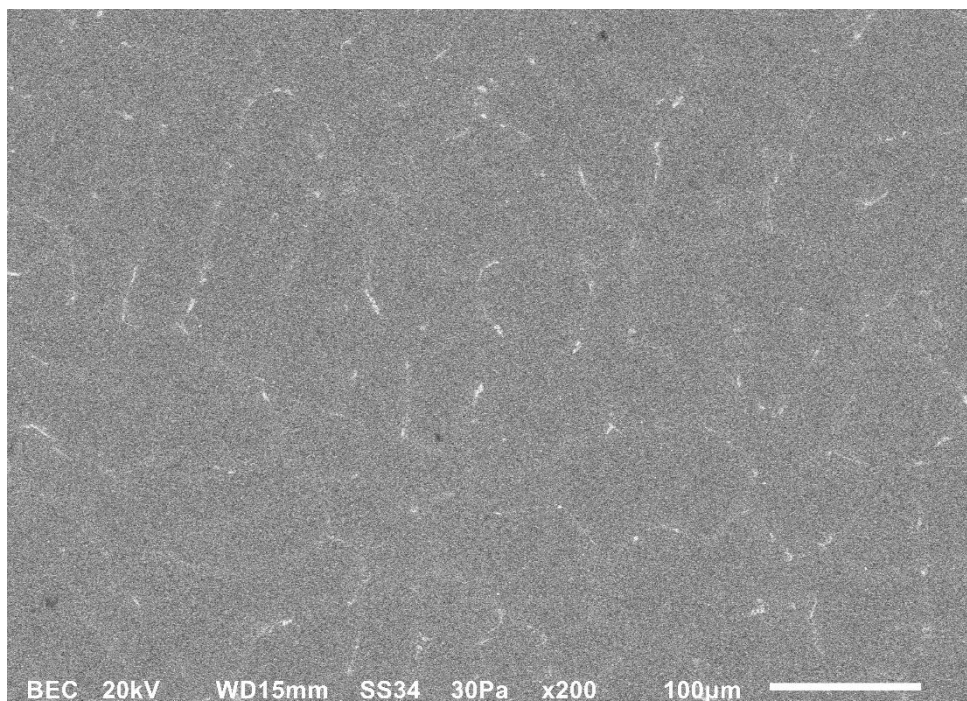
Πίνακας 5.28 Αποτελέσματα ανάλυσης EDS δοκιμίου Al+15%Cu, με την ποσότητα κάθε συστατικού

Element	C	O	Mg	Al	Si	Cu
Weight%	4,93	4,15	2,55	61,08	11,26	16,03

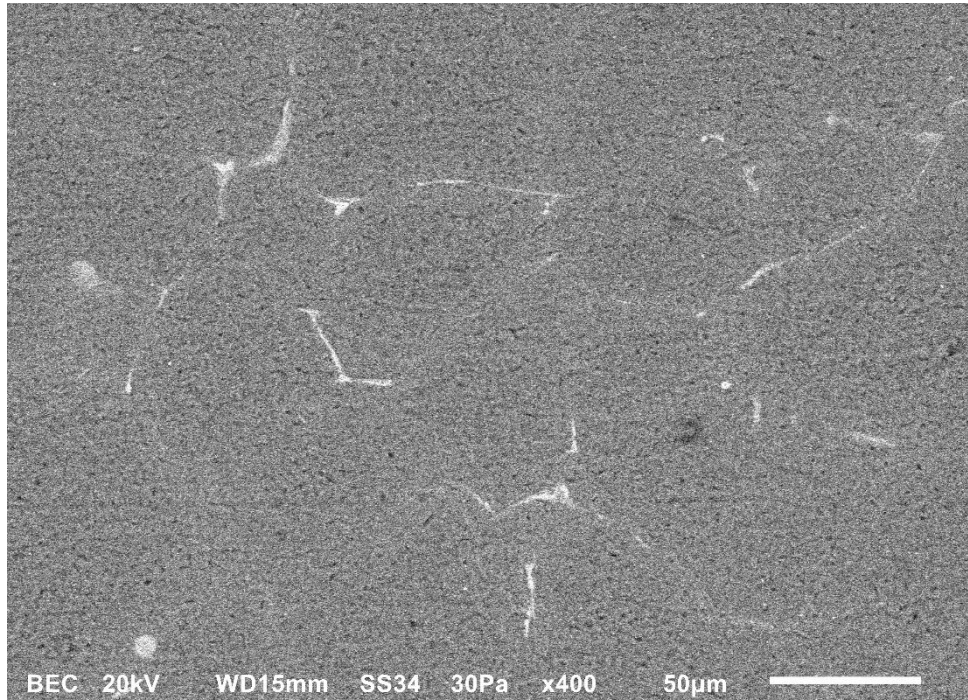
Ακολουθούν ορισμένες ακόμη εικόνες σε μικρότερη μεγέθυνση, παρουσιάζουν τις νιφάδες χαλκού στις επιφάνειες που μελετήθηκαν.



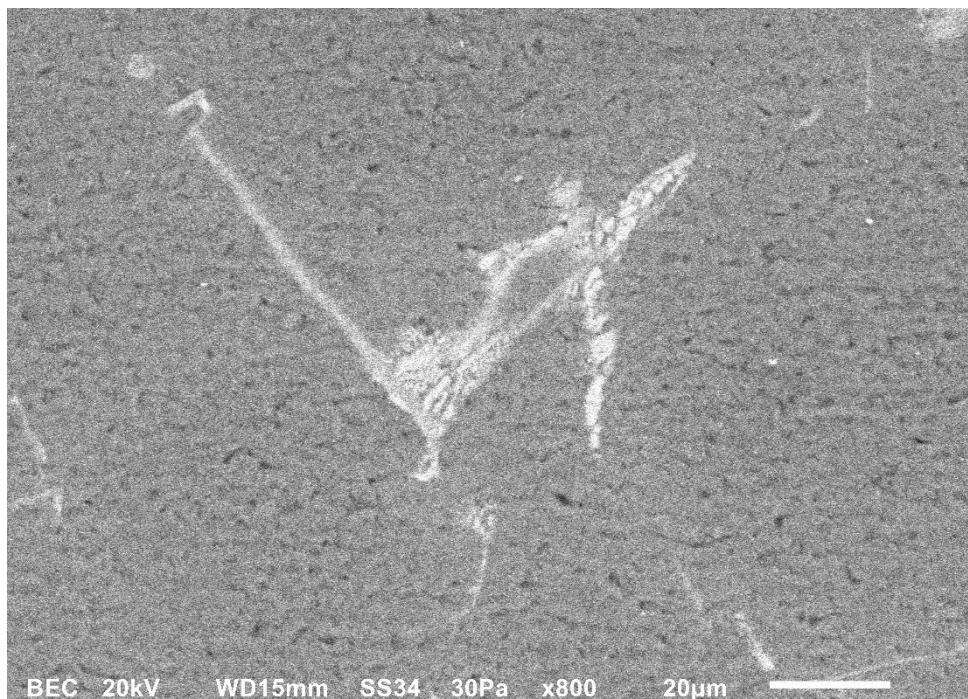
Εικόνα 5.56 Μικροφωτογραφία νιφάδων χαλκού. Διακρίνονται εύκολα οι νιφάδες σε αυτή τη μεγέθυνση



Εικόνα 5.57 Μικροφωτογραφία νιφάδων χαλκού ενσωματωμένες σε μήτρα αλουμινίου, σε δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 10% κ.β. νιφάδες χαλκού.



Εικόνα 5.58 Μικροφωτογραφία νιφάδων χαλκού ενσωματωμένες σε μήτρα αλουμινίου, σε δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 15% κ.β. νιφάδες χαλκού



Εικόνα 5.59 Μικροφωτογραφία νιφάδων χαλκού ενσωματωμένες σε μήτρα αλουμινίου, σε δοκίμιο κατά τη χύτευση του οποίου είχαν προστεθεί 15% κ.β. νιφάδες χαλκού (σε μεγαλύτερη μεγέθυνση)

Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες και τα αποτελέσματα της ανάλυση *SEM-EDS* παρατηρούνται μικρές σχετικά διαφορές στην εσωτερική δομή των χυτών δοκιμίων που κατασκευάστηκαν. Τα δοκίμια στα οποία έγινε προσθήκη χαλκού 5% και 10% κ.β. δεν εμφανίζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Η κυριότερη παρατήρηση αφορά ορισμένες λευκές κηλίδες στα δοκίμια με 10% χαλκού, στα οποία εμφανίζεται και μεγαλύτερη συγκεντρωμένη ποσότητα χαλκού. Η παρατήρηση αυτή είναι ακόμα πιο έντονη στα δοκίμια με 15% κ.β. περιεκτικότητα χαλκού, στα οποία παρατηρήθηκε επίσης η ύπαρξη αρκετών οπών, όπως διαπιστώθηκε και κατά την οπτική μικροσκοπία. Επίσης, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της εξέτασης *EDS*, εύκολα διαπιστώνεται πως το ποσοστό χαλκού που μετρήθηκε πάνω στις προς ανάλυση επιφάνειες, δεν είναι ίδιο με το ποσοστό χαλκού που αρχικά υπολογίστηκε και προστέθηκε ως ενίσχυση στο χυτό, αλλά πολύ μικρότερο. Αυτό οφείλεται πιθανώς στην μη αποτελεσματική ανάδευση που υπέστη το τήγμα αλουμινίου – χαλκού κατά τη διάρκεια της χύτευσης. Έχει αναφερθεί (*Kumar 2014*) ότι η επιτυχημένη ανάμιξη αλουμινίου – χαλκού κατά τη χύτευση είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, καθώς ο χαλκός υπόκειται σε καθίζηση εξ αιτίας της έντονης αλληλεπίδρασης των ατόμων χαλκού μεταξύ τους, κατά την οποία δημιουργούνται συσσωματώματα τα οποία δεν αναμιγνύονται επιτυχώς με το αλουμίνιο.

Η περιεκτικότητα σε χαλκό που εντοπίστηκε στις επιφάνειες που μελετήθηκαν είναι η εξής (κατά μέσο όρο):

- Al + 5%Cu κ.β. – 0 %
- Al + 10%Cu κ.β. – 0,55 %
- Al + 15%Cu κ.β. – 0,9 %

Τα πολύ χαμηλά αυτά ποσοστά οφείλονται εν μέρει στο γεγονός ότι η ανάλυση *SEM-EDS* εντοπίζει και ορισμένα άλλα στοιχεία πάνω στην επιφάνεια που μελετάται, όπως ο άνθρακας ο οποίος υπάρχει σε μεγάλο ποσοστό σε όλες της επιφάνειες και οφείλεται στα έλαια που περιέχονται στην πυριτική άμμο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των καλουπιών. Επιπλέον, οι νιφάδες χαλκού υπάρχουν διάσπαρτες στο εσωτερικό του χυτού και οι περιοχές που αναλύθηκαν δεν περιείχαν αρκετές νιφάδες με εξαίρεση ορισμένες περιοχές, όπως απεικονίζονται στις Εικόνες 5.56 και 5.59, όπου το ποσοστό χαλκού εμφανίζεται μεγάλο. Ωστόσο η περιεκτικότητα αυτή δεν προσμετράται στον μέσο όρο της περιεκτικότητας.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παραγωγή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας με χρήση δύο ή περισσότερων υλικών ή κραμάτων, γνωρίζει ολοένα και μεγαλύτερη ανάπτυξη τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Τα σύνθετα υλικά προτιμώνται τόσο από οικονομικής όσο και από μηχανικής άποψης, καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των μεμονωμένων υλικών και ενισχύουν σημαντικά τις ιδιότητες στο τελικό σύνθετο υλικό. Ωστόσο, η διαδικασία επιλογής των κατάλληλων υλικών και των ποσοστών ανάμιξής τους, που θα προσφέρει τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα, είναι μια διαδικασία περίπλοκη, δύσκολη και χρονοβόρα. Γενικά η αντοχή σε εφελκυσμό και σε κρούση αποτελούν δύο από τους βασικότερους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή των υλικών που θα συνδυαστούν για τη δημιουργία σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας. Επιπλέον, το μειωμένο βάρος είναι μια ιδιότητα που είναι αρκετά επιθυμητή στις διάφορες κατασκευές. Το αλουμίνιο καθώς και τα σύνθετα υλικά μήτρας αλουμινίου, συνδυάζουν τις παραπάνω ιδιότητες και χρησιμοποιούνται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική.

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, κατασκευάστηκαν δοκίμια μήτρας αλουμινίου με προσθήκη 5% και 15% νιφάδων χαλκού κ.β. ως ενίσχυση. Τα χυτά προϊόντα επεξεργάστηκαν κατάλληλα και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σε πειραματικές δοκιμασίες με στόχο τη μελέτη και τη μέτρηση των βασικότερων μηχανικών ιδιοτήτων τους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τέθηκαν σε σύγκριση τόσο μεταξύ τους όσο και με αποτελέσματα από αντίστοιχες δοκιμασίες σε χυτά δοκίμια καθαρού αλουμινίου και σε χυτά δοκίμια με ενίσχυση νιφάδων χαλκού σε ποσοστό 10% κ.β., όπως προέκυψαν σε προηγούμενη Πτυχιακή Εργασία (Νέστωρας, 2022).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη που διεξήχθη είναι τα εξής:

- Από τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση προκύπτει ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του χαλκού προκαλεί μείωση της δυσθραυστότητας, δηλαδή του ποσού ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει το υλικό πριν φτάσει στην αστοχία λόγω κρουστικού φορτίου. Ιδιαίτερα στο δοκίμιο με προσθήκη 15% ενίσχυσης χαλκού κ.β παρατηρήθηκε πολύ μικρή τιμή δυσθραυστότητας ($G_{15\%}=0,807\pm 0,048 \text{ J/cm}^2$), σε αντίθεση με τις τιμές των δοκιμίων 5% και 10% αντίστοιχα ($G_{5\%}=8,363\pm 0,457 \text{ J/cm}^2$ και $G_{10\%}=6,963 \text{ J/cm}^2$). Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε, το

γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η μεγάλη προσθήκη χαλκού δημιουργεί ψαθυρότητα και έντονο πορώδες (αποδεικνύεται και παρακάτω), πράγμα που λειτουργεί αρνητικά στην αντοχή σε κρούση. Επιπλέον, με βάση μια μελέτη από τη βιβλιογραφία (Kumar 2014), η αντοχή σε κρούση του σύνθετου υλικού αυξάνεται μέχρι ποσοστό προσθήκης νιφάδων χαλκού 8% κ.β.. Από το ποσοστό αυτό και πάνω προκαλείται πτώση των μηχανικών ιδιοτήτων, αποτέλεσμα το οποίο επιβεβαιώνει τις μετρήσεις.

- Από τα αποτελέσματα των δοκιμασιών σε εφελκυσμό που πραγματοποιήθηκαν, εκτός των δοκιμών καθαρού αλουμινίου ($\sigma_{UTS} = 157 \pm 10 \text{ MPa}$) (που εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό για απροσδιόριστο λόγο), στα υπόλοιπα δοκίμια παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό από $\sigma_{UTS} = 127 \pm 6 \text{ MPa}$ στα δοκίμια με την προσθήκη νιφάδων χαλκού 5%κ.β., σε $\sigma_{UTS} = 140 \pm 2 \text{ MPa}$ στα δοκίμια με την προσθήκη νιφάδων χαλκού 10%κ.β. και $\sigma_{UTS} = 218 \text{ MPa}$ στα δοκίμια με την προσθήκη νιφάδων χαλκού 15%κ.β. Η αντοχή σε διαρροή παρουσιάζει αντίστοιχα αποτελέσματα, εκτός των δοκιμών καθαρού αλουμινίου ($\sigma_{Y0,2\%} = 111 \pm 12 \text{ MPa}$) (που εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή σε διαρροή για απροσδιόριστο επίσης λόγο), δηλαδή αύξηση της αντοχής σε διαρροή με αύξηση του ποσοστού προσθήκης χαλκού, καθώς οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι $\sigma_{Y0,2\%} = 65 \pm 6 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 5%κ.β., $\sigma_{Y0,2\%} = 106 \pm 10 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 10%κ.β. και $\sigma_{Y0,2\%} = 108 \text{ MPa}$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 15%κ.β.. Η παραμόρφωση στη θραύση εμφανίζει εμφανή μείωση με την αύξηση της περιεκτικότητας του χαλκού από $\epsilon_{\theta\%} = 9,7 \pm 2,5$ για τα δοκίμια καθαρού αλουμινίου, $\epsilon_{\theta\%} = 7,0 \pm 0,6$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 5%κ.β., $\epsilon_{\theta\%} = 6,1 \pm 0,8$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 10%κ.β. και $\epsilon_{\theta\%} = 0,8$ για τα δοκίμια με νιφάδες χαλκού 15%κ.β. γεγονός που δηλώνει μείωση της ολκιμότητας. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο πορώδες και την ψαθυρότητα των υλικών. Σύμφωνα με τη μελέτη που προαναφέρθηκε στα συμπεράσματα της κρούσης (Kumar 2014) η παραμόρφωση σε θραύση μειώνεται λόγω της παρουσίας της ενίσχυσης του χαλκού και την συσσωμάτευση των ατόμων χαλκού μετά από ποσοστό 8% κ.β και τα σύνθετα αυτά υλικά αποτελούνται από χονδροειδείς κόκκους στερεού αλουμινίου και ενδομεταλλικά σωματίδια χαλκού, στα όρια των κόκκων, πράγμα που επηρεάζει αρνητικά τόσο την αντοχή όσο και τη θραυστική συμπεριφορά.

- Η οπτική μικροσκοπία (μεταλλογραφική εξέταση) έδειξε την ύπαρξη πολλών, μικρού μεγέθους κόκκων στην επιφάνεια των δοκιμίων περιεκτικότητας 5% κ.β. σε χαλκό. Η αύξηση του ποσοστού χαλκού φαίνεται ότι επιφέρει αύξηση του μεγέθους των κόκκων και μείωση του αριθμού τους. Επιπλέον, στην επιφάνεια των δοκιμίων με περιεκτικότητα 15% χαλκού κ.β. εμφανίζονται ορισμένες λευκές δενδριτικές μορφές οι οποίες αντιπροσωπεύουν περιοχές με υψηλότερη περιεκτικότητα σε χαλκό. Επίσης, εμφανίζονται αρκετές οπές, τόσο στην επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό. Η υψηλή αυτή παρουσία πορώδους οφείλεται στο αυξημένο ποσοστό προσθήκης χαλκού, σύμφωνα και με τη μελέτη που προαναφέρθηκε. Επίσης, παρατηρείται ότι οι νιφάδες χαλκού είναι αρκετά διάσπαρτες και απομακρυσμένες μεταξύ τους σε όλο τον όγκο των δοκιμίων.
- Η μέτρηση της σκληρότητας με τη μέθοδο *Vickers* των χυτών δοκιμίων έδειξε ότι η αύξηση του ποσοστού του χαλκού επιφέρει αύξηση της σκληρότητας στο χυτό δοκίμιο. Συγκεκριμένα το καθαρό αλουμίνιο παρουσιάζει σκληρότητα $HV5_{Al} = 47,30 \text{ kg/mm}^3$ και τα υπόλοιπα σύνθετα υλικά έχουν τιμές σκληρότητας $HV5_{Al-5\%Cu} = 48,45 \pm 2,94 \text{ kg/mm}^3$, $HV5_{Al-10\%Cu} = 52,885 \pm 0,945 \text{ kg/mm}^3$ και $HV5_{Al-15\%Cu} = 98,68 \pm 6,99 \text{ kg/mm}^3$. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη καθώς ο χαλκός έχει μεγαλύτερη σκληρότητα από το αλουμίνιο, έτσι ο συνδυασμός τους σε σύνθετο υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα από το καθαρό αλουμίνιο. Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτη που βρέθηκε στη βιβλιογραφία (*Madhusudan 2016*), το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται.
- Η μέτρηση της πυκνότητας των χυτών δοκιμίων επιβεβαιώνει τα μεγάλα ποσοστά πορώδους που υπάρχουν εντός των δοκιμίων, καθώς δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση της πυκνότητας που θα έπρεπε θεωρητικά να υπάρχει με τη προσθήκη χαλκού, αλλά κυμαίνεται σε χαμηλό επίπεδο. Η ύπαρξη πορώδους, δηλαδή η ύπαρξη αέρα εντός των δοκιμίων αντισταθμίζει την αύξηση της πυκνότητας που θα έπρεπε να επιφέρει η προσθήκη χαλκού και έτσι η τιμή μένει σχεδόν στα ίδια επίπεδα. Συγκεκριμένα, οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι $d_{Al} = 2,683 \pm 0,003 \text{ g/cm}^3$, $d_{Al-5\%Cu} = 2,615 \pm 0,041 \text{ g/cm}^3$, $d_{Al-10\%Cu} = 2,649 \pm 0,042 \text{ g/cm}^3$ και $d_{Al-15\%Cu} = 2,784 \pm 0,062 \text{ g/cm}^3$. Τα ποσοστά πορώδους που υπολογίστηκαν είναι αρκετά μεγάλα και συγκεκριμένα $V_{V-Al} = 0,601\%$, $V_{V-Al+5\%Cu} = 13,196\%$, $V_{V-Al+10\%Cu} = 20,331\%$ και $V_{V-Al+15\%Cu} = 23,469\%$. Το πορώδες έχει προκύψει από την μη αποτελεσματική ανάδευση του τήγματος κατά τη διάρκεια της χύτευσης αλλά και από τη φύση της ανάμειξης των δύο συγκεκριμένων υλικών σε διάφορες αναλογίες.

➤ Η ανάλυση *SEM – EDS* αποκάλυψε τα πραγματικά ποσοστά και τις περιεκτικότητες των δύο υλικών των χυτών δοκιμίων, καθώς και των διάφορων προσμίξεων που περιέχονται σε αυτά. Όπως διαπιστώθηκε και στις υπόλοιπες δοκιμασίες, το ποσοστό χαλκού που υπάρχει εντός των δοκιμίων είναι πολύ μικρό (0% για τα δοκίμια Al + 5%Cu κ.β, 0,55% για τα δοκίμια Al + 10%Cu κ.β., και 0,9% για τα δοκίμια Al + 15%Cu κ.β.). Επιπλέον, εντοπίστηκε σημαντικό ποσοστό άνθρακα, το οποίο οφείλεται στα έλαια της πυριτικής άμμου που χρησιμοποιήθηκε κατά τη χύτευση. Ένας από τους λόγους που τα ποσοστά χαλκού παρουσιάζονται τόσο μικρά είναι η έντονη ύπαρξη άνθρακα. Παρόλα αυτά, ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο δεν επιτεύχθηκε η μεγαλύτερη ποσότητα του χαλκού είναι το γεγονός ότι τα σωματίδια χαλκού κατά τη διάρκεια της χύτευσης δημιούργησαν συσσωματώματα, τα οποία προκάλεσαν καθίζηση του χαλκού στο χωνευτήρι (μποτά) και δεν ομογενοποιήθηκαν με το υπόλοιπο τήγμα αλουμινίου. Κατά τη διάρκεια της χύτευσης ορισμένων δοκιμίων με 15%κ.β. αλουμινίου, παρατηρήθηκαν ιζήματα χαλκού που δεν αναμίχθηκαν με το τήγμα και παρέμειναν στο χωνευτήρι (τα συγκεκριμένα δοκίμια δε χρησιμοποιήθηκαν στις μηχανικές δοκιμασίες). Η κύρια οπτική παρατήρηση της μελέτης αυτής ήταν οι νιφάδες χαλκού, ενσωματωμένες στη μήτρα του αλουμινίου, οι οποίες εμφανίζονται πιο έντονες όσο το ποσοστό προσθήκης ενίσχυσης χαλκού αυξάνεται.

Συμπερασματικά, η δημιουργία σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας αλουμινίου με προσθήκη ενίσχυσης νιφάδων χαλκού, διαπιστώνεται ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο χύτευσης σε άμμο. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, ο εργαστηριακός εξοπλισμός (τόσο της χύτευσης όσο και των μηχανικών δοκιμασιών) διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, την επιτυχημένη κατασκευή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας, και την παραγωγή σωστών και ποιοτικών μετρήσεων και αποτελεσμάτων. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συνεισφέρουν, όπως η σωστή κατασκευή καλουπιών, η επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας τήξης του μετάλλου για σωστή ρευστότητα, η επαρκής ανάδευση του υλικού ενίσχυσης εντός του υλικού μήτρας και η προσεκτική έγχυση στα καλούπια. Η χύτευση είναι μια βιομηχανική διαδικασία που απαιτεί προσοχή, μέριμνα και τα κατάλληλα μέτρα προστασίας όπως κατάλληλο ρουχισμό, πυρίμαχα γάντια, γυαλιά και κατάλληλο αερισμό του χώρου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχοληθήκαμε με τη δημιουργία σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας στην οποία επιχειρήθηκε να γίνει ενσωμάτωση νιφάδων χαλκού και τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων, ένα θέμα που τα τελευταία χρόνια απασχολεί ιδιαίτερα τους μελετητές, επιστήμονες και μηχανικούς, αλλά και τη βιομηχανία. Η προσπάθεια βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, μείωσης του βάρους μιας κατασκευής, αλλά και ελάττωσης των οικονομικών εξόδων παραγωγής, έχει δημιουργήσει την ανάγκη για την παραγωγή νέων καινοτόμων συνδυασμών υλικών και κραμάτων. Οι ανάγκες της σύγχρονης εποχής για καλύτερα και αποδοτικότερα προϊόντα έχουν αυξηθεί ραγδαία με αποτέλεσμα η μελέτη των υλικών να αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ερευνητικό πεδίο.

Για μελλοντικές μελέτες, προτείνεται η επανάληψη της διαδικασίας της χύτευσης, με τα ίδια ποσοστά αλουμινίου/χαλκού αλλά και με διαφορετικά ποσοστά, μεγαλύτερα ή μικρότερα, με καλύτερη ανάδευση του τήγματος κατά τη χύτευση (κυρίως με μικρότερα ποσοστά).

Βιβλιογραφία

- Askeland Donald R., Wright Wendelin J., (2017), *Υλικά, Δομή, Ιδιότητες & Τεχνολογικές Εφαρμογές*, Εκδ. ΤΣΙΟΛΑ, 7^η Έκδοση
- ASTM D792, *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. <https://www.astm.org/d0792-20.html>
- ASTM E8/E8M-13, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. https://www.astm.org/e0008_e0008m-13.html
- Balasubramanian K., Rjeswari N., 2018, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lay-up-process>
- Callister, W.D. (2007). *Material Science and Engineering – An Introduction*. 7th ed, John Wiley & Sons, Inc. Διαθέσιμο στο: <https://catatanabimanyu.files.wordpress.com/2011/09/callister-7th-edition.pdf>
- Degarmo, E. Paul, Black, J T., Kohser Ronald A., 2003, *Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.)*, Wiley, ISBN 0-471-65653-4
- EM4C (Engineering Materials For Construction), *Σύνθετα Υλικά*, 2021, Ανακτήθηκε από <https://em4c.gr/syntheta-ylika/>
- Engineering Materials For Construction – EM4C, Σύνθετα Υλικά*, Ανακτήθηκε από: <https://em4c.gr/syntheta-ylika/> στις 3 Οκτωβρίου 2023
- Kalpajian Serope, Schmid Steven, 2006, *Manufacturing Engineering and Technology (5th ed.)*, Pearson, ISBN 0-13-148965-8.
- Kumar Velugula Mani, Devi Chinta Neelima, 2014, *Evaluation of mechanical characteristics for Aluminum-copper Metal matrix composite*, ISSN 2278 – 9472
- Lee L.S., 2011, *Service Life Estimation an Extension of Civil Engineering Structures*, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lay-up-process>
- Lowe, Anthony; Ridgway, Keith; Atkinson, Helen, 1999, *Thixoforming*, Materials World, 7
- Madhusudan Siddabathula, Sarcar B. Mohammed Moulana Mohiuddin, Rao Narsipalli Bhargava Rama Mohan, 2016, *Mechanical properties of Aluminum-Copper (p) composite metallic materials*, 293–299
- Midson Stephen P., Kilbert Robert K, Le Beau Stephen E., Decker Raymond, 2004, *Guidelines for Producing Magnesium Thixomolded Semi-Solid Components used in Structural Applications*, Proc. 8th Inter. Conf. Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Limasol, Cyprus
- Midson Stephen P., 2004, *Semi-Solid Casting of Aluminum Alloys: An Update*, Die Casting Engineer
- Olsen, D., 2020, *History Of Metal Casting*, Article in MetalTek International.

Raghu Raja Kuppusamy, Kaushik Kumar, *Modern Manufacturing Processes*, 2020, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lay-up-process>

Rams, J. & Torres, B., 2022, *Casting Aluminum Alloys*. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 1, 123-131. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00087-9>

Rao, T. V. ,2003, *Metal Casting: Principles and Practice*, New Age International, [ISBN 978-81-224-0843-0](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/lay-up-process).

Rosato, D.V., Rosato, D.V. & Rosato, M.V. (2004). *Plastic product material and process selection handbook*. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier. Pages 394-405. <https://doi.org/10.1016/B978-185617431-2/50014-1>

RTI LABORATORIES, 2023, *SEM/EDS Analysis*, Ανακτήθηκε από <https://rtilab.com/techniques/sem-eds-analysis/> στις 15 Σεπτεμβρίου 2023

The Designers & Buyers Guide, 2016, *Sand Casting*, Ανακτήθηκε από <https://www.manufacturingnetwork.com/knowledgebase/view/30> στις 18 Αυγούστου 2023

The Open University, 2023, *Investment casting*, Ανακτήθηκε από <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/investment-casting> στις 19 Αυγούστου 2023

Todd, Robert H.; Allen, Dell K.; Alting, Leo (1994), *Manufacturing Processes Reference Guide*, Industrial Press Inc, ISBN 0-8311-3049-0

Tylecote R. F.,1991, *The Industrial Revolution in Metals*, Institute of Metals, ISBN 0901462829, 9780901462824

Wikipedia, Αργίλιο, Ανακτήθηκε από <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CE%B3%CE%AF%CE%BB%CE%B9%CE%BF> στις 17 Αυγούστου 2023

Αβραμιώτης Σ., Αγγελόπουλος Β., Καπελώνης Γ., Σινιγάλιας Π., Σπαντίδης Δ., Τρικαλίτη Α., Φίλος Γ., 2012, *ΧΗΜΕΙΑ Β' ΓΥΜΝΑΣΙΟΥ*, Ανακτήθηκε από: http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/pdf/8547/5086/21-0108-01_Chimeia_B-Gymnasiou_Vivlio-Ekpaideutikou/ στις 5 Οκτωβρίου 2023

ATEM ΟΕ Κατασκευές Αλουμινίου–Σιδήρου/Επεξεργασία μετάλλου, Ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου και των κραμάτων του, Ανακτήθηκε από <https://www.atem-oe.gr/alouminio-plirofories/idiotites-alouminiou/idiotites-katharou-alouminiou-kramaton.html> στις 17 Σεπτεμβρίου 2023

Ατσαλάκης Αθανάσιος, 2010, *Μελέτη Χύτευσης Ακρίβειας Εν Κενώ*, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Διαθέσιμη από: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3627/atsalakisa_investm-entcasting.pdf?sequence=3

Βασιλειάδου Αγάπη 2015, *Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας: παραγωγή, μηχανικές ιδιότητες, εφαρμογές*. Μεταπτυχιακή εργασία (Masters) thesis, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας

Γεωργάτης Εμμανουήλ, Σημειώσεις για τα κράματα Αλουμινίου, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Ανακτήθηκε από http://users.uoi.gr/mgeorgat/down/2a_aluminum_alloys.pdf στις 12 Οκτωβρίου 2023.

Καραχισαρίδης Ευστάθιος, 2021, Σύνθετα Υλικά. Μέθοδοι κατεργασίας και εφαρμογές τους στην Ναυπηγική, Διπλωματική Εργασία ΠΑΔΑ, Διαθέσιμη από: https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/1168/KARACHISARIDIS_51115038.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Νέστωρας Επαμεινώνδας, 2022, Χύτευση σε άμμο σύνθετου υλικού μεταλλικής μήτρας αλουμινίου και διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων, Διπλωματική εργασία ΠΑΔΑ

Μαρόπουλος Δρ. Στέργιος, ΧΥΤΕΥΣΗ, Ανακτήθηκε από <https://docplayer.gr/45224891-Hyteysi-dr-stergios-maropoylos-kathigitis.html> στις 10 Σεπτεμβρίου 2023

Παπαγεωργίου Technical, Πως παράγεται το αλουμίνιο. Ανακτήθηκε από <https://technicalp.gr/pos-paragete-to-alouminio/> στις 12 Οκτωβρίου 2023.

Παυλογιάννης Σ., 2023, Σύνθετα και Πολυμερή, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Διαθέσιμη από: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6005/pavlogianniss_composites.pdf?sequence=1

Χαιρέτης Νικόλαος Γ., 2012, Συγκριτική μελέτη στέγης με φέροντα οργανισμό από χάλυβα και αλουμίνιο, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/7564/chairētisn_alluminium.pdf?sequence=3&isAllowed=y