



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επίδραση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα στις  
μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή αλουμινίου  
καθαρότητας 96,66%**

**ΚΟΥΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**Αθήνα, Μάρτιος 2016**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επίδραση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα στις  
μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή αλουμινίου  
καθαρότητας 96,66%**

**ΚΟΥΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**Αθήνα, Μάρτιος 2016**



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολογων Μηχανικών ΕΜΠ και με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν σε αυτή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας εργασίας, καθώς και τον Υπ. Διδάκτορα κ. Σερέτη Γεώργιο, για την καθοδήγηση και την απεριόριστη βοήθεια του.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον Υπ. Διδάκτορα κ. Παπαντωνίου Ιωάννη για την πολύτιμη συνεισφορά του κατά τη διάρκεια των μηχανικών δοκιμών, καθώς και τον Υπ. Διδάκτορα κ. Καρακίζη Παναγιώτη για την βοήθεια του στο κομμάτι της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Επίσης, ευχαριστώ θερμά το τεχνικό προσωπικό του Τομέα, τους Κερασιώτη Κωνσταντίνο και Μελισσά Νικόλαο για την σημαντικότερη συμβολή τους στην εκτέλεση των πειραματικών διαδικασιών.

Για την άψογη συνεργασία κατά την παράλληλη εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών στο εργαστήριο του Τομέα, και τη στηριξή του, ευχαριστώ, τον καλό μου φίλο και συνάδελφο, Άγγελο Κρομμύδα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της προσθήκης φολίδων ανοξειδώτου χάλυβα (Stainless Steel flakes) 316-L στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή αλουμινίου καθαρότητας 96,66%.

Η ενσωμάτωση των φολίδων χάλυβα στο αλουμίνιο έγινε με τη μέθοδο της ελεύθερης χύτευσης με ανάδευση σε θερμοκρασία καλουπιού 30° C. Η προσθήκη έγινε σε δύο περιεκτικότητες, συγκεκριμένα 0,25% κ.β. και 0,50% κ.β. ενώ παρήχθησαν και δοκίμια χωρίς προσθήκη προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύγκριση.

Αφού παρήχθη ικανός αριθμός δοκιμίων για την συγκριτική τους μελέτη, ένα δοκίμιο από κάθε υλικό (Al, Al-0,25% κ.β. St, Al-0,50% κ.β. St), χρησιμοποιήθηκε για μελέτη μεταλλογραφίας μέσω οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), αφού προηγουμένως εγκιβωτίστηκε, λειάνθηκε, στιλβώθηκε και υπέστη χημική προσβολή. Κατά το μεταλλογραφικό έλεγχο του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St παρατηρήθηκαν περιοχές συσσωρευμένων εγκλεισμάτων με έντονη κατευθυντικότητα. Επίσης, από τις σκληρομετρήσεις κατά Vickers που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι όσο αυξάνει η προσθήκη φολίδων ανοξειδώτου χάλυβα στο αλουμίνιο, αυξάνει και η σκληρότητα του υλικού.

Όσον αφορά στις μηχανικές δοκιμές, από τη δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη ποσότητας φολίδων ανοξειδώτου χάλυβα επιδεινώνει τη συμπεριφορά των δοκιμίων αφού αστοχούν σε μικρότερη επιμήκυνση και έχοντας απορροφήσει μικρότερο ποσό ενέργειας μέχρι τη θραύση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St κατά την δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων (3-Point Bending) καθώς απορρόφησε κατά 16% μεγαλύτερο ποσό ενέργειας και άντεξε περίπου 20% μεγαλύτερο φορτίο από το δοκίμιο του αλουμινίου αναφοράς. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε 0,50% κ.β. St είχε αντίθετα αποτελέσματα, με το δοκίμιο να απορροφά 29% λιγότερη ενέργεια.

Συμπερασματικά, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η προσθήκη φολίδων ανοξειδώτου χάλυβα μπορεί να βελτιώσει κάποιες ιδιότητες του αλουμινίου, γεγονός όμως που δεν είναι ανάλογο με το ποσοστό της προσθήκης.

## **ABSTRACT**

The purpose of the present study is to investigate the effects of stainless steel flakes (stainless steel 316-L) addition on a highly pure (96,66% w.t. Al) aluminum alloy.

The integration of stainless steel flakes in aluminium was performed using stir casting process. The mold temperature was 30°C. Two percentage additions of stainless steel flakes were examined (0,25% w.t. and 0,50% w.t). Pure aluminium specimens were also produced for comparison.

One specimen of each material (Al, Al-0,25%w.t.St, Al-0,50%w.t.St) was used for metallographical investigation, using both optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Before microscopic examination, all specimens had been encased in resin, grinded, polished and etched using Keller's reagent. Regarding Al-0,50%w.t.St specimen accumulated inclusion regions with high directivity were observed. Vickers hardness test showed that surface hardness increases by increasing stainless steel flakes percentage addition.

Tensile test results indicated that the addition of stainless steel flakes decreases the alloy tensile strength, considering the fact that the specimens that contain steel flakes extent less until breaking and they absorbed less energy. Regarding three point bending performance of the specimens, Al-0,25%w.t.St specimen absorbed 16% more energy and reached 20% higher flexure load, compared to the pure aluminum specimen. Increase of stainless steel flakes percentage addition seems to weaken the flexure ability of the material, since the specimens of this percentage absorbed 29% less energy.

The general remark raised from this thesis is that 0.25% w.t. stainless steel flakes addition improves the performance of pure aluminum. However, further increase of the steel flakes percentage leads to a weaken performance of the composite material.

# Πίνακας Περιεχομένων

Εικόνες - Σχήματα .....	1
Πίνακες .....	6
Εισαγωγή.....	7
<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b> .....	12
<b>1 Αλουμίνιο</b> .....	12
1.1 Παραγωγή Αλουμινίου .....	12
1.1.1 Στάδια πρωτογενούς παραγωγής Αλουμινίου.....	12
1.1.1.1 Βωξίτης .....	13
1.1.1.2 Η μέθοδος Bayer.....	15
1.1.1.3 Η μέθοδος Hall-Heroult.....	17
1.1.2 Δευτερογενής παραγωγή Αλουμινίου.....	19
1.2 Ιδιότητες Αλουμινίου.....	20
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup></b> .....	24
<b>2 Κράματα Αλουμινίου</b> .....	24
2.1 Γενικά για τα κράματα αλουμινίου.....	24
2.2 Κύρια κραματικά στοιχεία αλουμινίου.....	25
2.3 Κατηγορίες και ονοματολογία κραμάτων αλουμινίου.....	29
2.3.1 Κράματα Διαμόρφωσης (wrought alloys) .....	30
2.3.2 Κράματα Χύτευσης (cast alloys) .....	41
2.4 Βασικές Κατεργασίες Αλουμινίου (κωδικοποίηση) .....	48
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup></b> .....	51
<b>3 Χάλυβας</b> .....	51
3.1 Ο χάλυβας 316-L .....	52
3.2 Παραγωγή σκόνης χάλυβα.....	55

3.2.1	Water atomization .....	55
3.2.2	Gas atomization.....	57
3.3	Επεξεργασία της σκόνης χάλυβα.....	60
3.4	Ιδιότητες σκόνης χάλυβα .....	62

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

	<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup></b> .....	68
<b>4</b>	<b>Πειραματικό μέρος</b> .....	68
4.1	Χύτευση .....	68
4.1.1	Εξοπλισμός χύτευσης.....	68
4.1.2	Μέτρα προστασίας.....	70
4.1.3	Διαδικασία χύτευσης.....	71
4.1.4	Παραχθέντα δοκίμια .....	74
4.2	Μελέτη μεταλλογραφίας.....	75
4.2.1	Λείανση των δοκιμίων .....	75
4.2.2	Χημική προσβολή της επιφάνειας των δοκιμίων .....	76
4.2.3	Μεταλλογραφικός έλεγχος.....	77
	4.2.3.1 Δοκίμιο Al (96,66%).....	77
	4.2.3.2 Δοκίμιο περιεκτικότητας 0,25% κ.β. St.....	83
	4.2.3.3 Δοκίμιο περιεκτικότητας 0,50% κ.β. St.....	91
4.3	Σκληρομέτρηση .....	95
4.4	Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό (Tensile strength test) .....	97
4.5	Δοκιμές αντοχής σε κάμψη τριών σημείων (3-Point bending).....	101
	<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup></b> .....	104
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b> .....	104
	<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup></b> .....	106
<b>6</b>	<b>Προτάσεις για μελλοντική έρευνα</b> .....	104
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	107





## Εικόνες – Σχήματα

Εικόνα 1.1	Περιοδικός Πίνακας .....	7
Εικόνα 1.2	Η διάταξη ηλεκτρόλυσης Hall-Heroult και οι εφευρέτες της .....	9
Εικόνα 1.3	Ακατέργαστος Βωξίτης .....	14
Εικόνα 1.4	Βωξίτης στη Βιομηχανία .....	14
Εικόνα 1.5	Άνυδρη Αλουμίνα μετά την παραγωγή της.....	17
Εικόνα 1.6	Το τελικό προϊόν της παραγωγής του αλουμινίου .....	19
Εικόνα 1.7	Σταθμός παραγωγής Δευτερόχυτου αλουμινίου διπλού θαλάμου .....	20
Εικόνα 2.1	Φύλλα αλουμινίου (α) και καλώδιο αλουμινίου (β).....	32
Εικόνα 2.2	Εφαρμογή στην αεροδιαστημική (α) και βίδες από κράμα αλουμινίου (β)	33
Εικόνα 2.3	Εναλλάκτες θερμότητας (α) και σωληνώσεις από κράμα αλουμινίου 3xxx (β).....	34
Εικόνα 2.4	Εξέλικτρο αλειείας (α) και σύρματα συγκολλήσεως (β) .....	35
Εικόνα 2.5	Αμάξωμα από κράμα αλουμινίου (α), δεξαμενή καυσίμου οχήματος (β) και εφαρμογή στη ναυπηγική (γ) .....	37
Εικόνα 2.6	Χρήση κραμάτων 5xxx και 6xxx σε αμάξωμα αυτοκινήτου (α), εφαρμογή κράματος της σειράς σε τμήματα τρένου (β), εφαρμογή στην αρχιτεκτονική (γ).....	38



Εικόνα 2.7 Εφαρμογή κράματος σε τμήματα αεροσκάφους (α) και σκελετός ποδηλάτου από κράμα σειράς 7xxx (β) .....	39
Εικόνα 2.8 Ηλεκτρική εφαρμογή (α) και έδρανα αλουμινίου (β) .....	40
Εικόνα 2.9 Συμπλέκτης αλουμινίου χυτευμένου σε άμμο .....	43
Εικόνα 2.10 Χυτό παραχθέν με χύτευση αλουμινίου υπό πίεση.....	43
Εικόνα 2.11 Εξαρτήματα κινητήρα από αλουμίνιο παραχθέντα με χύτευση σε μόνιμο τύπο.....	43
Εικόνα 3.1 Μικροσκοπική απεικόνιση φολίδων ανοξειδωτου χάλυβα (α) φακός x5, (β) φακός x5,(γ) φακός x10 και (δ) φακός x20.....	55
Εικόνα 3.2 Μικροσκοπική απεικόνιση σκόνης χάλυβα παραχθείσας με water atomization (α,β).....	57
Εικόνα 3.3 Μικροσκοπική απεικόνιση σκόνης χάλυβα παραχθείσας με gas atomization.....	60
Εικόνα 4.1 Εξοπλισμός χύτευσης.....	69
Εικόνα 4.2 Μέτρα προστασίας χύτευσης .....	71
Εικόνα 4.3 Στάδια της χύτευσης.....	73
Εικόνα 4.4 (α) Δοκίμιο εγκιβωτισμένο σε ρητίνη, (β) αυτόματος λειαντής.....	76
Εικόνα 4.5 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM , φακός x100).....	78
Εικόνα 4.6 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).....	80
Εικόνα 4.7 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).....	80

Εικόνα 4.8 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM , φακός x100).....	81
Εικόνα 4.9 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM , φακός x500).....	81
Εικόνα 4.10 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM , φακός x1000).....	82
Εικόνα 4.11 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM , φακός x3000).....	82
Εικόνα 4.12 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20) .....	83
Εικόνα 4.13 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x500).....	84
Εικόνα 4.14 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20) .....	86
Εικόνα 4.15 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50) .....	86
Εικόνα 4.16 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50) .....	87
Εικόνα 4.17 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100) .....	87
Εικόνα 4.18 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100) .....	88
Εικόνα 4.19 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100) .....	88
Εικόνα 4.20 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x100).....	89



Εικόνα 4.21 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x500).....	89
Εικόνα 4.22 Πόρος στη μικροδομή του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St. Άποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x1000) .....	90
Εικόνα 4.23 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x3000).....	90
Εικόνα 4.24 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20) .....	91
Εικόνα 4.25 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100) .....	92
Εικόνα 4.26 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20) .....	93
Εικόνα 4.27 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50) .....	93
Εικόνα 4.28 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100) .....	94
Εικόνα 4.29 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100) .....	94
Σχήμα 1.1 Διάγραμμα ροής της βιομηχανικής παραγωγής προϊόντων αλουμινίου .....	13
Σχήμα 1.2 Η μέθοδος Bayer διαγραμματικά .....	17
Σχήμα 2.1 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Χαλκού.....	25
Σχήμα 2.2 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Πυριτίου .....	26
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγνησίου .....	27
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγγανίου .....	27
Σχήμα 2.5 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Ψευδαργύρου .....	28



Σχήμα 3.1	Διάγραμμα (Schaffler) κατάταξης ανοξειδωτων χάλυβων.....	52
Σχήμα 3.2	Οι ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες.....	53
Σχήμα 3.3	Διάταξη μεθόδου water atomization .....	56
Σχήμα 3.4	Διάταξη μεθόδου gas atomization .....	58
Σχήμα 3.5	Όψη σε τομή κεφαλών gas atomization .....	58
Σχήμα 3.6	Διάγραμμα επίδρασης τριών λιπαντικών στην πυκνότητα και στην green strength της σκόνης χάλυβα.....	62
Σχήμα 4.1	Ποσοστιαία απεικόνιση του εμβαδού της δενδριτικής και διαδενδριτικής περιοχής του δοκιμίου Al.....	79
Σχήμα 4.2	Ποσοστιαία απεικόνιση του εμβαδού της δενδριτικής και διαδενδριτικής περιοχής του δοκιμίου Al-0,25%St.....	85
Σχήμα 4.3	Ποσοστιαία απεικόνιση του εμβαδού της δενδριτικής και διαδενδριτικής περιοχής του δοκιμίου Al-0,50%St.....	92
Σχήμα 4.4	Διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής της σκληρότητας του κράματος.....	96
Σχήμα 4.5	Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης για κάθε δοκίμιο .....	97
Σχήμα 4.6	Γράφημα σύγκρισης των ενεργειών θραύσης των δοκιμίων.....	98
Σχήμα 4.7	Διάγραμμα απεικόνισης του φορτίου θραύσης κάθε δοκιμίου .....	99
Σχήμα 4.8	Διάγραμμα της επιμήκυνσης θραύσης κάθε δοκιμίου .....	100
Σχήμα 4.9	Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης για κάθε δοκίμιο .....	101
Σχήμα 4.10	Γράφημα σύγκρισης των απορροφούμενων ενεργειών των δοκιμίων.....	102
Σχήμα 4.11	Διάγραμμα απεικόνισης μέγιστου φορτίου κάμψης κάθε δοκιμίου.....	102
Σχήμα 4.12	Διάγραμμα μεταβολής της flexure extension .....	103



## Πίνακες

Πίνακας 1.1 Οι βασικές ιδιότητες του αλουμινίου .....	21
Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτική παράθεση των κύριων προσθηκών των κραμάτων αλουμινίου .....	29
Πίνακας 2.2 Κωδικοποίηση των κραμάτων διαμόρφωσης.....	31
Πίνακας 2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας των χρήσεων των κραμάτων αλουμινίου... ..	41
Πίνακας 2.4 Οι τυποποιημένες σειρές κραμάτων χύτευσης αλουμινίου.....	44
Πίνακας 3.1 Κραματικά στοιχεία του χάλυβα 316-L... ..	54
Πίνακας 3.2 Κύριες ιδιότητες του χάλυβα 316-L.....	54
Πίνακας 4.1 Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των φολίδων χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν... ..	74
Πίνακας 4.2 Χημική σύσταση του αντιδραστηρίου Keller's... ..	76
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα φασματογράφου για τη σύσταση του χρησιμοποιηθέντος κράματος αλουμινίου.....	78
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα της σκληρομέτρησης για το δοκίμιο Al... ..	95
Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα της σκληρομέτρησης για το δοκίμιο Al-0,25% κ.β. St... ..	95
Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα της σκληρομέτρησης για το δοκίμιο Al-0,50% κ.β. St... ..	96
Πίνακας 4.7 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού .....	100
Πίνακας 4.8 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων της δοκιμής κάμψης.....	103

# Εισαγωγή

## Το Αλουμίνιο

Το αργίλιο ή αλουμίνιο (Aluminium) είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μεταλλικό στοιχείο που ανήκει στην ομάδα IIIA (13) του περιοδικού συστήματος. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού [1]. Ωστόσο, είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βωξίτης.

Για στοιχεία χωρίς σταθερά ισότοπα, ο μαζικός αριθμός του ισότοπου με τη μεγαλύτερη περίοδο ημιζωής είναι σε παρένθεση.

*Εικόνα 1.1 Περιοδικός Πίνακας των Χημικών Στοιχείων*



Το καθαρό αλουμίνιο, είναι μέταλλο ελαφρύ (πυκνότητα  $2,7\text{g/cm}^3$ ), πολύ όλκιμο και έχει χαμηλό σημείο τήξης ( $658\text{ }^\circ\text{C}$ ). Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί, κατά την διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η σημασία του για την βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη, καθώς το ίδιο το αλουμίνιο καθώς και τα κράματά του παρουσιάζουν υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή σε σχέση με άλλα μέταλλα και κράματα. Το καθαρό αλουμίνιο έχει μεγάλη αντίσταση στην διάβρωση, που οφείλεται στον αυθόρμητο σχηματισμό ενός λεπτού προστατευτικού στρώματος  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (οξειδίου του αλουμινίου) στην επιφάνειά του φαινόμενο που είναι γνωστό ως φαινόμενο της παθητικοποίησης [2].

### **Ιστορική Αναδρομή**

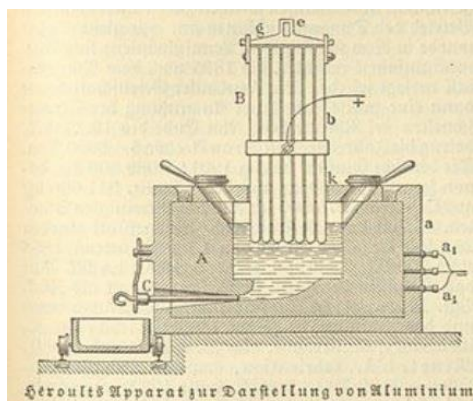
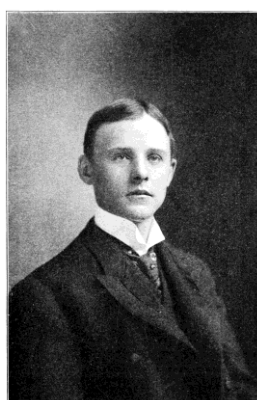
Ο πρώτος επιστήμονας που κατόρθωσε να παράγει καθαρό αλουμίνιο ήταν ο Hans Christian Oersted το 1825, χρησιμοποιώντας το χλωρίδιο του αλουμινίου ( $\text{AlCl}_3$ ) και αμάλαμα ποτάσας (ανθρακικό ή καυστικό κάλιο), δηλαδή ένα κράμα ποτάσας και ψευδαργύρου [3]. Σήμερα το αλουμίνιο παράγεται και χρησιμοποιείται ευρύτατα αν και βρίσκεται σε βιομηχανική κλίμακα παραγωγής για περίπου 100 χρόνια μόνο.

Επιγραμματικά παρουσιάζονται παρακάτω οι κυριότεροι σταθμοί στην ιστορία του αλουμινίου και της παραγωγής του.

- 1808: Ο Βρετανός Davy ανακαλύπτει την ύπαρξη του νέου μετάλλου.
- 1821: Ο P.Berthier ανακαλύπτει κοντά στο χωριό Les Baux στη Γαλλία μια σκληρή και κοκκινωπή ουσία που περιέχει περίπου 52% αλουμίνιο και την ονομάζει βωξίτη.
- 1825: Ο Δανός Hans Christian Oersted παράγει μια μικρή ποσότητα αλουμινίου χρησιμοποιώντας διάλυμα ποτάσας.
- 1827: Ο Γερμανός Friedrich Wohler ανακοινώνει την ανακάλυψή του για την παραγωγή αλουμινίου μέσω της αντίδρασης ποτάσας με άνυδρο χλωρίδιο του αλουμινίου.



- 1845: Ο Wohler ανακαλύπτει και καταγράφει την πυκνότητα του αλουμινίου και συνεπώς μια από τις βασικές του ιδιότητες, την ελαφρότητα.
- 1854: Ο Henri Saite-Claire Deville βελτιώνει την μέθοδο του Wohler και παράγει βιομηχανικά αλουμίνιο για πρώτη φορά στην ιστορία. Η τιμή του μετάλλου ξεπερνά αυτή του χρυσού και της πλατίνας.
- 1855: Μια ράβδος αλουμινίου εκτίθεται στην Διεθνή Έκθεση των Παρισίων μαζί με άλλα πολύτιμα μέταλλα.
- 1886: Δύο νέοι και άγνωστοι μέχρι τότε επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Toussaint Heroult και ο Αμερικανός Charles Martin Hall (Εικ. 1.2), εφευρίσκουν την μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος αλουμίνας. Οι δύο επιστήμονες εργάστηκαν ξεχωριστά, χωρίς να ξέρουν ο ένας την εργασία του άλλου.



Εικόνα 1.2 Η διάταξη ηλεκτρόλυσης «Hall-Héroult» (μέση) και οι εφευρέτες της Charles Martin Hall (αριστερά) και Paul Héroult (δεξιά)

- 1888: Οι πρώτες εταιρίες παραγωγής αλουμινίου γεννήθηκαν στη Γαλλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ.
- 1889: Ο Αυστριακός Friedrich Bayer, γιός του ιδρυτή της περίφημης εταιρίας χημικών ουσιών, εφευρίσκει τη μέθοδο παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων αλουμίνας από βωξίτη.



• 1900: Η ετήσια παραγωγή του αλουμινίου ανέρχεται σε υψηλές ποσότητες, φτάνοντας τους 8 τόνους σε ετήσια βάση.

Οι πρώτες χρήσεις του αλουμινίου σε βιομηχανικές εφαρμογές ξεκίνησαν τις ακόλουθες χρονιές :

• 1908: όταν πραγματοποιήθηκε η παραγωγή καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης.

• 1910: με την παραγωγή καλωδίων για χρήση σε υπόγειες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες ήταν μονωμένες με μολύβι και χαρτί και χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Βοστώνη.

• 1912: με την παραγωγή κουπαστών εσωτερικών χώρων από αλουμίνιο στο επιβατικό πλοίο AQUITANA.

• 1917: με την παραγωγή καλωδίου για μετασχηματιστές ηλεκτρικής ενέργειας και το

• 1920: με την παραγωγή μηχανικών μερών για μηχανές.[28]



## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



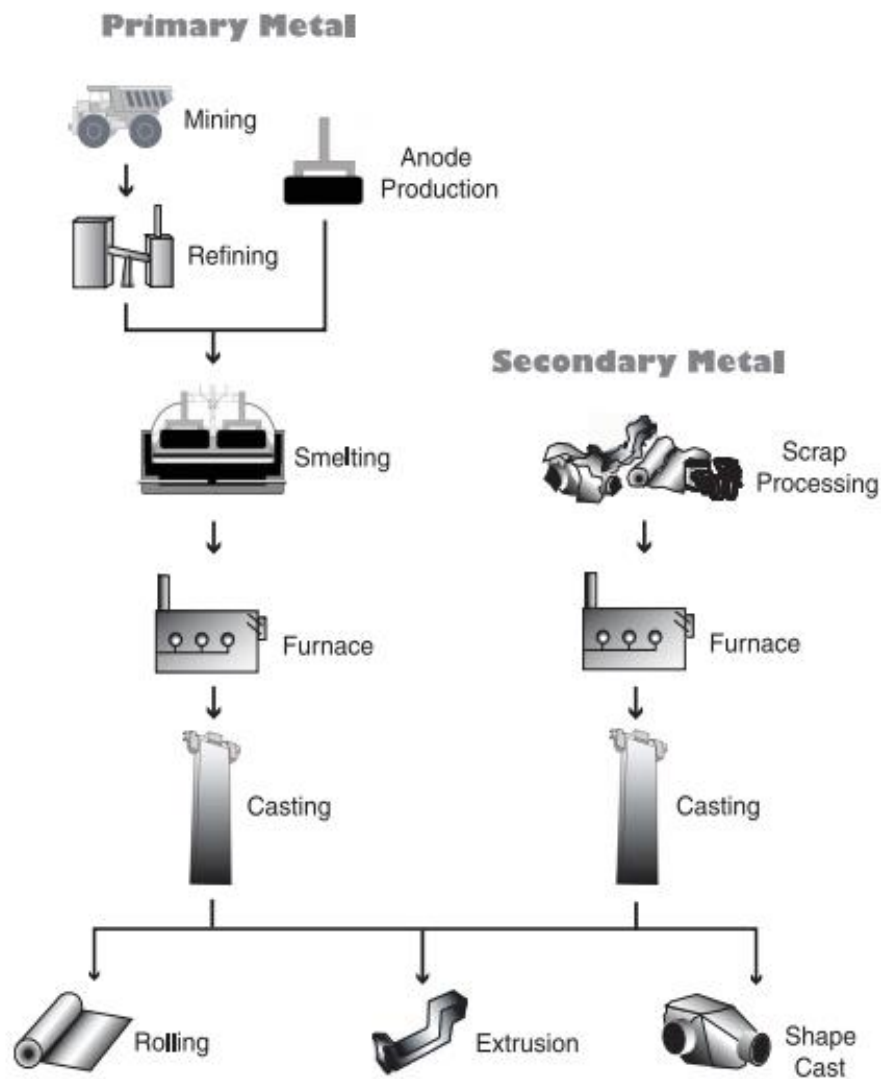
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## **1.1 Παραγωγή Αλουμινίου**

Το αλουμίνιο ως μέταλλο μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε πρωτογενές και δευτερογενές ανάλογα με τον τρόπο που παράγεται. Ως πρωτογενές ορίζεται το αλουμίνιο που παράγεται από ορυκτό μετάλλευμα (βωξίτη) και ως δευτερογενές εκείνο που αποκτάται από άχρηστα πλέον υλικά αλουμινίου (scrap). Η πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου έγκειται στην εξόρυξη του βωξίτη, τη διύλιση του για την παραγωγή αλουμίνας και την τήξη της αλουμίνας για την παραγωγή αλουμινίου. Η δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου αφορά την διαλογή, τήξη και διόρθωση χρησιμοποιημένων προϊόντων αλουμινίου. Το αλουμίνιο, μετατρέπεται με παραιτέρω κατεργασία χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους όπως έλαση, διέλαση, σφρηλάτηση, μορφοποίηση και χύτεση σε χιλιάδες προϊόντα.[4]

### **1.1.1 Στάδια πρωτογενούς παραγωγής αλουμινίου**

Η πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια : την εξόρυξη της πρώτης ύλης δηλαδή του βωξίτη, τη διύλιση της αλουμίνας ( $Al_2O_3$ ) και τέλος την τήξη του αλουμινίου. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει παρουσίαση της διαδικασίας αυτής.



*Σχήμα 1.1 Διάγραμμα ροής της βιομηχανικής παραγωγής προϊόντων αλουμινίου.[4]*

### **1.1.1.1 Βωξίτης**

Το αλουμίνιο δεν βρίσκεται ποτέ στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο λόγω της έλξης του με το οξυγόνο αλλά σε μορφή οξειδίων και ενώσεων του πυριτίου. Τα πυρίτια του αλουμινίου δε χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του καθώς είναι ενωμένα και με άλλα στοιχεία όπως το νάτριο, το κάλιο, ο σίδηρος, το ασβέστιο και το μαγνήσιο και ο χημικός διαχωρισμός που απαιτείται είναι δύσκολη και ακριβή διαδικασία.[4]

Η πιο διαδεδομένη πρώτη ύλη για την παραγωγή αλουμινίου είναι ο βωξίτης αφού περιέχει 40-60% αλουμίνα η οποία είναι ένα οξείδιο του αλουμινίου ( $Al_2O_3$ ) το οποίο με κατάλληλη κατεργασία οδηγεί στο αλουμίνιο. Βέβαια στο βωξίτη περιέχονται, σε μικρές ποσότητες, και άλλες ενώσεις του πυριτίου του σιδήρου και του τιτανίου καθώς και ίχνη άλλων προσμίξεων.[1] Η αναλογία βωξίτη – παραγόμενου αλουμινίου σε kg είναι 6 προς 1.[4]

Ο βωξίτης δεν είναι ορυκτό αλλά πέτρωμα, δηλαδή συνδυασμός ορυκτών και σχηματίζεται από την αποσάθρωση αργιλοπυριτικών πετρωμάτων (κυρίως μαγματογενούς προελεύσεως), θεωρούμενος έτσι ιζηματογενές πέτρωμα. Ανακαλύφθηκε το 1821 από το Γάλλο γεωλόγο Pierre Berthier στην πόλη Μπώ (Les Baux-de-Provence) της νότιας Γαλλίας (Προβηγκία), από την οποία πήρε το όνομά του. Τα κοιτάσματα βωξίτη είναι συνήθως επιφανειακά οπότε η εξορυγή του γίνεται απευθείας από λατομεία με τη μέθοδο των ανοικτών ορυγμάτων. Χώρες με μεγάλα κοιτάσματα βωξίτη είναι η Αυστραλία, η Γουινέα, η Τζαμάικα και χώρες της πρώην ΕΣΣΔ [1].

Η πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου απαιτεί δύο περαιτέρω διεργασίες για την μετατροπή του βωξίτη σε αλουμίνιο οι οποίες περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 1.3 Ακατέργαστος βωξίτης.



Εικόνα 1.4 Βωξίτης στη βιομηχανία.



### **1.1.1.2 Η μέθοδος Bayer**

Η μέθοδος μετατροπής του βωξίτη σε αλουμίνα φέρει το όνομα του εφευρέτη της του Αυστριακού χημικού Karl Josef Bayer (1847–1904). Έλαβε χώρα το 1888 και βοήθησε καταλυτικά στην παραγωγή αλουμίνας σε μεγάλες ποσότητες καθιστώντας το αλουμίνιο πολύ προσιτό μέταλλο. Η μέθοδος περιλαμβάνει τα παρακάτω επιμέρους στάδια.

- **Θραύση και λειοτρίβηση του βωξίτη.** Στο στάδιο αυτό αρχικά γίνεται θραύση του βωξίτη σε τεμάχια διαστάσεων της τάξης των 35mm ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία της εκχύλισης. Έπειτα γίνεται η λειοτρίβηση για να μειωθούν κι άλλο οι διαστάσεις των τεμαχίων (περίπου στα 63 μm). Αρχικά καυστικό νάτριο (NaOH) και μείγμα αλουμινίου αναμιγνύονται με βωξίτη και με τη βοήθεια συσκευών όπως ο ραβδόμυλος, ο σφαιρόμυλος και ο υδροκυκλώνας προκύπτουν τα τελικά τεμάχια που θα χρησιμοποιηθούν στο στάδιο της εκχύλισης.
- **Εκχύλιση.** Τα θρυμματισμένα, αλεσμένα και κατάλληλου μεγέθους τεμάχια βωξίτη διαλύονται υπο πίεση σε θερμό (180-250 °C) διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) και ανθρακικού νατρίου σε εναλλάκτες θερμότητας τροφοδοτούμενων με ατμό. Με αυτό τον τρόπο, οι προσμίξεις του βωξίτη (κυρίως οξείδια του σιδήρου και του πυριτίου) απομακρύνονται και παραμένει στο διάλυμα το καυστικό νάτριο με το οξύδιο του αργιλίου. Βέβαια, οι συγκεντρώσεις, θερμοκρασίες και πιέσεις που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάλογα με τις ιδιότητες του βωξίτη. Η βασική στοιχειομετρική εξίσωση της εκχύλισης είναι η παρακάτω:



και





- **Διαχωρισμός – Καταβύθιση**

Στο στάδιο αυτό γίνεται πύκνωση του μείγματος σε πυκνωτές οι οποίοι υπερχειλίζουν και στη συνέχεια εκπλύνεται με νερό που ρέει κατ'αντιρροή ώστε να απομακρυνθούν η άμμος, οξειδία (σιδήρου, τιτανίου), τα πυρίτια, και άλλες ακαθαρσίες. Με την πύκνωση επιτυγχάνεται η ανάκτηση της στερεάς αλουμίνιας.

Κατά το στάδιο της διήθυσης διαχωρίζεται το νάτριο από το αλουμίνιο όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:



Η διήθυση λαμβάνει χώρα μέσα σε ειδικά δοχεία στα οποία γίνεται ανάδευση μηχανικά ή με πεπιεσμένο αέρα. Θα μπορούσε να ειπωθεί ότι στο στάδιο της διήθυσης γίνεται το αντίστροφο από το στάδιο της εκχύλισης πράκτικά όμως κατά τη διήθυση με κατάλληλες αναλογίες, θερμοκρασία και ρυθμό ψύξης, δίνεται στην ένυδρη αλουμίνια που προκύπτει μια σειρά επιθυμητών φυσικών ιδιοτήτων.[4]

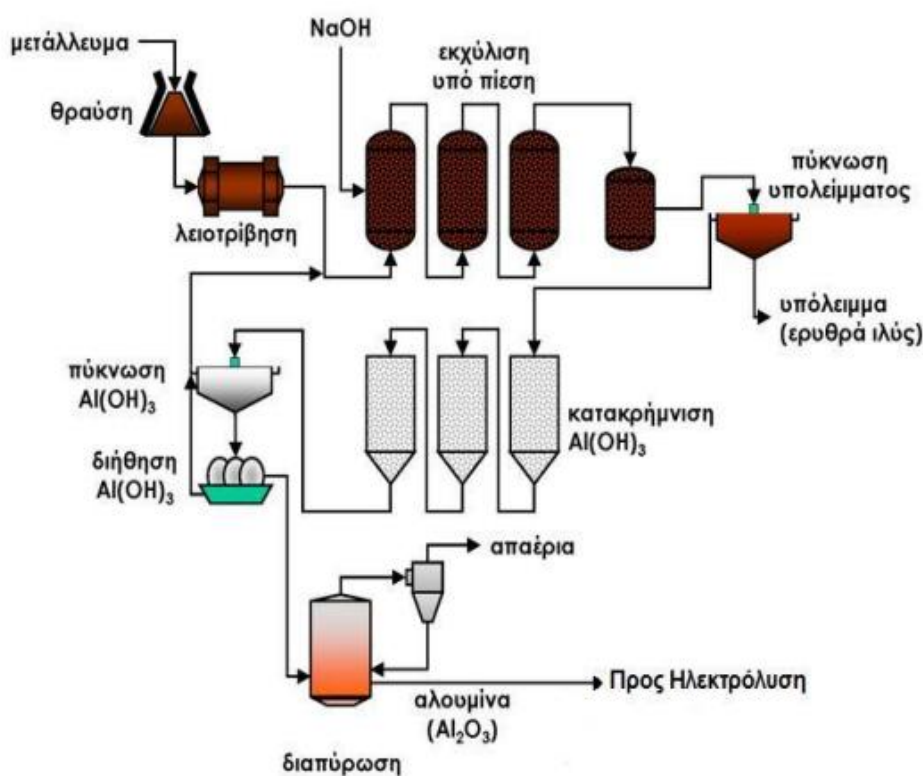
- **Πύρωση της αλουμίνιας**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η αλουμίνια που προκύπτει από τη διήθυση είναι σε ένυδρη μορφή. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται διαπύρωση σε θερμοκρασίες από 980-1300°C σε ειδικούς κλιβάνους ώστε να προκύψει η άνυδρη αλουμίνια η οποία έχει τη μορφή σκόνης (Εικ. 1.2). Οι θερμοκρασίες και οι ρυθμοί θέρμανσης ελέγχονται αυστηρά βάσει των φυσικών ιδιοτήτων της αλουμίνιας.





*Εικόνα 1.5 Ανυδρή αλουμίνα μετά την παραγωγή της.*

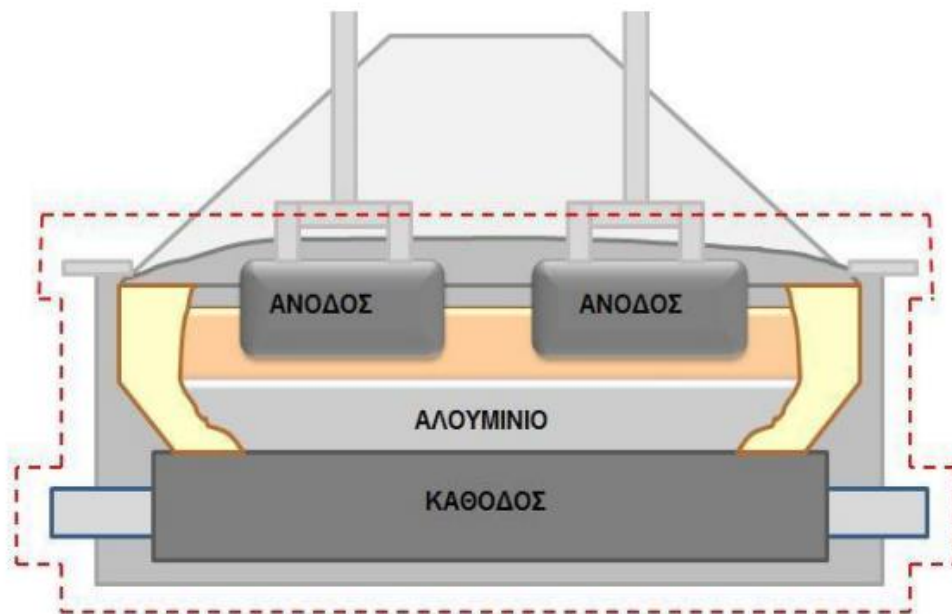
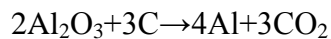


*Σχήμα 1.2 Η μέθοδος Bayer διαγραμματικά.*

### 1.1.1.3 Η μέθοδος Hall-Heroult

Η μόνη μέθοδος για την βιομηχανική παραγωγή αλουμινίου από αλουμίνα είναι η μέθοδος Hall-Heroult η οποία φέρει το όνομα των εφευρετών της Charles Hall και Paul Héroult. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Στη μέθοδο Hall-Heroult γίνεται ηλεκτρόλυση της αλουμίνας σε λουτρό κρυολίτη ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) συνοδευομένου από φθοριούχο αλουμίνιο ( $\text{AlF}_3$ ) φθοριούχο ασβέστιο ( $\text{CaF}_2$ ) και σε σπανιότερες περιπτώσεις και από άλλα πρόσθετα. Η ηλεκτρόλυση γίνεται σε ειδικά κελιά τα οποία περιέχουν μια άνοδο και μία κάθοδο με τρόπο ώστε να εφαρμόζεται ένα χαμηλής τάσης (700-900V) αλλά υψηλής έντασης (175-325 kA) ηλεκτρολυτικό λουτρό. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της υψηλής έντασης του ρεύματος τα κελιά τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο για να περιοριστούν οι δυσμενείς επιπτώσεις λόγω ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και οι απώλειες θερμότητας. Η άνοδος περιέχει άνθρακα και τοποθετείται μέσα στο λουτρό κρυολίθου ο οποίος αντιδρά με τη αλουμίνα οπότε απελευθερώνεται το αλουμίνιο και διοξείδιο του άνθρακα πράγμα που περιγράφεται με την παρακάτω χημική εξίσωση:



Σχήμα 1.3 Η διάταξη του κελιού ηλεκτρόλυσης[29].

Βέβαια, με την πάροδο του χρόνου η άνοδος καταναλώνεται λόγω αντίδρασης του άνθρακα με το οξυγόνο και χρήζει αντικατάστασης. Η κάθοδος βρίσκεται στο κάτω μέρος και είναι ουσιαστικά ο πυθμένας της λεκάνης συγκέντρωσης αν και

συχνά στη βιομηχανία ως κάθοδος καλείται όλη η δεξαμενή του αλουμινίου και του ηλεκτρολύτη. [1] Το παραγόμενο αλουμίνιο συγκεντρώνεται σε ειδική λέκάνη στο κάτω μέρος της εγκατάστασης λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας που έχει ως μέταλλο.



*Εικόνα 1.6 Το τελικό προϊόν της γραμμής παραγωγής αλουμινίου.*

### **1.1.2 Δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου**

Το αλουμίνιο αυτό είναι γνωστό και ως δευτερόχυτο αλουμίνιο επειδή η παραγωγή του γίνεται από την επανάτηξη χρησιμοποιημένων υλικών αλουμινίου (scrap), δηλαδή με ανακύκλωση.

Πιο συγκεκριμένα, το χρησιμοποιημένο αλουμίνιο εισάγεται σε φούρνους, στους οποίους αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες, διότι η θερμοκρασία πρέπει να είναι πάνω από τους 660 °C όπου το αλουμίνιο λιώνει. Μέσα στο χρησιμοποιημένο αλουμίνιο υπάρχουν προσμίξεις, όπως NaCl και KCl, οι οποίες αφαιρούνται μέσα στους φούρνους εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας. Στους φούρνους αυτούς καίγεται φυσικό αέριο κατά κύριο λόγο. [5]

Αυτός ο τρόπος παραγωγής αλουμινίου θεωρείται προτιμότερος της πρωτεγενούς παραγωγής καθώς είναι γρηγορότερος, πιο φιλικός στο περιβάλλον, και σαφώς οικονομικότερος λαμβάνοντας υπόψιν το πόσο ενεργοβόρα είναι η πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου. Το γεγονός αυτό έχει ωθήσει τις βιομηχανίες να εφαρμόζουν και τις 2 μεθόδους για την παραγωγή αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε χρόνο παράγονται 2.5 Mtn αλουμινίου με την πρωτογενή μέθοδο, ενώ 3.0 Mtn με την δευτερογενή μέθοδο. [5]



*Εικόνα 1.7 Σταθμός παραγωγής δευτερόχυτου αλουμινίου διπλού θαλάμου.*

## **1.2 Ιδιότητες αλουμινίου**

Το αλουμίνιο βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος κατασκευών πράγμα που οφείλεται σε μια σειρά ιδιοτήτων που παρουσιάζει σε συνδυασμό με το χαμηλό του βάρος και τη σχετικά χαμηλή τιμή του. Έτσι σήμερα είναι το δεύτερο πιο χρησιμοποιούμενο μέταλλο μετά το χάλυβα. Ενδεικτικά, χρησιμοποιείται σε δομικές κατασκευές, στις συσκευασίες τροφίμων και φαρμάκων, σε ηλεκτρικές εφαρμογές, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυπηγική, στην αεροδιαστημική και σε πληθώρα οικιακών και καταναλωτικών προϊόντων. Οι ιδιότητες του αλουμινίου διακρίνονται

σε μηχανικές και φυσικές. Συγκεντρωτικά οι ιδιότητες αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κρυσταλλική Δομή Κυβική εδροκεντρωμένη (FCC)		
Σταθερή σε θερμοκρασία από 4 K έως σημείο τήξης, ( $a = 4,0496 \cdot 10^{-10}$ m, στους 298 K), διάμετρος ατόμου $2,86 \cdot 10^{-10}$ m		
Ατομικός Αριθμός	13	
Σθένος στις χημικές ενώσεις	3	
Ατομικό Βάρος	26,98	
Πυκνότητα	$2,7 \text{ g/cm}^3$	
Σημείο Τήξης	933,4 K ή 660,4 °C	
Θερμότητα Τήξης	397 J / g	
Σημείο Βρασμού	2.519 °C	
Θερμότητα Εξάτμισης	$1,08 \cdot 10^4 \text{ J / g}$	
Συντελεστής θερμικής Διαστολής	$(23 \text{ έως } 24,9) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ από 20 έως 127 °C	
Θερμική Αγωγιμότητα	$2,37 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ στους 25 °C	
Ηλεκτρική Αντίσταση	$2,6548 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ στους 20 °C	
Θερμοχωρητικότητα	$0,9 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Όριο Διαρροής	10 Mpa	
Όριο Θραύσης	45 Mpa	

(aluminum handbook)

Πίνακας 1.1 Οι βασικές ιδιότητες του αλουμινίου

### Μηχανικές ιδιότητες

Το εμπορικής καθαρότητας ανοπτημένο αλουμίνιο έχει όριο διαρροής τα 35MPa και αντοχή σε εφελκυσμό 47MPa. Βέβαια, η μηχανική αντοχή αυξάνεται με μηχανική κατεργασία «εν ψυχρώ» δηλαδή με εργοσκλήρυνση οπότε το όριο διαρροής και η αντοχή σε εφελκυσμό μπορούν να υπερβούν τα 150 και τα 200 MPa αντίστοιχα. Άρση της εργοσκλήρυνσης επιτυγχάνεται με ανόπτηση του αλουμινίου στους 350-400 °C. Τέλος με προσθήκη κραματικών στοιχείων προκύπτουν κράματα υψηλής μηχανικής αντοχής της τάξης ακόμα και των 700 MPa, με το κράμα 7118 (Zn=7%, Mg=3%, Cr=0,3%, Cu=2%, Al=87,7%) να αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αφού παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 607MPa.



### **Ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα**

Το αλουμίνιο παρουσιάζει υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία μπορεί να αγγίξει το 65% εκείνης του χαλκού ανάλογα με τις ακαθαρσίες που περιέχονται στο εκάστοτε κράμα αλουμινίου και της θερμικής κατεργασίας που αυτό έχει υποστεί.. Πιο συγκεκριμένα η αντίσταση του καθαρού αλουμινίου είναι 2,69  $\mu\Omega$  στους 20°C.

Για τη θερμική αγωγιμότητα του αλουμινίου ισχύει ότι ισούται με το μισό της θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού με τιμή ίση με 244W/mK για θερμοκρασία μεταξύ 0-100°C η οποία μειώνεται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων στο αλουμίνιο.

### **Αντοχή στη διάβρωση**

Κατά την επαφή του αλουμινίου με το οξυγόνο σχηματίζεται στην επιφάνεια του ένα λεπτό πορώδες στρώμα οξειδίου του αλουμινίου. Το φαινόμενο αυτό που ορίζεται και ως παθητικοποίηση εμποδίζει την διάβρωση του αλουμινίου από διαβρωτικά διαλύματα με pH 4,5-8,5, δεν το προστατεύει όμως από ισχυρά οξέα – βάσεις και από το θαλασσινό νερό. Όπως και η αγωγιμότητα, η αντοχή στη διάβρωση επηρεάζεται από την καθαρότητα του αλουμινίου.

### **Ανακλαστική ικανότητα**

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται για την κατασκευή κατόπτρων δεδομένου ότι έχει μικρότερη ανακλαστική ικανότητα μόνο από εκείνη του άργυρου, παρουσιάζει όμως το πλεονέκτημα ότι μαυρίζει δυσκολότερα και είναι σημαντικά πιο οικονομικό. [7]





### **Κατεργασιμότητα**

Έχει αναφερθεί και προηγουμένως ότι το αλουμίνιο διαθέτει κρυσταλλική δομή κυβικού χωροκεντρομένου και μάλιστα είναι το μόνο από τα ελαφρά μέταλλα με το χαρακτηριστικό αυτό. Η ιδιότητα αυτή δίνει στο αλουμίνιο τη δυνατότητα της εύκολης μορφοποίησης με μηχανικές κατεργασίες «εν ψυχρώ». Έτσι το αλουμίνιο ελάσσεται, διελάσσεται, εξελάσσεται, κλπ, οπότε μπορούν να παραχθούν φύλλα, ράβδοι, σύρματα, κλπ.

Το αλουμίνιο μπορεί να κατεργασθεί εύκολα με τα γνωστά μηχανουργικά εργαλεία και εργαλειομηχανές. Μάλιστα λόγω της μεγάλης θερμικής του αγωγιμότητας δεν παρουσιάζονται μεγάλες θερμοκρασίες κατά την κατεργασία ενώ προτιμότερες συνθήκες κατεργασίας είναι οι μεγάλες ταχύτητες και οι μικρές πιέσεις στο εργαλείο.

### **Συγκολλησιμότητα**

Οι μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται είναι οι ηλεκτρικές (τόξου, αντιστάσης), με καύσιμα αέρια-οξυγόνο καθώς και με ετρογενή συγκόλληση με τη βοήθεια όμως κάποιων κατάλληλων συλλιπασμάτων προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα του πολυ δύστηκτου οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου. Τα συλλιπάσματα αυτά πρέπει να απομακρύνονται μετά την κόλληση γιατί είναι πολυ διαβρωτικά. Συνεπώς προτείνονται μέθοδοι συγκολλήσεως που δεν χρειάζεται η χρήση συλλιπασμάτων όπως η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου.[7]

### **Άλλες ιδιότητες του αλουμινίου**

Το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται και από μια σειρά άλλων ιδιοτήτων αρκετά σημαντικών που δικαιολογούν αντίστοιχες εφαρμογές του όπως είναι για παράδειγμα το ότι είναι μη αναφλέξιμο, μη τοξικό, ότι εμφανίζει πολύ μικρή μαγνητικότητα, η μικρή θερμική διαστολή και τέλος το ότι είναι εύκολα ανακυκλώσιμο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Γενικά για τα κράματα αλουμινίου .

Κράμα (alloy) ονομάζεται κάθε υλικό που σχηματίζεται από την ανάμιξη δύο ή περισσότερων χημικών στοιχείων, κατά κανόνα σε κατάσταση τήξης, από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο και αποτελεί το κύριο στοιχείο του κράματος.

Τα κράματα αποτελούν τη βάση όλων των μηχανουργικών/τεχνολογικών κατασκευών δεδομένου ότι με τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων στοιχείων (κραματοποίηση) λαμβάνεται υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες και την επιθυμητή λειτουργική συμπεριφορά. Η βελτιώση αφορά, π.χ. την αντοχή σε εφελκυσμό, τη δυσθραυστότητα, τη σκληρότητα, την αντοχή σε κόπωση, φθορα και διάβρωση, κλπ. [6]

Το αλουμίνιο βρίσκεται στη δεύτερη θέση (μετά τους χάλυβες) όσον αφορά την παραγωγή και χρήση βιομηχανικών κραμάτων λόγω των εξαιρετικών του ιδιοτήτων. Επίσης το γεγονός αυτό εξηγείται και από το ότι με τη χρήση των κατάλληλων προσθηκών (κράματα αλουμινίου) παράγεται ένας μεγάλος αριθμός υλικών με πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Γενικά, τα κράματα αλουμινίου υπερτερούν κατά πολύ των χαλύβων με βάση τον λόγο αντοχή/βάρος, υστερούν όμως ελαφρώς από την άποψη της αντοχής του ερπυσμού, της φθοράς και της κόπωσης και φυσικά του υψηλότερου κόστους. [6]

Τα κράματα του αλουμινίου (aluminium alloys) διατίθενται ως κράματα διαμόρφωσης ύστερα από έλαση, με μορφή μπιγιετών (ingots) ως κράματα χύτευσης και με μορφή σκόνης για εφαρμογές κωνιομεταλλουργίας. Τα κράματα



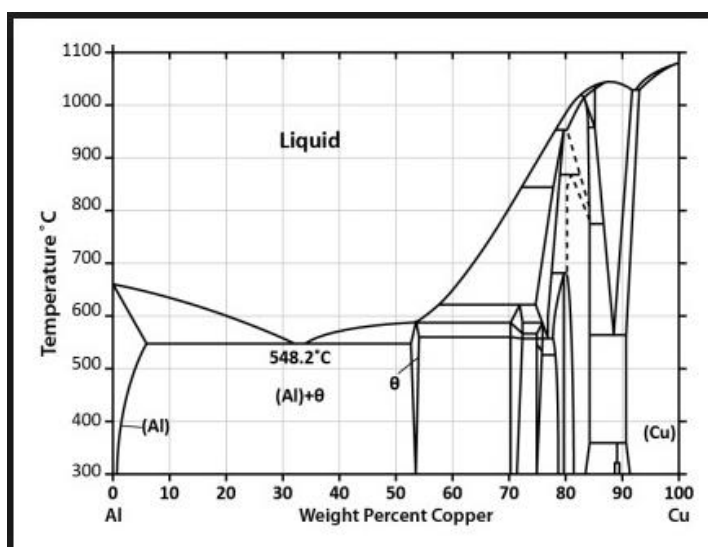
διαμορφώσεως, κυρίως διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες: αυτά που σκληρύνονται με θερμική κατεργασία, συνήθως γήρανση, και αυτά που δεν επιδέχονται θερμικές κατεργασίες αλλά σκληρύνονται με ενδοτράχυνση ή προσθήκη κραματικών στοιχείων.[6] Οι κυριότερες προσθήκες και οι επιδράσεις τους στο αλουμίνιο και τις ιδιότητες του παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.

## 2.2 Κύρια κραματικά στοιχεία αλουμινίου

Ανάλογα με τις προσδοκώμενες ιδιότητες γίνονται διάφορες προσθήκες αλλά και κατεργασίες στο αλουμίνιο και τα κραματά του. Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα στοιχεία είναι τα παρακάτω:

### α) Χαλκός (Cu)

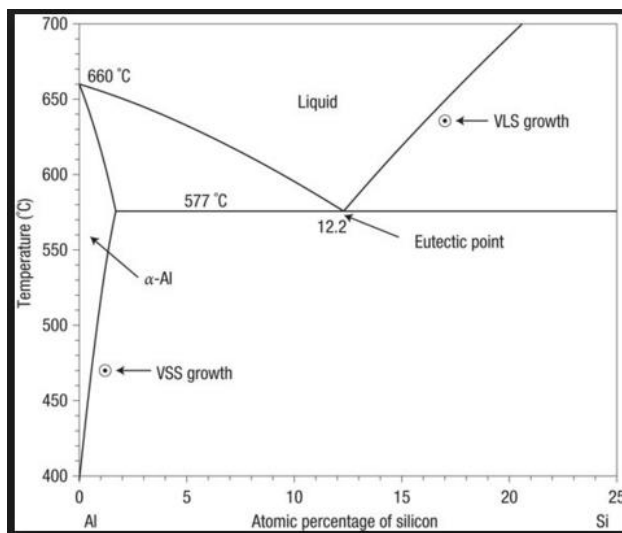
Η κυριότερη επίδραση του χαλκού είναι η αύξηση της σκληρότητας, η οποία επέρχεται από κατακρήμνιση με γήρανση. Επίσης ο χαλκός αυξάνει τη μηχανική αντοχή του αλουμινίου σε υψηλές θερμοκρασίες και ως εκ τούτου τα κράματα αλουμινίου-χαλκού χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εμβόλων μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.). Ο χαλκός προστίθεται στα κράματα διαμόρφωσης σε ποσοστό έως 4% ενώ στα κράματα χύτευσης σε ποσοστό έως 10%.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ισορροπίας Al-Cu.

## **β ) Πυρίτιο (Si)**

Σκοπός της προσθήκης πυριτίου στο αλουμίνιο είναι η βελτίωση των χυτευτικών του ιδιοτήτων. Πιο συγκεκριμένα το πυρίτιο μειώνει τη διακένωση και αυξάνει τη ρευστότητα του αλουμινίου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των κραμάτων αλουμινίου-πυριτίου είναι η αντοχή στη διάβρωση.[7] Βέβαια για να συμβεί αυτό χρειάζεται και η ταυτόχρονη προσθήκη, σε μικρότερο βέβαια ποσοστό, ποσότητα μαγνησίου. Το πυρίτιο προστίθεται σε ποσοστό 1% έως 18%.

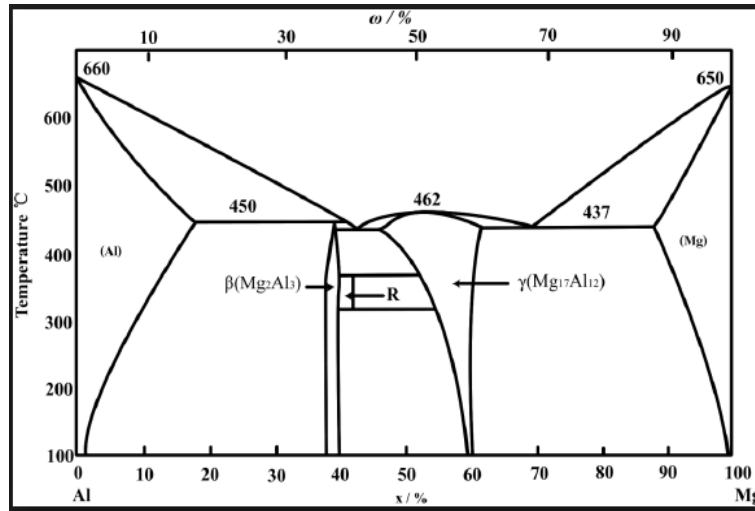


**Σχήμα 2.2** Διάγραμμα ισορροπίας Al-Si.

## **γ ) Μαγνήσιο (Mg)**

Ενα επίσης διαδεδομένο κραματικό στοιχείο του αλουμινίου είναι το μαγνήσιο το οποίο δημιουργεί με το αλουμίνιο κράματα μικρού ειδικού βάρους και ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων. Επίσης αν προστεθεί σε σημαντικό ποσοστό, αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου εμφανίζουν τη μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση από θαλασσινό νερό από όλα τα

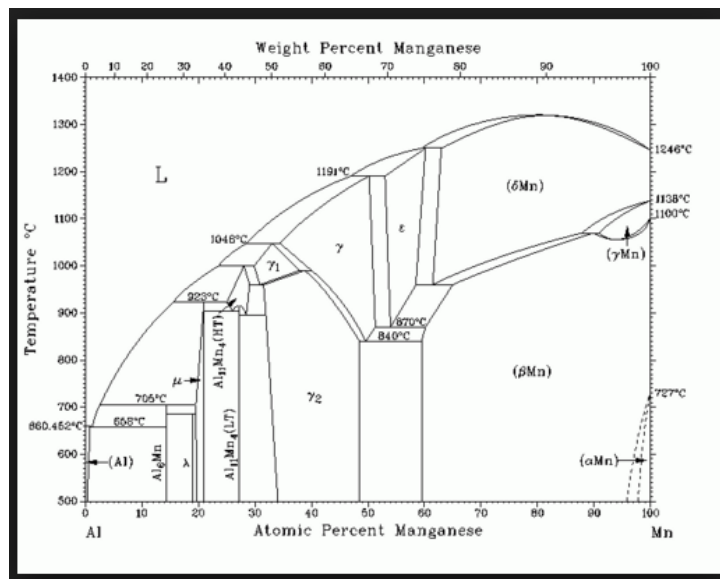
κράματα αλουμινίου. Η τάξη μεγέθους της προσθήκης του μαγνησίου στο αλουμίνιο είναι 1-10%.



**Σχήμα 2.3** Διάγραμμα ισορροπίας Al-Mg.

### δ) Μαγγάνιο (Mn)

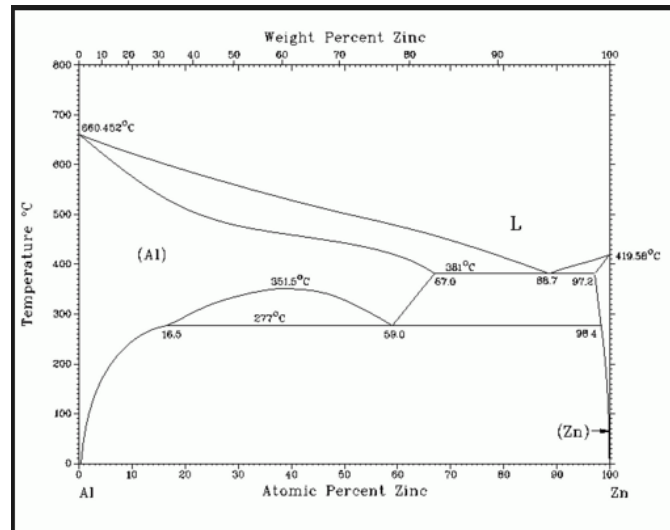
Το μαγγάνιο όταν προστεθεί στο αλουμίνιο επιδρά αυξάνοντας τη μηχανική αντοχή και την αντοχή του στη διάβρωση.



**Σχήμα 2.4** Διάγραμμα ισορροπίας Al-Mn.

### ε ) Ψευδάργυρος (Zn)

Προστίθεται για την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων. Τα υψηλής μηχανικής αντοχής κράματα αλουμινίου περιέχουν 5-7% ψευδάργυρο με μικρότερες ποσότητες μαγνησίου και χαλκού.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα ισορροπίας Al-Zn.

### στ ) Άλλα κραματικά στοιχεία

Σε κράματα αλουμινίου προστίθεται επίσης το νικέλιο (Ni) το οποίο αυξάνει την ‘εν θερμώ’ μηχανική αντοχή, ο μόλυβδος (Pb) και το βισμούθιο (Bi) που βελτιώνουν την κατεργασιμότητα καθώς και άλλα στοιχεία.[7]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κύριες προσθήκες στα κράματα αλουμινίου με τις διαλυτότητες και τις επιδράσεις τους.



Προσθήκη Κραματικού Στοιχείου	Διαλυτότητα στην υγρή και στερεή φάση, (ευθηκτική θερμοκρασία)					Επίδραση στις ιδιότητες του Αλουμινίου
	T (°C)	Υγρό		Στερεό		
		% κβ	% κα	% κβ	% κα	
Χαλκός	550	33,15	17,39	5,67	2,48	Σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Μέγιστη αντοχή για 4-6 % Cu. Μείωση επιμήκυνσης
Μαγγάνιο	660	1,95	0,97	1,82	0,9	Αύξηση αντοχής με ενδοτράχυνση. Καλή κατερ- γασιμότητα. Ελάττωση ολκιμό- τητας. Αντοχή στη διάβρωση
Πυρίτιο	580	12,6	12,16	1,65	1,59	Αύξηση ρευστότητας και χυτευσιμότητας, αντοχή στη φθορά
Μαγνήσιο	450	35,0	37,34	14,9	16,26	Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Μικρή μείωση επιμήκυνσης. Καλή αντοχή στη διάβρωση
Ψευδάργυρος	380	95,0	88,7	82,8	66,4	Σκλήρυνση με κατακρήμνιση, ενδοτράχυνση, υψηλή αντοχή

***Πίνακας 2.1** Συγκεντρωτική παράθεση των κύριων προσθηκών των κραμάτων αλουμινίου.*

## **2.3 Κατηγορίες και Ονοματολογία Κραμάτων Αλουμινίου**

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο μορφοποίησής τους σε κράματα διαμόρφωσης (Wrought Alloys) και σε κράματα χύτευσης (Cast Alloys). Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων αλουμινίου, σύμφωνα με την Συνομοσπονδία Αλουμινίου (Aluminum Association), αποτελούνται από δύο μέρη, τα οποία χωρίζονται με παύλα. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τέσσερεις αριθμούς, των



οποίων η σημασία εξαρτάται από το εάν πρόκειται για κράμα διαμόρφωσης ή για κράμα χύτευσης.[8]

### **2.3.1 Κράματα διαμόρφωσης (Wrought Alloys)**

Στην πρώτη περίπτωση (κράματα διαμόρφωσης), ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να δηλώσει τροποποιήσεις των ορίων περιεκτικότητας των ακαθαρσιών. Τέλος, οι δύο τελευταίοι αριθμοί, στην περίπτωση της σειράς 1xxx όπου πρόκειται για καθαρό αλουμίνιο, δίνουν τα δεκαδικά ποσοστά, για περιεκτικότητες αλουμινίου υψηλότερες του 99,00%, ενώ στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου άλλων σειρών, οι δύο τελευταίοι αριθμοί χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της ειδικής κατηγορίας του κράματος της οικείας ομάδας [8]. Συνοπτικά οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων διαμόρφωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 2.2).



Σειρά	Προσθήκη	Χαρακτηριστική ιδιότητα	Κύριες Εφαρμογές
1xxx	Καθαρό αλουμίνιο (99%)	Μη θερμικός κατεργάσιμα	Χημικές και ηλεκτρικές βιομηχανίες
2xxx	Χαλκός (Cu) και άλλα στοιχεία σε μικρότερο ποσοστό	Θερμικός κατεργάσιμα	Τμήματα αεροσκαφών
3xxx	Μαγγάνιο (Mn)	Μη θερμικός κατεργάσιμα	Αρχιτεκτονικές κατασκευές
4xxx	Πυρίτιο	Μη θερμικός κατεργάσιμα	Ράβδοι και φύλλα συγκολλήσεως
5xxx	Μαγνήσιο	Μη θερμικός κατεργάσιμα	Ναυπηγική και κατασκευές πλησίον θαλάσσιου περιβάλλοντος
6xxx	Μαγνήσιο και πυρίτιο	Θερμικός κατεργάσιμα	Αρχιτεκτονικές εφαρμογές
7xxx	Ψευδάργυρος (Zn)	Θερμικός κατεργάσιμα	Αεροδιαστημική και γενικά υψηλής αντοχής κατασκευές
8xxx	Κασσίτερος (Sn) και λίθιο (Li) και άλλες προσμίξεις	Θερμικός κατεργάσιμα	Ηλεκτρικές εφαρμογές , αεροδιαστημική
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη ονομασία		

Πίνακας 2.2 Κωδικοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης.

### **1xxx Κράματα καθαρού Αλουμινίου (Al wrought alloys)**

Πρόκειται για κράματα περιεκτικότητας τουλάχιστον 99% σε αλουμίνιο (εμπορικά καθαρό αλουμίνιο). Η απουσία προσθηκών οδηγεί σε χαμηλού επιπέδου μηχανικές ιδιότητες πράγμα που αντιμετωπίζεται με ενδοτράχυνση και προσθήκη χαλκού σε ποσοστό 0.14%. [6] Οι κύριες ακαθαρσίες των κραμάτων αυτών είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο. Δεδομένου ότι τα όρια αντοχής σε εφελκυσμό των κραμάτων της εν λόγω σειράς κυμαίνονται μεταξύ 69 και 186MPa τα κράματα αυτά δεν ενδείκνυται για εφαρμογές με απαιτήσεις υψηλής μηχανικής αντοχής.

Τα πλεονεκτήματα των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου είναι η ευκολία στη διαμόρφωση τους (ολκιμότητα), η σημαντική αντοχή σε διάβρωση, και η μεγάλου μεγέθους ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ως εκ τούτου βρίσκουν εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία (σασί), σε υλικά συσκευασίας σε ηλεκτρομηχανικά έργα και αλλού.



*Εικόνα 2.1(α) Φύλλα αλουμινίου*



*Εικόνα 2.1 (β) Καλώδιο αλουμινίου*

### **2xxx Κράματα Αλουμινίου-Χαλκού (Al-Cu wrought alloys)**

Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν χαλκό σε ποσοστό 2,6-6,3% και ορισμένες ποσότητες μαγνησίου (0,5-1,5%) και πυρίτιο και χαρακτηρίζονται από υψηλή μηχανική αντοχή (186-427MPa σε εφελκυσμό). Με προσθήκη στα κράματα αυτά και ποσοτήτων σιδήρου, νικελίου και τιτανίου προκύπτουν κράματα τα οποία διατηρούν την αντοχή αυτή και σε υψηλές θερμοκρασίες.



Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσθήκη σιδήρου σχηματίζει ενώσεις ( $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ ) οι οποίες δυσχεραίνουν τη σκλήρυνση της δομής επειδή δεσμεύουν μέρος του χαλκού από το διάλυμα, οπότε πρέπει να συνοδεύεται με προσθήκη ποσότητας νικελίου το οποίο βοηθά στην απότρεψη του φαινομένου αυτού. Επιπλέον, κάποια από τα κράματα αυτά χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα και υψηλό μέτρο ελαστικότητας κι έτσι βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική (κράμα 2024).

Σχετικά με την αντοχή στη διάβρωση τα κράματα αυτά υστερούν καθώς για να χρησιμοποιηθούν σε κάποια περιβάλλοντα απαιτείται προηγουμένως να βαφούν η να επενδυθούν καταλληλα. Το ίδιο ισχύει και με την συγκολλησιμότητα αφού δε συγκολλώνται εύκολα με τις συμβατικές μεθόδους ενώ προτείνεται η συγκόλληση με τη μέθοδο τόξου σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου. Αυτό ευτυχώς, δεν ισχύει για όλα τα κράματα της σειράς καθώς το κράμα 2195 που περιέχει και λίθιο παρουσιάζει καλή συγκολλησιμότητα. Άλλα τέτοια κράματα είναι τα 2219 και 2048 που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη. Τα κράματα της σειράς χρησιμοποιούνται για κατασκευή βιδών και κορδελών.



**Εικόνα 2.2(α)** Εφαρμογή στην αεροδιαστημική



**Εικόνα 2.2 (β)** Βίδες από κράμα  
αλουμινίου

### **3xxx Κράματα Αλουμινίου-Μαγγανίου (Al-Mn wrought alloys)**

Στη σειρά αυτή κύριο κραματικό στοιχείο αποτελεί το μαγγάνιο (έως 1,5%). Το στοιχείο αυτό σχηματίζει με το αλουμίνιο την μεσομεταλλική ένωση  $Al_6Mn$  η οποία διασπείρεται στη μεταλλική μήτρα και επιφέρει την επιθυμητή σκλήρυνση. Δευτερογενής σκλήρυνση επιτυγχάνεται με την προσθήκη μαγνησίου σε ποσοστό έως 1,2%.

Κύρια χαρακτηριστικά των κραμάτων αυτών είναι η αντοχή του στην διάβρωση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, η ευκολία μορφοποίησης τους και η καλή συγκολλησιμότητά τους. Η αντοχή τους χαρακτηρίζεται μέτρια με αντοχή σε εφελκυσμό 110-282Μpa. Εμφανίζουν δηλαδή παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνα της σειράς 1xxx, πλεονεκτούν όμως στη μηχανική αντοχή. Λόγω των χαρακτηριστικών αυτών βρίσκουν χρήση σε αγωγούς θερμότητας, σε υλικά συσκευασίας σε εναλλάκτες θερμότητας(κράματα 3002 και 3003) , σε ψευδοροφές (κράμα 3003) και αλλού.



Εικόνα 2.3(α) Εναλλάκτες θερμότητας.



Εικόνα 2.3(β) Σωληνώσεις από  
κράμα αλουμινίου σειράς 3XXX.

### **4xxx Κράματα Αλουμινίου-Πυριτίου (Al-Si wrought alloys)**

Τα κράματα αυτά είναι γνωστά και ως silumins λόγω των ιδιοτήτων που αποκτούν με την ένωση αλουμινίου και πυριτίου. Οι ιδιότητες αυτές είναι κυρίως το χαμηλό σημείο τήξης, η ολκιμότητα και η εύκολη σφυρηλασία. Λόγω του χαμηλού σημείου τήξης τους τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε

συγκολλήσεις αλουμινίου. Σε συνδυασμό με την ολκιμότητά τους εμφανίζουν και το πλεονέκτημα της πλήρωσης των ρωγμών ή κενών των συγκολλημένων μερών. Ακόμη στην περίπτωση της σφυρηλασίας η ολκιμότητα των κραμάτων αυτών και τα καλά χαρακτηριστικά ροής τους συντείνουν στο γέμισμα περίπλοκων καλουπιών.

Τα κράματα αλουμινίου-πυριτίου είναι θερμικώς κατεργάσιμα ενώ η αντοχή τους σε εφελκυσμό είναι μεταξύ των ορίων 172-380MPa. Χρήσεις των κραμάτων αυτών γίνονται σε πιστόνια σε περίπλοκα εξαρτήματα, σωληνώσεις κάποιων ειδών, σύρματα συγκολλήσεως κλπ.



Εικόνα 2.4(α) Εξέλικτρο αλειείας



Εικόνα 2.4(β) Σύρματα σύγκολλήσεως

### **5xxx Κράματα Αλουμινίου-Μαγνησίου (Al-Mg wrought alloys)**

Αναλόγως της επιθυμητής επίδρασης προστίθεται στο αλουμίνιο μαγνήσιο σε διάφορες περιεκτικότητες. Για κράματα βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων και άριστης αντοχής στη διάβρωση (ακόμα και σε θαλάσσιο περιβάλλον) προστίθεται μαγνήσιο 2-7% ενώ για εύκολα διαμορφώσιμα κράματα προστίθεται ποσοστό μικρότερο του 1% και τότε ακολουθείται η διαμόρφωση με ‘εν θερμώ’ μηχανική κατεργασία. Στα κράματα περιεκτικότητας σε μαγνήσιο έως 4% το μεγαλύτερο ποσοστό του μαγνησίου βρίσκεται στο στερεό διάλυμα ενώ το υπόλοιπο δεσμεύεται στις μεσομεταλλικές ενώσεις  $Mg_5Al_3$ ,  $Mg_5Al_8$ ,  $Mg_2Al_3$  οι οποίες είναι σκληρές και εύθραυστες. Γενικά τα κράματα αυτής της σειράς εξαρτώνται, όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες σημαντικά από την περιεκτικότητα σε Mg.



Αυτής της ομάδας τα κράματα σκληρύνονται μόνο με ενδοτράχυνση η οποία και αίρεται με θέρμανση στους 350-400°C και στη συνέχεια με αργή ψύξη. Επίσης επειδή δέχονται σκλήρυνση με ψυξηλασία εμφανίζουν μεγάλη δυσκαμψία ακόμα και σε πολύ ψυχρό περιβάλλον θερμοκρασίας δηλαδή ακόμα και 0 °K.

Χαρακτηριστικά στοιχεία των κραμάτων της σειράς 5xxx είναι η καλή κατεργασιμότητα (δε δίνουν καλό φινίρισμα όμως όταν κατεργάζονται σε κατάσταση ανόπτησης), η εύκολη συγκόλλησή τους, η μεγάλη, όπως αναφέρθηκε, αντοχή τους στη διάβρωση, η καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες και η καλής ποιότητας επιφάνεια που δίνουν μετά από λείανση και ανοδίωση. Το εύρος αντοχής σε εφελκυσμό κυμαίνεται στα 172-380 Μπα.

Λόγω των ανωτέρω εφαρμόζονται σε εφαρμογές υποδομής κτιρίων και κατασκευών, στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή αμαξωμάτων, κρυογενικά υλικά, εφαρμογές σε παραθαλάσσιες περιοχές και στη ναυπηγική με σημαντικούς εκπροσώπους τα κράματα 5086, 5083, 5456 τα οποία με την κατεργασία H116 είναι τα κυριότερα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της γάστρας του πλοίου ή άλλων ναυπηγικών κατασκευών [9].



Εικόνα 2.5(α) Αμάξωμα από  
κράμα αλουμινίου



Εικόνα 2.5(β) Δεξαμενή καυσίμου  
οχήματος



Εικόνα 2.5(γ) Εφαρμογή στην ναυπηγική.

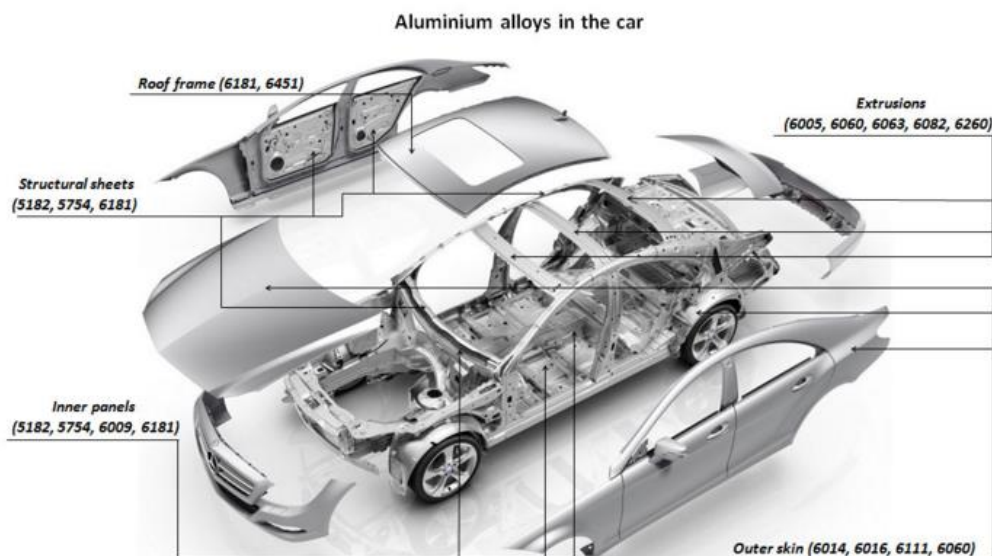
### **6xxx Κράματα Αλουμινίου-Μαγνησίου-Πυριτίου (Al-Mg-Si wrought alloys)**

Αυτή η οικογένεια κραμάτων προκύπτει με την προσθήκη μικρού ποσοστού πυριτίου (0,4-1%) καθώς και μικρότερων ποσοτήτων χαλκού, χρωμίου και μαγγανίου σε κράματα αλουμινίου μαγνησίου (μαγνήσιο έως 1%). Ειδικότερα ορισμένα κράματα της σειράς αυτής, περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8%, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες, συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμείνει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση που προκαλεί [2].



Αυτής της κατηγορίας τα κράματα υπόκεινται σε θερμική κατεργασία και η σκλήρυνσή τους οφείλεται στο σχηματισμό και την κατακρήμνιση της ένωσης  $Mg_2Si$  στην οποία συμμετέχει το σύνολο σχεδόν της μάζας του μαγνησίου και του πυριτίου σε λόγο  $Mg/Si$  ίσο με 1,73. Κάποια περίσσεια  $Si$ , όπως, π.χ. στο κράμα 6070, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, εις βάρος της αντοχής του σε διάβρωση [2].

Ιδιότητες των κραμάτων αυτών είναι η υψηλή τους αντοχή σε διάβρωση, η σχετικά υψηλή αντοχή τους σε εφελκυστικές τάσεις (125- 400 Mpa) και η καλή συγκολλησιμότητά τους. Επιπροσθέτως είναι κράματα τα οποία διελάσσονται. Χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική, σε έργα υποδομής κτιρίων σε πλαίσια αυτοκινήτων, και σε παράκτια έργα. [29]



**Εικόνα 2.6(α)** Χρήση κραμάτων 5xxx και 6xxx σε αμάξωμα αυτοκινήτου.



**Εικόνα 2.6(β)** Εφαρμογή κράματος της σειράς σε τμήματα τρένου.



**Εικόνα 2.6(γ)** Εφαρμογή στην αρχιτεκτονική.

### **7xxx Κράματα Αλουμινίου-Ψευδαργύρου (Al-Zn wrought alloys)**

Πολύ σημαντική σειρά κραμάτων αφού τα κράματά της εμφανίζουν την υψηλότερη μηχανική αντοχή από όλα τα κράματα αλουμινίου δηλαδή έχουν εύρος αντοχής σε εφελκυσμό: 220-605 Μρα. Βέβαια η αυξημένη αυτή αντοχή μειώνεται σημαντικά σε μεγάλες θερμοκρασίες και πιο συγκεκριμένα μετά τους 120°C . Ουσιαστικά πρόκειται για μίξη αλουμινίου, ψευδαργύρου (4-7%), μαγνησίου (2-3%) και χαλκού (0,5-1,5%) [7] η παρουσία του οποίου μειώνει την εμβαπτότητα, τη δυσθραυστότητα και τη συγκολλησιμότητά τους. Πρόσθετα όπως το χρώμιο, το μαγγάνιο και το τιτάνιο χρησιμοποιούνται επίσης για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των κραμάτων αυτών. Τέλος, τα κράματα αυτά υπόκεινται σε σκλήρυνση με την κατακρήμνιση της ένωσης MgZn<sub>2</sub> [7]

Πλεονεκτήματα των κραμάτων εδώ, αποτελούν η πολύ υψηλή μηχανική αντοχή , η ακαμψία , ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων σε περιπτώσεις κραμάτων με χαμηλό επίπεδο ακαθαρσιών , η σχετικά καλή εμβαπτότητα ενώ από την άλλη έχουν το μειονέκτημα της μέτριας συγκολλησιμότητας και φυσικά τη μείωση της ‘εν θερμώ’ αντοχής τους.

Η σειρά αυτή χρησιμοποιείται λόγω των μηχανικών της ιδιοτήτων στην αεροναυπηγική για διάφορα τμήματα αεροσκαφών, στη αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιόμηχανία και γενικά σε κατασκευές με υψηλές μηχανικές καταπονήσεις.



**Εικόνα 2.7(α) Εφαρμογή κράματος**  
**σε τμήματα αεροσκάφους.**



**Εικόνα 2.7(β) Σκελετός ποδηλάτου**  
**από κράμα 7xxx.**

## **8xxx Κράματα Αλουμινίου-Άλλων στοιχείων (Al and other element wrought alloys)**

Προσθήκες σε αυτά τα κράματα μπορεί να είναι ανάλογα με τις απαιτήσεις στις οποίες θα πρέπει να αναταπεξεχθεί το κράμα ο σίδηρος, το νικέλιο ή/και το λίθιο. Δέχονται θερμική κατεργασία και μπορούν να εμφανίσουν καλή μηχανική αντοχή (117-241 Μρα σε εφελκυσμό) ανάλογα το στοιχείο και την περιεκτικότητα του αλουμινίου σε αυτο.

Παράδειγμα αποτελεί το λίθιο το οποίο βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και κράματα που το περιέχουν εμφανίζουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές. Άλλες εφαρμογές των κραμάτων αυτών είναι οι ηλεκτρικές αφού συνδυάζουν καλή αντοχή και αγωγιμότητα.



*Εικόνα 2.8(α) Ηλεκτρική εφαρμογή.*



*Εικόνα 2.8(β) Έδρανα αλουμινίου.*



Εφαρμογές προϊόντων αλουμινίου και κράματα		
Αεροπορική Βιομηχανία	κατασκευές υψηλών αντοχών	2014 2014A 2017A 2024 7010 7075
	κατασκευές μέσης αντοχής	8081 8082
Αυτοκινητοβιομηχανία	σκελετοί με προφίλ	8005A 8080 8083 8082
	σφυρήλατα	2014 8082
	οροφές / σώμα	1200 3003 3103 5005
	ταμπέλες αριθμών κυκλοφορίας	1200
	δεξαμενές καυσίμων	5083 5251 5454
Οικοδομή	ψευδοοροφές	1050A 1200 3003 3103 5005 5005A 8080
	πόρτες / παράθυρα / προσόψεις	8080 8083 8082
	σκάλες	8080 8083 8082
	πάνελ	1050A 1200 3003 3103 5005A 5052 5251 5754
	κάγκελα	8080 8081 8083 8082
	πύργοι / σκαλωσιές	5083 5088 8081 8082
Χημική Βιομηχανία	δοχεία	1005 3003 3103 5005 5005A
	σωλήνες	1050A 1200 3003 3103 5005 5005A 5052 5154A 5251 5454 5754 8081 8082
	δοχεία πίεσης	5052 5083 5088 5154A 5251 5454 5754
Ηλεκτρικές εφαρμογές	δεξαμενές	3003 3103 5083 5088 5154A 5454 5754
	κεραίες / δορυφορικές	5251 8083 8082
	ψικτρες	8080 8083
	κέλυφος κινητήρα πυλώνες	8080 8083 8082 5083 5454 8005A 8081 8082 7020
Γενικές κατασκευές	κατασκευές υψηλών αντοχών	2014 2014A 2017A 2024 7075
	υδραυλικά συστήματα	2017A 2024 8082 7075
	σωληνώσεις	1050A 3003 3103 5005 5005A 5052 5083 5088 5154 5251 5754 8005A 8081 8082
	πλατφόρμες	5083 5088 8005A 8082 7020
	πνευματικά συστήματα	8005A 8080 8083 8082
	δοχεία συγκολλημένες κατασκευές	1050A 5005A 5083 5088 5454 5754 5083 5088 5154A 5251 8080 8083 8082 7020
Οδοποιία	γέφυρες	8081 8082 7020
	πινακίδες	5005 5005A 5052 5251
	φωτιστικά	5251 8080 8081 8083 8082
Εξοπλισμός	συναρμολογούμενα συστήματα	8080 8083
	έπιπλα	5005 5005A 8005A 8080 8083
Συνδέσεις	συσκευές γραφείου	3003 3103 5154A 5754 8080 8083
	βίδες / παξιμάδια	2007 2011 2024 2030 8081 8082 7075
Ναυπηγική	πριτσίνια	2017A 2024 5052 5754 8081 8082 7075
	βάρκες/ σκάφη ανοικτής θαλάσσης	5005 5005A 5083 5088 5251 5454 5754 8005A 8081 8082
Συσκευασία	κατάρτια	5454 8005A 8081 8082
	σώμα κουτιών	5052
	καπάκια	1050A 3003 3103
Σπορ	φόιλ	1050A 1200
	ποδηλάτα	8082 7020
	σκι ρακέτες τένις	7075 7075

**Πίνακας 2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας χρήσεων των κραμάτων αλουμινίου.**

### **2.3.2 Κράματα Χύτευσης (Cast Alloys)**

Προκειμένου να παραχθούν κράματα χύτευσης γίνεται προσθήκη ορισμένων στοιχείων τα οποία τους προσδίδουν ανώτερες χυτευτικές ιδιότητες όπως είναι η μεγάλη ρευστότητα, η μικρή συστολή κατά την στερεοποίηση και την απόψυξη, οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες και το μικρό εύρος θερμοκρασιών πήξης.

Όσον αφορά την κωδικοποίηση στα κράματα χύτευσης, ο πρώτος αριθμός υποδηλώνει, όπως και στα κράματα διαμόρφωσης, το κύριο στοιχείο προσθήκης. Ο



δεύτερος και ο τρίτος αριθμός δείχνουν την ειδική κατηγορία του κράματος της οικείας ομάδας. Ο τέταρτος αριθμός, ο οποίος χωρίζεται με τελεία από τους τρεις πρώτους, αφορά τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: Με μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατ' ευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα. Μετατροπή της αρχικής χημικής σύστασης υποδηλώνεται με ένα γράμμα μπροστά από τον κωδικό [8].

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι χύτευσης που χρησιμοποιούνται είναι οι παρακάτω:

- Χύτευση σε άμμο (sand casting) – συμβολισμός S.  
Χρησιμοποιείται για την παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων χυτών αντικειμένων πολύπλοκης μορφής.
- Χύτευση σε μόνιμο τύπο (permanent mold casting) – συμβολισμός P  
Με τη μέθοδο αυτή τα επιτυγχανόμενα κράματα είναι μονοκρυσταλλικά και κατ'επέκταση ανθεκτικότερα και παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο.
- Χύτευση υπό πίεση (die casting) – συμβολισμός D  
Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται μεγάλες ταχύτητες χύτευσης και μικροκρυσταλλικές δομές, δυνατότητα αυτοματοποίησης της διεργασίας, λείες επιφάνειες και ακρίβεια στη γεωμετρία του αντικειμένου (μικρότερες ανοχές).[6]



**Εικόνα 2.9** Συμπλέκτης αλουμινίου χυτευμένου σε άμμο



**Εικόνα 2.10** Χυτό παραχθέν με χύτευση αλουμινίου υπό πίεση.



**Εικόνα 2.11** Εξαρτήματα κινητήρα από αλουμίνιο παραχθέντα με χύτευση σε  
μόνιμο τύπο

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τυποποιημένες ονομασίες των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου.

Σειρά	Προσθήκη	Χαρακτηριστική ιδιότητα	Κύριες Εφαρμογές
2xx.x	Χαλκός (Cu) και άλλα στοιχεία σε μικρότερο ποσοστό	Θερμικώς κατεργάσιμα. Χύτευση σε άμμο και σε μόνιμο τύπο.	Αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία εξαρτήματα μηχανών.
3xx.x	Πυρίτιο (Si), Χαλκός (Cu)	Θερμικώς κατεργάσιμα Χύτευση σε άμμο, μόνιμο τύπο και χύτευση υπό πίεση.	Αυτοκινητοβιομηχανία, έμβολα Μ.Ε.Κ., αντλίες.
4xx.x	Πυρίτιο (Si)	Μη θερμικώς κατεργάσιμα. Χύτευση σε άμμο, σε μόνιμο τύπο και χύτευση υπό πίεση.	Οδοντιατρικές εφαρμογές, ναυπηγική και αρχιτεκτονικές εφαρμογές.
5xx.x	Μαγνήσιο (Mg)	Μη θερμικώς κατεργάσιμα. Χύτευση σε άμμο, σε μόνιμο τύπο και χύτευση υπό πίεση.	Τμήματα αεροσκαφών, εξαρτήματα αυτοκινητοδρόμων, σκεύη μαγειρικής.
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη ονομασία		
7xx.x	Ψευδάργυρος (Zn)	Θερμικώς κατεργάσιμα. Χύτευση σε άμμο και μόνιμο τύπο.	Εξοπλισμός εξορύξεων, εξοπλισμός γραφείων, επιπλοποιία.
8xx.x	Κασσίτερος (Sn)	Θερμικώς κατεργάσιμα. Χύτευση σε άμμο και σε μόνιμο τύπο.	Έδρανα και δακτύλιοι όλων των τύπων.
9xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη ονομασία		

**Πίνακας 2.4** Οι τυποποιημένες σειρές κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου

Στη συνέχεια περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου άνα σειρά κραμάτων και οι κύριες εφαρμογές τους.

### **2xx.x Χυτευτά κράματα Αλουμινίου-Χαλκού (Al-Cu cast alloys)**

Τα κράματα αυτά περιέχουν χαλκό (1-10%, συνήθως όμως 3-4,5%) πυρίτιο , ψευδάργυρο , μαγνήσιο και πολλές φορές μικρές ποσότητες νικελίου κοβαλτίου κλπ. Ο χαλκός βελτιώνει τις χυτευτικές ιδιότητες (χυτεύονται σε «κοχύλι» και στο χώμα) και αυξάνει τη μηχανική αντοχή μειώνοντας όμως την αντίσταση στη διάβρωση. Για το λόγο αυτο προστίθεται μαγνήσιο. Η προσθήκη ψευδαργύρου βελτιώνει την κατεργασιμότητα μειώνει όμως την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. [7] Το εύρος αντοχής των κραμάτων της 2xx.x κυμαίνεται από 131 έως 450 Mpa [10]

Κάποια κράματα της σειράς αυτής ονομάζονται και ντουραλουμίνια και έχουν ιδιαίτερα υψηλή ανθεκτικότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κράμα 201.0/AlCu<sub>4</sub>Ti που επιδέχεται θερμική κατεργασία. Λόγω της ανθεκτικότητας αυτής και της αντοχής τους ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες κράματα αυτής της σειράς χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική, σε εξαρτήματα υψηλής αντοχής εργαλειομηχανών, σε εξαρτήματα αυτοκινήτων και μηχανών κλπ. Τέλος σημειώνεται το μειονέκτημα πολλών κραμάτων της συγκεκριμένης σειράς το οποίο είναι η χαμηλή τους συγκολλησιμότητα με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.[6,11]

### **3xx.x Χυτευτά κράματα Αλουμινίου-Πυριτίου-Μαγνησίου (Al-Si-Mg cast alloys)**

Αν σε κράματα αλουμινίου-πυριτίου προστεθεί μαγνήσιο σε ποσοστό 0,5-1,5% επιτυγχάνεται παραγωγή κραμάτων υψηλότερης μηχανικής αντοχής, διότι γίνεται δυνατή η βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων με θερμική κατεργασία ενώ παράλληλα αποκτούν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη μηχανική αντοχή, αντίσταση στη διάβρωση και ευχυτότητα. Επίσης κράματα αυτής της σειράς χρησιμοποιούνται σε έμβολα Μ.Ε.Κ. λόγω καλής μηχανικής αντοχής σε υψηλές



θερμοκρασίες και μικρού συντελεστή διαστολής.[7] Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 131 και 275 MPa. [10]

Χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα της σειράς είναι η εύκολη χυτευσή τους (χυτεύονται με τις περισσότερες τεχνικές ακόμα και σύγχρονες όπως η «θιξοχύτευση» και η μέθοδος squeeze) λόγω ευχυτότητας και οι υψηλές μηχανικές αντοχές που μπορούν να παρουσιάσουν ύστερα από κατάλληλη θερμική κατεργασία. Ακόμα λόγω της παρουσίας του πυριτίου εμφανίζεται μεγάλη ελαστικότητα γεγονός που οδηγεί σε πλήθος εφαρμογών.

Εφαρμογές των κραμάτων αυτών βρίσκονται σε πιστόνια Μ.Ε.Κ., κίβωτια ταχυτήτων σε αντλίες , ηλεκτρολογικά εξαρτήματα αλλά και σε εξαρτήματα μεγάλης πολυπλοκότητας.[10]

#### **4xx.x Χυτευτά κράματα Αλουμινίου-Πυριτίου (Al-Si cast alloys)**

Με την προσθήκη πυριτίου σε ποσοστά μεταξύ 10% έως 18% προκύπτουν κράματα με ανώτερες χυτευτικές ιδιότητες. Χυτεύονται σε «χώμα» «κοχύλι» και χυτόπρεσσα. Συγκεκριμένα τα κράματα αυτά εμφανίζουν μεγάλη ρευστότητα , μικρή συστολή στη φάση της στερεοποίησης και χαμηλό σημείο πλήρους τήξης ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν πυρίτιο σε ποσοστό 11-13% καθώς το πυρίτιο σχηματίζει με το αλουμίνιο ευτηκτική σύσταση για περιεκτικότητα 11,5%. Επίσης τα κράματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση δεν μπορούν όμως να σκληρυνθούν με θερμική κατεργασία. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό έχει εύρος 131-275 MPa.[7,10]

Τα κράματα της σειράς αυτής επειδή εμφανίζουν εξαιρετικές χυτευτικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χυτών πολύπλοκου σχήματος με μικρή έως μέση μηχανική αντοχή και αντοχή σε κόπωση όπως για παράδειγμα κελύφη ηλεκτρικών κινητήρων , πλαίσια φωτογραφικών μηχανών, εξοπλισμό οδοντιατρικών κλπ.

### **5xx.x Χυτευτά κράματα Αλουμινίου-Μαγνησίου (Al-Mg cast alloys)**

Με την προσθήκη σε τιμές 4-10% μειώνεται μεν η ευχυτότητα του κράματος αυξάνεται όμως η μηχανική αντοχή και η αντίσταση στη διάβρωση. Στα κράματα μεγάλης περιεκτικότητας σε μαγνήσιο (άνω του 8%) οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να αυξηθούν περαιτέρω με ειδική θερμική κατεργασία και συγκεκριμένα με υπερβαφή. Χυτεύονται σε άμμο και σε χύτευση υπό πίεση. Όσον αφορά τη συγκολλησιμότητα τα κράματα υψηλής περιεκτικότητας συγκολλώνται είτε με ηλεκτροσυγκόλληση τόξου σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου είτε με σκληρή ετερογενή συγκόλληση (ραβδος Al/Si). Το δεύτερο είδος συγκόλλησης εφαρμόζεται στα κράματα που είναι πιο φτωγά σε μαγνήσιο.

Η σειρά αυτή κραμάτων χρησιμοποιείται σε χυτά εξαρτήματα πλοίων αφού έχει το πλεονέκτημα της υψηλής μηχανικής αντοχής και την αντίστασης στη διάβρωση ακόμα και αυτής που οφείλεται στο θαλασσινό νερό. Επιπλέον χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για κατασκευή κιβωτίων ταχυτήτων.[7] Τέλος, λόγω της καλής τους εμφάνισης και φινιρίσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μαγειρικά σκεύη, κουφώματα παραθύρων και πορτών κλπ.

### **7xx.x Χυτευτά κράματα Αλουμινίου-Ψευδαργύρου (Al-Zn cast alloys)**

Στα κράματα αυτά προστίθεται σε αρκετές περιπτώσεις και μαγνήσιο. Χαρακτηριστικό μειονέκτημα των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η δύσκολη χυτευσή τους και το ότι χρειάζεται πάροδος μεγάλου χρονικού διαστήματος για να λάβουν τη μέγιστη μηχανική αντοχή και αυτή επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της γήρανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [10]. Οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από την ταχύτητα απόψυξης, έχουν όμως το πλεονέκτημα ότι μένουν σταθερές σε όλο το πάχος του χυτού.

Τα κράματα αυτά λόγω και της δυσκολίας χυτευσής τους χρησιμοποιούνται μόνο όπου η εμφάνιση και το φινιρίσμα του προϊόντος παίζει ρόλο όπως έπιπλα, εργαλεία κηπουρικής και λοιπά.



## **8xx.x Χυτευτά κράματα Αλουμινίου-Κασσίτερου (Al-Sn)**

Όπως και τα κράματα της σειράς 7xx.x τα κράματα αυτής της σειράς είναι δύσκολο να χυτευτούν και χυτεύονται σε άμμο και σε μόνιμο μεταλλικό τύπο. Είναι επίσης θερμικώς κατεργάσιμα και εμφανίζουν καλή κατεργασιμότητα. Χρησιμοποιούνται και αυτά σε περιπτώσεις που χρειάζεται καλής ποιότητας εμφάνιση και φινίρισμα καθώς και την κατασκευή ρουλεμάν.[10]

### **2.4 Βασικές Κατεργασίες αλουμινίου (κωδικοποίηση)**

Πέρα από τους τέσσερις αριθμούς της κωδικοποίησης των κραμάτων αλουμινίου, η ονοματολογία περιλαμβάνει και κάποια χαρακτηριστικά γράμματα τα οποία είναι δηλωτικά της κατεργασίας στην οποία έχει υποβληθεί το κράμα. Τα σύμβολα αυτά φαίνονται παρακάτω και παρέχονται από την Συνομοσπονδία Αλουμινίου (Aluminium Association):

**F** Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.

**O** Ανόπτηση

**H** Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης

**H1X** Μόνον ενδοτράχυνση (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης)

**H11** Κράμα ελάχιστης σκληρότητας

**H12** Κράμα σκληρυμένο κατά 25 %

**H14** Κράμα σκληρυμένο κατά 50 %

**H16** Κράμα σκληρυμένο κατά 75

**H18** Κράμα σκληρυμένο κατά 100

**H19** Υπέρσκληρο κράμα





**H2X** Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το

X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.

**H3X** Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία

σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.

**T** Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση

**T1** Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.

**T2** Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.

**T3** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.

**T4** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.

**T5** Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.

**T6** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.

**T7** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.

**T8** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία εν



ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.

**T9** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση καλή  
κατεργασία εν ψυχρώ.

**T10** Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν  
ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.

**W** Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα  
κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.



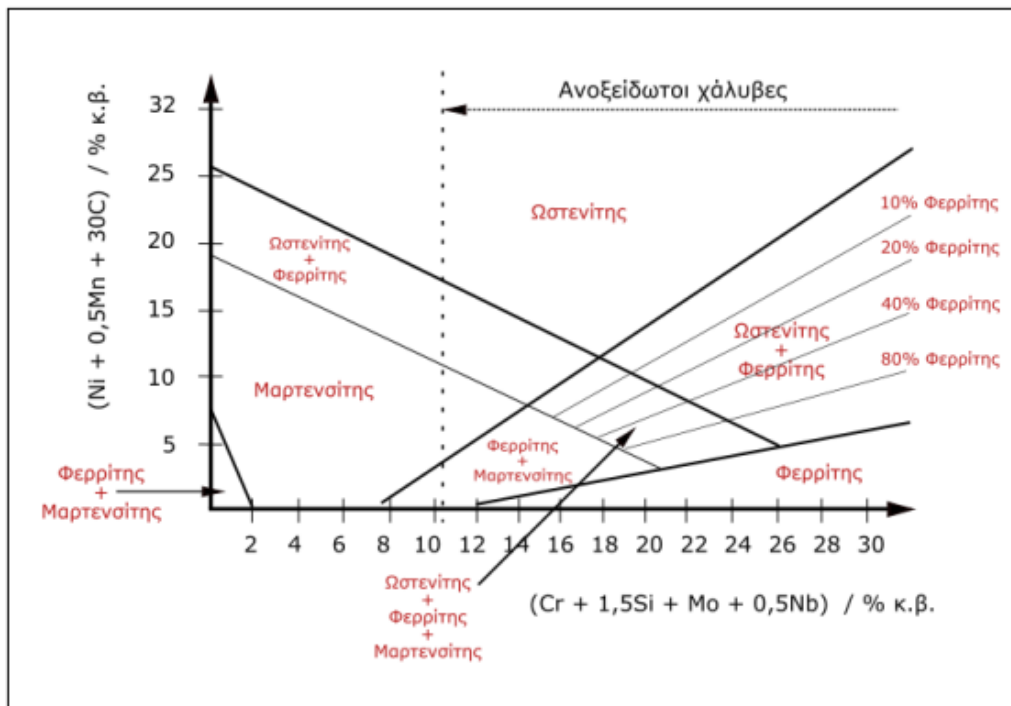
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι ένα κράμα σιδήρου και άνθρακα και είναι ένα από τα πιο σύνθετα και ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά, λόγω της αφθονίας του σιδήρου στον φλοιό της γης, της υψηλής θερμοκρασίας τήξης του σιδήρου (1534 °C), μια σειρά από μηχανικές ιδιότητες, όπως μέτριο (200-300 MPa) όριο διαρροής, με εξαιρετική ολκιμότητα σε πέραν των 1400 MPa τάση διαρροής, με δυσθραυστότητα έως 100 MPa/m<sup>2</sup>, και συναφείς μικροδομές που παράγονται από μετασχηματισμούς φάσης στερεάς κατάστασης με μεταβολή του ρυθμού ψύξης από την ωστενιτική κατάσταση

Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν σε μικρές ποσότητες κραματικά στοιχεία τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές και τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Το ποσοστό δηλαδή των στοιχείων αυτών είναι τέτοιο σε κάθε χάλυβα, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες για την αντίστοιχη εφαρμογή. [18]

Με κριτήριο το κύριο συστατικό της φάσης της μικροδομής οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε ωστενιτικούς, μαρτενσιτικούς και φερριτικούς (Σχ. 3.1) .[25,6]



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα Schaffler κατάταξης των ανοξείδωτων χάλυβων.

### 3.1 Ο Χάλυβας 316-L

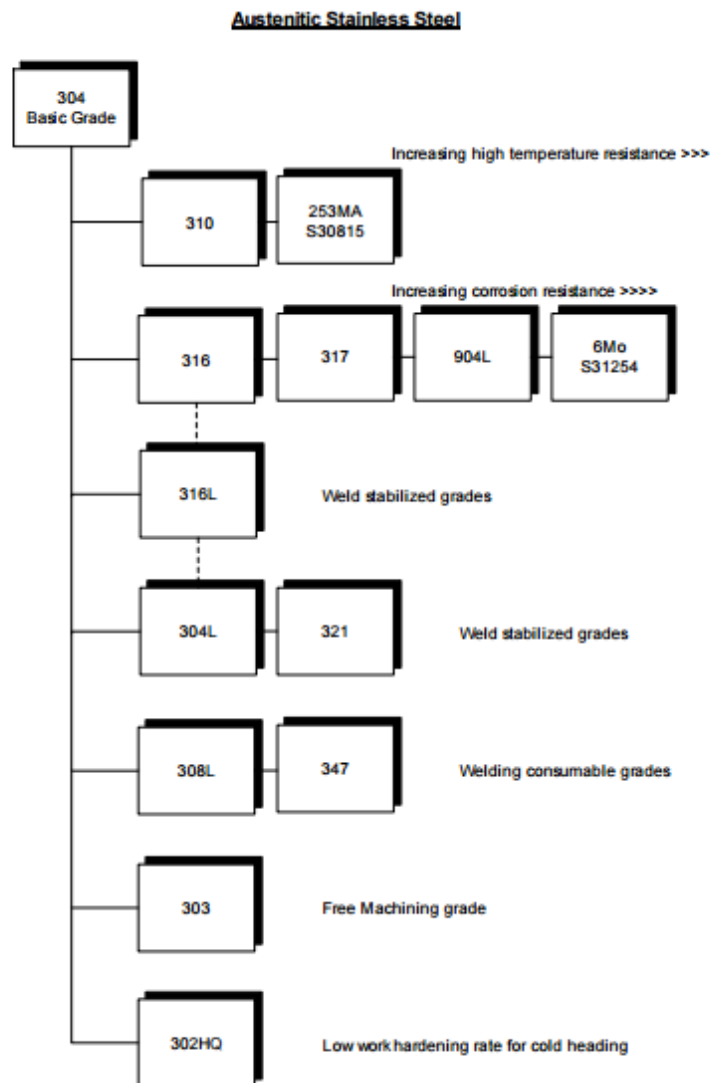
Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στον ανοξείδωτο χάλυβα 316-L καθώς είναι το υλικό των φολίδων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

Ο χάλυβας 316 ανήκει στην κατηγορία των ωστενιτικών χάλυβων. Κύριο κραματικό του στοιχείο αποτελεί το μολυβδαίνιο το οποίο προσδίδει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και κυρίως μεγάλη αντοχή σε διάβρωση σε χλωριούχο περιβάλλον.

Ο χάλυβας 316-L αποτελεί μια εκδοχή του χάλυβα 316 με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και είναι απρόσβλητος από την ευαισθητοποίηση (καθίζηση του καρβιδίου στα όρια των κόκκων) , ως εκ τούτου χρησιμοποιείται σε βαρέως τύπου συγκολλήσεις μεταλλικών μερών (πάχος άνω των 6mm).

Η ωστενιτική δομή προσδίδει άριστη σκληρότητα ακόμα και σε κρυογενείς θερμοκρασίες. Εν συγκρίσει με τους χρωμιούχους ή τους νικελιούχους ανοξείδωτους

ωστενιτικούς χάλυβες ο χάλυβας 316-L εμφανίζει εντονότερο/υψηλότερο ερυσμό, υψηλότερο όριο διαρροής και αντοχή σε εφελκυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες.[26,27]



**Σχήμα 3.2** Οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται η σύσταση του χάλυβα 316-L και οι κύριες φυσικοχημικές και μηχανικές του ιδιότητες.



<b>Κραματικά στοιχεία του χάλυβα 316L</b>	<b>Χημική σύσταση (% κ.β.)</b>
Ανθρακας	: 0.03 max
Μαγγάνιο	: 2.00 max
Φώσφορος	: 0.045 max
Θείο	: 0.03 max
Πυρίτιο	: 0.75 max
Χρώμιο	: 16.00 – 18.00
Νικέλιο	: 10.00 – 14.00
Μολυβδαίνιο	: 2.00 – 3.00
Άζωτο	: 0.10 max

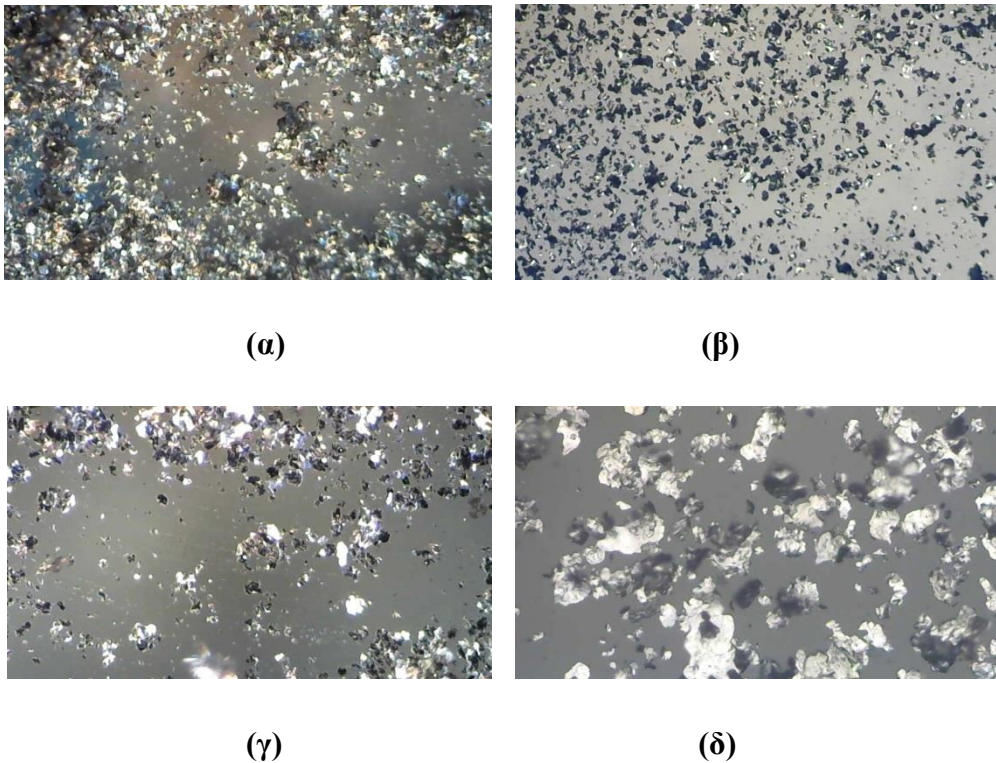
*Πίνακας 3.1 Κραματικά στοιχεία του χάλυβα 316-L*

<b>Ιδιότητα</b>	<b>Τιμή</b>
Πυκνότητα	: 8.027 gr/cm <sup>3</sup>
Ηλεκτρική Αντίσταση (20°C)	: 74 microhm-cm
Θερμική αγωγιμότητα (100°C)	: 16.2 W/m•K
Θερμική αγωγιμότητα (500°C)	: 21.4 W/m•K
Μέτρο Ελαστικότητας (σε ένταση)	: 193 x 10 <sup>3</sup> MPa
Μέτρο Ελαστικότητας (σε στρέψη)	: 77 x 10 <sup>3</sup> MPa
Μαγνητική διαπερατότητα	: H = 200 Oersteds
Σημείο τήξης	: 1371 – 1399 °C

*Πίνακας 3.2 Ιδιότητες του χάλυβα 316-L*

### **3.2 Παρασκευή σκόνης χάλυβα**

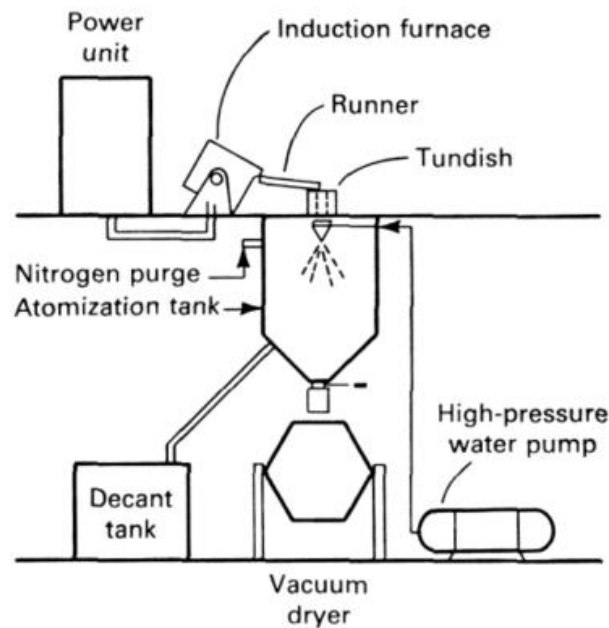
Για την παραγωγή σκόνης χάλυβα χρησιμοποιείται η μέθοδος atomization με δέσμες είτε νερού είτε αέρα. Οι δύο αυτές μέθοδοι περιγράφονται στην παρούσα παράγραφο.



*Εικόνα 3.1 Μικροσκοπική απεικόνιση φολιδών χάλυβα (α) φακός x5, (β) φακός x5, (γ) φακός x10, (δ) φακός x20.*

#### **3.2.1 Water atomization**

Η διάταξη της μεθόδου αυτής (Σχ. 3.3) περιλαμβάνει μία πηγή ισχύος, έναν κλίβανο ρευστοποίησης, μια δεξαμενή atomization κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα, και μια δεξαμενή συγκέντρωσης. Στην περίπτωση του ανοξείδωτου χάλυβα, οι φούρνοι υψηλής συχνότητας είναι πιο διαδεδομένοι γιατί επιτρέπουν μέσω εγκατεστημένου συστήματος ανάδευσης την σωστή ανάμιξη των κραματικών στοιχείων που περιέχονται στο χάλυβα.

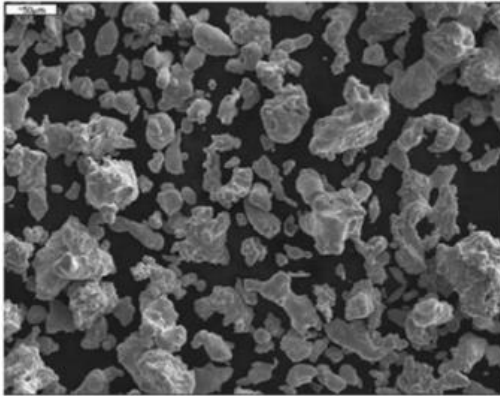


Σχήμα 3.3 Διάταξη μεθόδου water atomization

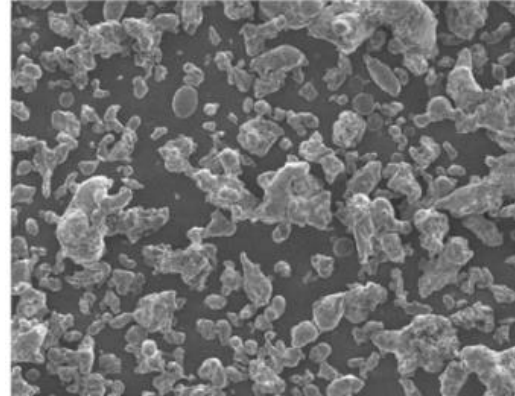
Αφού ξεπεραστεί ελαφρώς η θερμοκρασία ρευστοποίησης του μετάλλου (περίπου 50 με 75°C) ο κλίβανος παίρνει κατάλληλη κλίση ώστε το ρευστό μέταλλο να οδηγηθεί διαμέσου μιας αυλάκωσης σε έναν κατανεμητή (μπέκ) ο οποίος αναλαμβάνει την έγχυση του ρευστού με τη μορφή προκαθορισμένου λεπτού στρώματος στην δεξαμενή atomization στην οποία το ρευστό μέταλλο παίρνει κοινιώδη μορφή. Η οξείδωση της μεταλλικής σκόνης μειώνεται σημαντικά με μείωση της θερμοκρασίας της έγχυσης ή του atomization (ψεκασμού).[12] Βέβαια, πρέπει να υπολογιστεί ότι μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας, τόσο ώστε να επιστρέψει το ρευστό μέταλλο στη θερμοκρασία τήξης, του μπορεί να οδηγήσει σε στερεοποίηση του μέσα στο ακροφύσιο του κατανεμητή (tundish).

Οι παραγωγείς σκόνης χάλυβα δίνουν μεγάλη έμφαση στην επιλογή κατάλληλων κεφαλών atomization ώστε να επιτευχθούν μεγάλης πίεσης δέσμες νερού για αποτελεσματική atomization και μεγάλη παραγωγή σκόνης.





(α)



(β)

*Εικόνα 3.2 (α,β) Μικροσκοπική απεικόνιση σκόνης χάλυβα.*

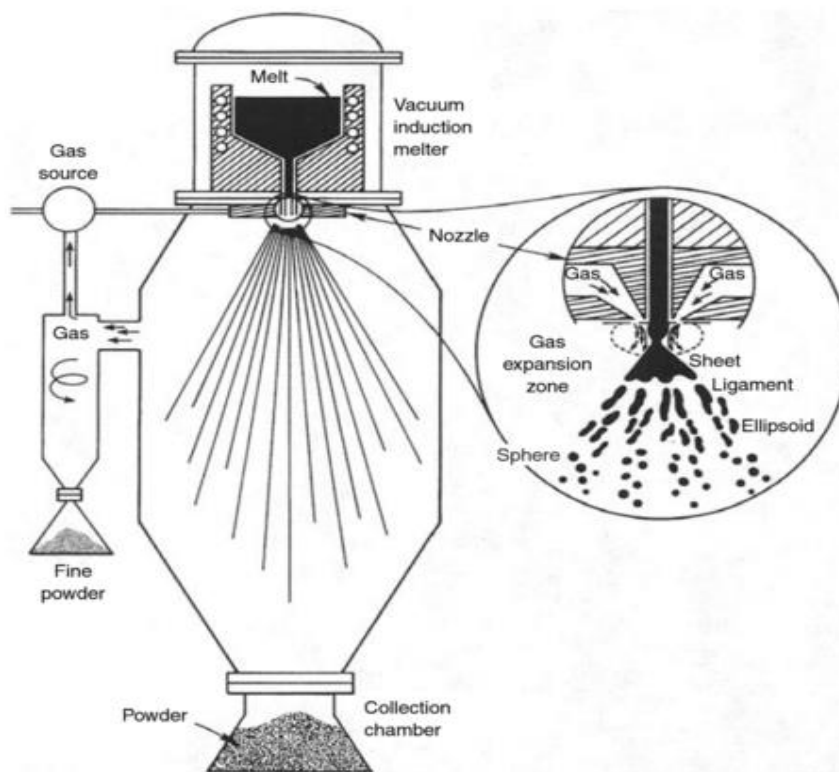
### **3.2.2 Gas atomization**

Στη μέθοδο αυτή η ρευστοποίηση του μετάλλου πραγματοποιείται σε προστατευτικό περιβάλλον ή σε κενό αέρος προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση των συστατικών του. Η διάταξη της μεθόδου αυτής (Σχ. 3.4), σχεδιάζεται για συλλογή της σκόνης σε ξηρή μορφή και η δεξαμενή του atomization έχει μεγάλο ύψος (6-10m) για να εξασφαλίζεται η στερεοποίηση των σωματιδίων της σκόνης μέχρι αυτά να φτάσουν στον πυθμένα της.

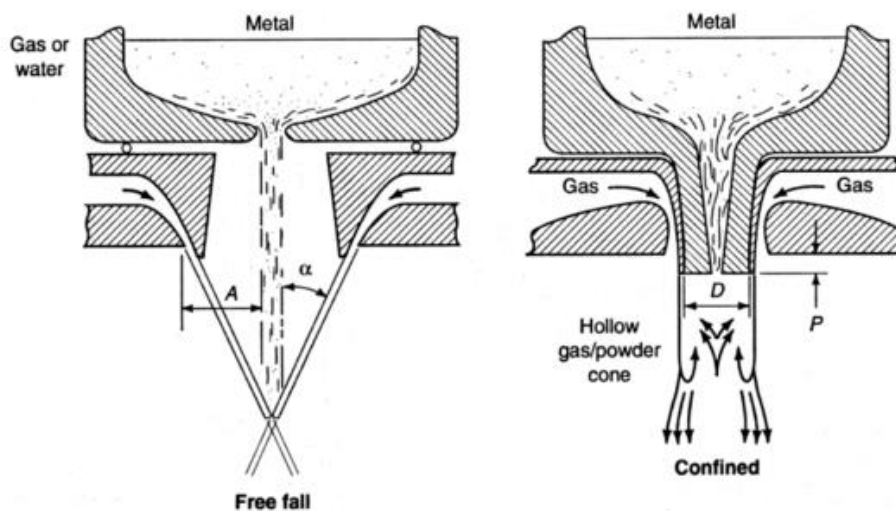
Εκτός από την κάθετη υπάρχει και η οριζόντια τοποθετημένη διάταξη με οριζόντια τοποθετημένη δεξαμενή atomization όπου επίσης περιορίζεται η οξείδωση. Στη μέθοδο αυτή, η ρευστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ελεύθερη ατμόσφαιρα. Η οριζόντια διατεταγμένη παραγωγή είναι οικονομικότερη της κάθετης.

Λόγω της απουσίας οξείδωσης κατά την atomization, πρακτικά η σκόνη έχει διατηρήσει την ίδια χημική σύσταση με το ρευστό μέταλλο. Τα επίπεδα οξειδίων είναι αρκετά χαμηλά δηλαδή της τάξης των 200 ppm (parts per milion).

Οι κεφαλές που χρησιμοποιούνται στην gas atomization μέθοδο φαίνονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.4 Διάταξη της Gas atomization.



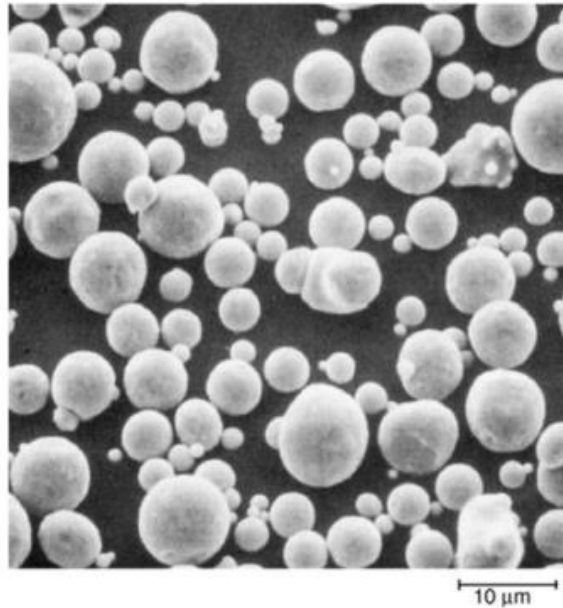
Σχήμα 3.5 Όψη σε τομή κεφαλών gas atomizing.



Η σύζευξη των κεφαλών προυποθέτει την πολύ μικρή απόσταση μεταξύ του υγρού μετάλλου και των κεφαλών εκτόξευσης αέρα υψηλής πίεσης στην κορυφή του ακροφυσίου ώστε να βελτιστοποιηθεί η μεταφορά ενέργειας από τον αέρα στο υγρό μέταλλο με σκοπό την πιο αποτελεσματική atomization. Ένα άλλο όφελος του ανωτέρω σχεδιασμού είναι ότι έτσι παράγονται σωματίδια πιο περιορισμένης κατανομής μεγέθους πράγμα που είναι επικερδές από πολλές απόψεις. Ουσιαστικά, όσο πιο λεπτό είναι το ρεύμα του ρευστού μετάλλου που υπόκειται στην υψηλής πίεσης δέσμη αέρα τόσο πιο ομοιόμορφη είναι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση και τόσο πιο περιορισμένη η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της σκόνης.

Οι ομόκεντρα τοποθετημένες gas atomization κεφαλές δημιουργούν ένα κυλινδρικό φιλμ γύρω από το ρευστό μέταλλο. Οι αποκλίσεις της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων αυξάνονται με την αύξηση του ρυθμού ροής του μετάλλου που σημαίνει ότι συνολικά η κατανομή γίνεται πιο μεγάλου εύρους. Αρκετές παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν καθώς υπάρχει και εδώ ο κίνδυνος του παγώματος του ρευστού στο ακροφύσιο. Επίσης και σ' αυτή τη μέθοδο όπως και στο water atomization το μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πίεση του μέσου ψεκασμού.

Γενικά, με τη μέθοδο του gas atomization δεν μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες σκόνης και αυτό οφείλεται στο αναποτελεσματικό και ανομοιόμορφο atomization όταν αυξάνεται ο ρυθμός έγχυσης του μετάλλου χρησιμοποιώντας μεγαλύτερης διαμέτρου ακροφύσιο. Η τεχνική Wideflow [13] αποτελεί μια λύση του προβλήματος αυτού και βοηθάει την μελλοντική παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων σκόνης επιθυμητών προδιαγραφών. Η φιλοσοφία της τεχνικής αυτής έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται μια μικρή γραμμική θυρίδα στην οποία πραγματοποιείται προσβολή υγρού μετάλλου από αέρα υψηλής ενέργειας η οποία εξασφαλίζει μικρής διαμετρου σωματίδια και ταυτόχρονα μεγάλο ρυθμός παραγωγής.



Εικόνα 3.3 Μικροσκοπική απεικόνιση σκόνης χάλυβα παραχθείσας με gas atomization

### **3.3 Επεξεργασία της σκόνης χάλυβα**

Μετά το water atomization η σκόνη αποξηραίνεται και φιλτράρεται. Αφού περάσει μια σειρά ελέγχων ποιότητας είναι έτοιμη για χρησιμοποίηση.

#### **Αποξήρανση και φιλτράρισμα**

Μετά την διαδικασία του water atomization τα σωματίδια της σκόνης που βρίσκονταν στο μίγμα σκόνης – νερού στη δεξαμενή απαλλάσσονται από την επιπλέον υγρασία. Αυτό επιτυγχάνεται με φυγοκέντριση, φιλτράρισμα, με διεργασίες υπό κενό αέρος, με θερμική επεξεργασία η με συνδυασμό κάποιων από τα προηγούμενα.

Η ξηρή πλέον σκόνη υποβάλλεται σε μια διαδικασία «κοσκινίσματος» για να διαχωριστούν τα υπερμεγέθη σωματίδια (π.χ. άνω των 149μm) ή για τη δημιουργία σκονών διάφορων μεγεθών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φιλτραρίσματος.



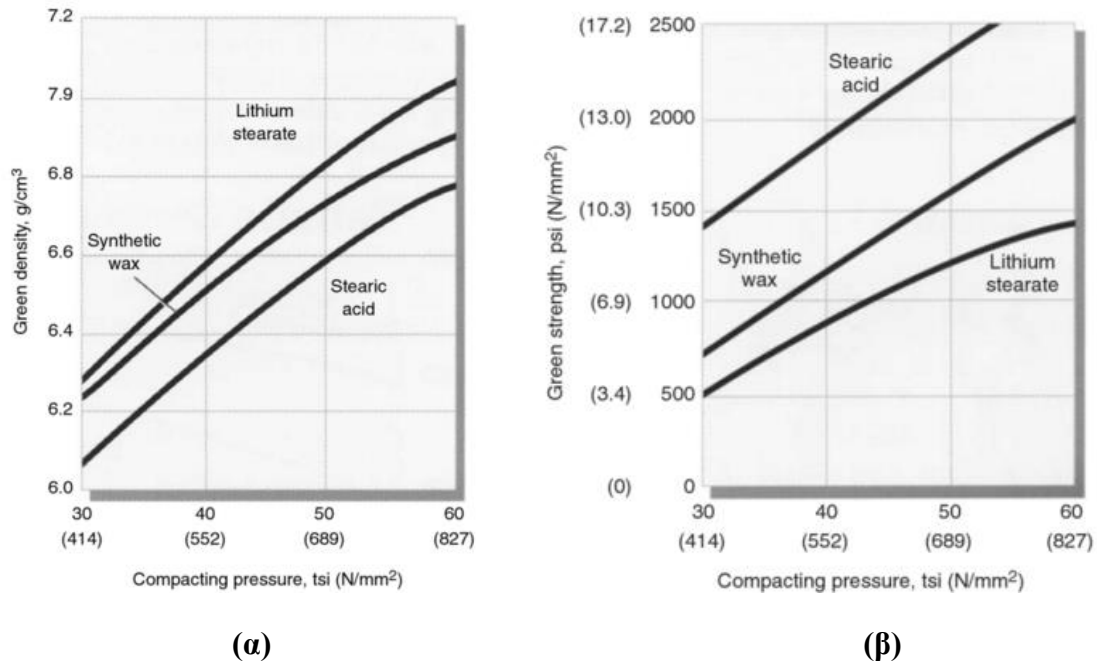
### Ανόπτηση

Οι ωστενιτικής δομής σκόνες χάλυβα συνήθως χρησιμοποιούνται στην κατάσταση που έχουν αμέσως μετά το atomization. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (<0,03%) πολλοί χάλυβες (π.χ. 410 L) εμφανίζουν φερριτική μικροδομή και αρκετά καλές ιδιότητες συμπίεσης. Παρόλα αυτά, λόγω της παρουσίας αρκετών εκατοντάδων μερών ανά εκατομμύριο (parts per million) άνθρακα και αζώτου οι ιδιότητες της σκόνης μπορούν να βελτιωθούν με ανόπτηση. Η ανόπτηση οδηγεί την σκόνη σε μια ελαφριά πυροσυσσωμάτωση. Με ενός είδους άλεσμα επανέρχεται η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, ο ρυθμός ροής της σκόνης και η πυκνότητά της.

### Λίπανση

Τα δύο πιο διαδεδομένα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται για τη λίπανση των σκονών ανοξειδωτου χάλυβα είναι το Stearate λιθίου και Acrawax C. Τα λιπαντικά χρησιμοποιούνται κυρίως για να μειωθεί η τριβή στα τοιχώματα της μήτρας και η φθορά του εργαλείου κατά τη διαδικασία της συμπίεσης. Για τον περιορισμό φθοράς του εργαλείου το ποσοστό προσθήκης κυμαίνεται μεταξύ 0,75 και 1%. Ωστόσο η λίπανση μπορεί να έχει και άλλες λειτουργίες και οφέλη. Στο σχήμα φαίνεται η επίδραση τριών διαφορετικών λιπαντικών στην πυκνότητα και αντοχή του χάλυβα 316L. Οι παραγωγείς σκόνης πολλές φορές συνδυάζουν τα οφέλη που προσδίδει κάθε λιπαντικό ανάλογα το σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί η σκόνη.

Σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα για τα «συνδυασμένα» λιπαντικά φαίνεται ότι είναι εφικτή η ενίσχυση της αντοχής χωρίς μείωση της συμπιεστότητας και των απαιτήσεων φορτίου εξόλκευσης [14]. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στις σκόνες ανοξειδωτου άνθρακα απαιτεί προσεκτικό έλεγχο κατά την διεργασία αποκόλλησης ώστε να επιτευχθούν χαμηλά ποσοστά υπολειμματικών συστατικών άνθρακα.



**Σχήμα 3.4** Διαγραμματική απεικόνιση της επίδρασης τριών λιπαντικών στην πυκνότητα (α) και την green strength (β) της σκόνης χάλυβα [15]

### **3.4 Ιδιότητες σκόνης χάλυβα**

Οι σκόνες χάλυβα (όπως και άλλες μεταλλικές σκόνες) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης μπορούν να χαρακτηριστούν από τρεις κατηγορίες ιδιοτήτων:

- 1) Μεταλλουργικές ιδιότητες
  - Χημική σύσταση και ακαθαρσίες
  - Μικροδομή
  - Μικροσκληρότητα
- 2) Γεωμετρικές ιδιότητες
  - Κατανομή μεγέθους σωματιδίων
  - Εξωτερικό σχήμα σωματιδίων
  - Εσωτερική δομή σωματιδίων (πορώδες)
- 3) Μηχανικές ιδιότητες
  - Ρυθμός ροής
  - Πυκνότητα
  - Συμπιεστότητα, αντοχή



## **Μεταλλουργικές ιδιότητες**

Καθορίζονται με χημική ανάλυση και μεταλλογραφικές διαδικασίες. Η χημική σύσταση μιας φερριτικής δομής σκόνης έχει μεγάλη επίδραση στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης. Οι μη μεταλλικές ακαθαρσίες έχουν μη επιθυμητή επίδραση στην συμπίεστικότητα και στο χρόνο ζωής των εργαλείων συμπίεσης.

## **Γεωμετρικές ιδιότητες**

Πρόκειται ουσιαστικά για την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και το πορώδες τους τα οποία καθορίζουν την ειδική επιφάνεια της σκόνης η οποία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης.

## **Μέγεθος και κατανομή μεγέθους σωματιδίων**

Καθορίζεται από διαδικασία φιλτραρίσματος αν το μέγεθος των σωματιδίων είναι άνω των 45μm. Πιο λεπτές σκόνες ενυδατώνονται και αναλύονται με διάθλαση δέσμης λειζερ.

Το μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται από την πίεση του νερού κατά την atomization. Υψηλές πιέσεις δημιουργούν λεπτές σκόνες και το αντίθετο. Με κατάλληλο συνδυασμό ακροφυσίων (όπως ακροφύσια τύπου V) είναι δυνατή η διαμόρφωση κατάλληλων δεσμών νερού [16] και άρα η παραγωγή ποικίλων κατανομών μεγέθους σωματιδίων.

Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων είναι χαρακτηριστικό μεγάλης σημασίας αφού μικρού εύρους κατανομή σωματιδίων δίνει μεγάλη ποσότητα αξιοποιήσιμης σκόνης. Ειδικότερα το ποσοστό των σωματιδίων μικρής κοκκομετρίας δεν πρέπει να ξεπερνά το 35-55% , για σκόνες ανοξείδωτου χάλυβα που προορίζονται για συμπίεση, αφού για μεγαλύτερο ποσοστό επιδεινώνεται η ρευστότητα της σκόνης. Κάποιες παράμετροι όπως οι κεφαλές της atomization που έχουν άμεσο ρόλο στην αλληλεπίδραση της δέσμης νερού ή αέρα με το υγρό μέταλλο μπορούν να καθορίσουν το εύρος της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων[1,22]



## **Εξωτερικό σχήμα σωματιδίων**

Αναλύεται μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Το σχήμα των σωματιδίων της μεταλλουργικής σκόνης έχει πολύ μεγάλη επιρροή στην φαινόμενη πυκνότητα, στις ιδιότητες ροής και στη συμπιεστότητα της σκόνης. Επίσης επιδρά στις ιδιότητες του προϊόντος της πυροσυσσωμάτωσης.

Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί στατιστικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του σχήματος των σωματιδίων, η πυκνότητα ενός κλάσματος σκόνης μικρού μεγέθους αποτελεί ένα ικανοποιητικό μέγεθος για τον γρήγορο και εύκολο προσδιορισμό του σχήματος των σωματιδίων που μπορεί να συσχετιστεί και με άλλες ιδιότητες της σκόνης.

Οι σκόνες που παράγονται με water atomization έχουν ακανόνιστο σχήμα σωματιδίων παρόλα αυτά μπορεί να παραχθεί ένα μεγάλο εύρος σχήματος σωματιδίων. Ένα τρόπος καθορισμού του σχήματος των σωματιδίων της σκόνης είναι με αλλαγή στη χημική σύσταση αλλά ο φυσικός τρόπος είναι η ανάλογη σχεδίαση των κεφαλών της water atomization. Πολλές φορές αυτό γίνεται εμπειρικά. Οι καταγεγραμμένοι τύποι κεφαλών μπορούν να προσφέρουν σημαντικό αριθμό ειδικών σχεδιασμών [17,24]. Επίσης υφίσταται και η τεχνική water atomization σε δύο βήματα δηλαδή συνδυασμό gas και water atomization. Ο ανεξάρτητος έλεγχος αυτών των δύο μεθόδων μπορεί να βοηθήσει στον προκαθορισμό του σχήματος των σωματιδίων[19].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα επιθυμητό σχήμα σωματιδίων είναι το σφαιρικό ή σχεδόν σφαιρικό τόσο γιατί οι σκόνες αυτές εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα μετά τη συμπίεση όσο και γιατί η ίδια η συμπίεση γίνεται ευκολότερα και γρηγορότερα λόγω της μεγαλύτερης φαινόμενης πυκνότητας η οποία προσδίδει μεγάλο ρυθμό ροής και μικρότερο απαιτούμενο ύψος πλήρωσης της μήτρας. Η χρησιμοποίηση τέτοιου είδους σκόνης είναι εφικτή και στην συμπίεση σε μεγαλύτερη θερμοκρασία η οποία έχει σημαντική επίδραση στην μηχανική αντοχή. [20]





## **Εσωτερική δομή σωματιδίων**

Αναλύεται με τεχνικές μεταλλογραφίας.

## **Ρυθμός ροής**

Ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να διέλθει ποσότητα 50 γραμμαρίων σκόνης από την οπή χωνιού συγκεκριμένων προδιαγραφών. Ο ρυθμός ροής επηρεάζεται από τον τύπο και την ποσότητα του λιπαντικού που έχει αναμιχθεί με τη σκόνη και καθορίζει την ταχύτητα πλήρωσης του εργαλείου συμπίεσης με σκόνη.

## **Φαινομενική πυκνότητα**

Μετράται σε προκαθορισμένου όγκου δοχείο διαιρώντας τη μάζα της σκόνης με τον όγκο του δοχείου. Η πυκνότητα επίσης επηρεάζεται από το λιπαντικό που έχει προσμιχθεί στη σκόνη. Τέλος, καθορίζει το βάθος πλήρωσης του εργαλείου συμπίεσης.

## **Συμπιεστότητα**

Απεικονίζεται από την καμπύλη που προκύπτει από τις τιμές της πυκνότητας μιας σειράς κυλινδρικών δοκιμίων από σκόνη (διαμέτρου 25mm) ανάλογα με την εφαρμοζόμενη πίεση. Η συμπαγής πυκνότητα προκύπτει από τη διαίρεση της μάζας ενός δοκιμίου σκόνης με τον όγκο του. Η πυκνότητα, είναι η συμπαγής πυκνότητα ενός δοκιμίου συμπαγούς σκόνης (διαμέτρου 25mm) το οποίο υποβάλλεται σε πίεση συγκεκριμένης τιμής (4,2 tn/cm<sup>2</sup> ή 600 N/mm<sup>2</sup>). Η συμπιεστότητα μιας σκόνης καθορίζει την πίεση συμπίεσης που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπαγής πυκνότητα.

## **Green strength**

Είναι η αντοχή σε κάμψη ενός (συμπιεσμένου, όχι πυροσυσσωματωμένου) δοκιμίου ορθογωνικής διατομής. Το green strength αυξάνεται με αύξηση της συμπαγούς πυκνότητας και επηρεάζεται φυσικά και από το ποσοστό και τον τύπο του λιπαντικού που έχει προσμιχθεί στη σκόνη. Απαιτείται συγκεκριμένη τιμή green strength ώστε να αποφευχθούν ρωγμές στο δοκίμιο κατά την εξαγωγή από τη μήτρα συμπίεσης αλλά και φθορά του κατά τη μεταφορά του μεταξύ της εργαλειομηχανής συμπίεσης και του



κλίβανου πυροσυσσωμάτωσης. Όσο πιο πολύπλοκο και λεπτομερές είναι το σχήμα ενός προϊόντος της όλης διαδικασίας όσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι το green strength.

### **Spring back**

Είναι η ελαστική επιμήκυνση ενός κυλινδρικού δοκιμίου συμπαγούς σκόνης (25mm) μετά από την εξαγωγή του από τη μήτρα συμπίεσης. Το spring back αυξάνεται με αύξηση της πίεσης συμπίεσης και επηρεάζεται επίσης από την ποσότητα και το τύπο του λιπαντικού που έχει χρησιμοποιηθεί κατά τη λίπανση καθώς και από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεση. Η τιμή του spring back είναι σημαντική για τον υπολογισμό των διαστάσεων του εργαλείου συμπίεσης σε σχέση με τις απαιτούμενες διαστάσεις του συμπαγούς.



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### **4.1 Χύτευση**

Η ενσωμάτωση των φολίδων του ανοξείδωτου χάλυβα στο αλουμίνιο πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της ελεύθερης χύτευσης σε καλούπι θερμοκρασίας 30° C.

#### **4.1.1 Εξοπλισμός Χύτευσης**

Για τη διαδικασία της χύτευσης χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που παρουσιάζεται ακολούθως. Αρχικά, στο αυτόματο πριόνι (Εικ. 4.1α) κόπηκαν τα προς χύτευση κομμάτια αλουμινίου από ορθογωνικής διατομής μπιγιέτα κράματος αλουμινίου υψηλής καθαρότητας (96.66% κ.β.). Αφού κόπηκαν στο κατάλληλο μέγεθος ζυγίστηκαν και τοποθετήθηκαν σε κεραμικό κυάθιο (Εικ. 4.1γ) προκειμένου να εισαχθούν σε ειδικό κλίβανο για να ρευστοποιηθούν.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το σημείο τήξης του αλουμινίου βρίσκεται στην περιοχή 660 - 720 °C. Για να επιτευχθεί η τήξη του αλουμινίου στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός κλίβανος (Εικ. 4.1δ) της εταιρείας Thermawatt (τύπος TGH 38L) ισχύος 10kW, τριφασικής λειτουργίας με τάση 380V και μέγιστης δυναμικότητας 1875 °C.

Αφού ρευστοποιήθηκε πλήρως το αλουμίνιο χυτεύτηκε σε μεταλλικό καλούπι. Το καλούπι που χρησιμοποιήθηκε (Εικ. 4.1στ) αποτελείται από αποσπώμενες πλάκες βαμμένου χάλυβα βάθους 34mm , συγκρατούμενες απο κοχλίες, και ως κάλυμμα της ελεύθερης επιφάνειας του χυτού χρησιμοποιήθηκε δοκίμο επίσης βαμμένου χάλυβα.

Τέλος, προκειμένου να είναι εφικτή η παρακολούθηση της θερμοκρασίας του καλουπιού και του ρευστού αλουμινίου, ενώ αυτό βρισκόταν εντός του κλιβάνου, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό θερμόμετρο υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε παρατίθεται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 4.1.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Εικόνα 4.1 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε: (α) Αυτόματο πριόνι, (β) Ζυγαριά ακριβείας, (γ) Πυρίμαχο κεραμικό δοχείο, (δ) Κλίβανος Thermax watt, (ε) Ηλεκτρονικό θερμόμετρο, (στ) Καλούπι διαμόρφωσης.

#### **4.1.2 Μέτρα προστασίας κατά τη χύτευση**

Οι κυριότεροι κίνδυνοι κατά τη διαδικασία της χύτευσης ήταν η έκθεση στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονταν και η εισπνοή της σκόνης χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, λόγω της πολύ μικρής κοκκομετρίας της. Έτσι, πέραν των μέτρων που λαμβάνονται γενικά κατά την ελεύθερη χύτευση, χρησιμοποιήθηκαν και ειδικές μάσκες επιπέδου προστασίας FFP3. Συγκεντωτικά τα μέτρα προστασίας που ελήφθησαν είναι τα εξής:

- Προστατευτικά πυρίμαχα γάντια (Εικ. 4.2α) προκειμένου να γίνονται οι χειρισμοί χωρίς κίνδυνο εγκαύματος για τα χέρια.
- Δερμάτινη ποδιά ώστε να αποφευχθεί κάποιο έγκαυμα σε περίπτωση που τηγμένο αλουμίνιο έρθει σε επαφή με τον χειριστή, ή ο χειριστής έρθει σε επαφή με τμήμα του κλιβάνου, το καλούπι ή το κεραμικό δοχείο.
- Διαφανή προστατευτικά γυαλιά (Εικ. 4.2β). Η χρησιμότητα τους είναι πολύ μεγάλη καθώς προστατεύουν τα μάτια από αναθυμιάσεις και υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διαδικασία της χύτευσης.
- Λαβίδα (4.2γ). Η λαβίδα δεν αποτελεί μόνο απαραίτητο εργαλείο για τους χειρισμούς που απαιτούνται κατά τη χύτευση αλλά και μέτρο προστασίας αφού εξασφαλίζει ικανή απόσταση μεταξύ κεραμικού δοχείου και χειριστή, καθώς και μεταξύ κλιβάνου και χειριστή, ώστε να προφυλάξει τον τελευταίο από έκθεση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.
- Ειδική αναπνευστική μάσκα τύπου FFP3 (4.2δ). Επειδή η διάμετρος των σωματιδίων της σκόνης χάλυβα είναι πολύ μικρή (44 μm) αυτά δεν φιλτράρονται από τον ανθρώπινο οργανισμό. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η χρήση μάσκας επιπέδου προστασίας FFP3, ώστε να αποφευχθεί η εισπνοή τους.

Βέβαια, τα μέτρα προστασίας όσο αυστηρά κι αν είναι δεν υποκαθιστούν τον ανθρώπινο παράγοντα. Για το λόγο αυτό ο εξοπλισμός του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε μόνο από έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 4.2 Μέτρα προστασίας χύτευσης: (α) πυρίμαχα γάντια, (β) προστατευτικά γυαλιά, (γ) λαβίδα χύτευσης, (δ) προστατευτική μάσκα.

#### **4.1.3 Διαδικασία χύτευσης**

Προπαρασκευαστικό στάδιο της διαδικασίας της χύτευσης αποτελεί η κοπή των δοκιμίων κατάλληλου μεγέθους στο αυτόματο πριόνι. Στη συνέχεια τα δοκίμια καθαρίστηκαν από επικολλημένα ρινίσματα και πλύθηκαν με νερό με σκοπό την απομάκρυνση του λιπαντικού που χρησιμοποιήθηκε κατά την κοπή και που είχε απομείνει στην επιφάνεια τους. Το στάδιο αυτό έχει μεγάλη σημασία καθώς υπολείμματα λιπαντικού θα μπορούσαν να σχηματίσουν ανεπιθύμητα εγκλείσματα στο χυτό και να αλλοιώσουν τις ιδιότητες του.

Τα καθαρής επιφάνειας δοκίμια τοποθετήθηκαν στο ειδικό κεραμικό δοχείο το οποίο με τη σειρά του εισήχθη με τη βοήθεια λαβίδας, με προεκτεταμένα άκρα στον εργαστηριακό κλίβανο (Εικ. 4.3α). Βέβαια αυτό έγινε αφού είχε οριστεί και επιτευχθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία εντός του κλίβανου. Συγκεκριμένα, η



θερμοκρασία αυτή ορίστηκε στους 750°C κατά μέση τιμή με μία απόκλιση της τάξης των 5°C.

Το κεραμικό δοχείο παρέμεινε 55 λεπτά εντός του κλίβανου σε σταθερή θερμοκρασία 750°C ώστε το περιεχόμενο σε αυτό αλουμίνιο να ρευστοποιηθεί πλήρως. Για επιβεβαίωση της θερμοκρασίας του δοχείου και του περιεχομένου του, η θερμοκρασία μετρήθηκε σε κάθε περίπτωση με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού θερμομέτρου.

Στη συνέχεια εξήχθη το δοχείο με τη βοήθεια πάντα της λαβίδας και το υγρής μορφής αλουμίνιο χυτεύθηκε στο χαλύβδινο καλούπι (Εικ. 4.3β), του οποίου η ελεύθερη επιφάνεια καλυπτόταν ακαριαία με το κάλυμμα. Η χρησιμότητα του καλύμματος είναι μεγάλη αφού αφενός εξασφαλίζει την ομοιόμορφη ψύξη του χυτού και αφετέρου ασκεί τόση πίεση ώστε να μειωθεί το πορώδες της εσωτερικής δομής του (τεχνική punch). Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία του καλουπιού είναι 30°C καθώς και το ότι η παραμονή του χυτού εντός του καλουπιού προκειμένου να στερεοποιηθεί είναι 2 λεπτά. Έπειτα τα δοκίμια αφέθηκαν να ψυχθούν σε συνθήκες ατμόσφαιρας δωματίου.





(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 4.3 Στάδια της χύτευσης: (α) τοποθέτηση αλουμινίου στον κλίβανο, (β) χύτευση στο καλούπι, (γ) ψύξη αλουμινίου και (δ) παραχθέν δοκίμιο.

Οι φολίδες χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη χύτευση έχουν τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Χαρακτηριστικά φολίδων Ανοξείδωτου Χάλυβα</b>	
<b>Stainless Steel flakes properties</b>	
Mesh	-325
Mesh (μm)	44
Mesh (inches)	0,0017
Χημική σύσταση ( % κ.β.)	Fe:Cr:Ni:Mo ; 67,5:17:13:2,5
Πάχος (μm)	0,4-1,2
Τύπος χάλυβα	316-L

**Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των φολίδων**

*χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν.*

#### **4.1.4 Παραγθέντα δοκίμια**

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της χύτευσης παρήχθησαν τρεις ομάδες δοκιμίων :

- Επτά (7) δοκίμια κράματος αλουμινίου καθαρότητας 96,66%.
- Επτά (7) δοκίμια του ίδιου κράματος με περιεκτικότητα 0,25% κ.β. σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα (Stainless Steel flakes).
- Επτά (7) δοκίμια του ίδιου κράματος με περιεκτικότητα 0,50% κ.β σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα.

Από τις παραπάνω ομάδες δοκιμίων τρία δοκίμια από κάθε ομάδα υποβλήθησαν σε δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό (Tensile Strength Test), τρία σε δοκιμή αντοχής σε



κάμψη τριών σημείων (Three Point Bending), και ένα δοκίμιο κάθε ομάδας χρησιμοποιήθηκε για μελέτη μεταλλογραφίας.

## **4.2 Μελέτη Μεταλλογραφίας**

Προκειμένου να μελετηθεί η επιφάνεια των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο Leica DMR και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) Jeol JSM 6380-LV. Τα δοκίμια αφού κόπηκαν σε κατάλληλο μέγεθος με χρήση δισκοτόμου, λειάνθηκαν, στιλβώθηκαν και υπέστησαν χημική προσβολή με αντιδραστήριο Keller's.

### **4.2.1 Λείανση των δοκιμίων.**

Για να λειανθούν οι μεταλλικές επιφάνειες χρησιμοποιήθηκε αυτόματος περιστρεφόμενος λειαντικός δίσκος του εργαστηρίου στον οποίο τοποθετήθηκαν τα δοκίμια αφού πρώτα εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη προκειμένου να συγκρατούνται στην κεφαλή της συσκευής η οποία τους ασκούσε πίεση σε κατάλληλα λειαντικά φύλλα καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Η λείανση έγινε σε αρκετά επιμέρους βήματα, δηλαδή τα λειαντικά χαρτιά χρησιμοποιήθηκαν με μειούμενο βαθμό τραχύτητας (grid). Συγκεκριμένα, οι βαθμοί τραχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν προοδευτικά οι εξής: 180, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400, 4000. Τα δοκίμια έμειναν σε επαφή με το κάθε λειαντικό φύλλο έως ότου αποκτήσουν ομοιόμορφη επιφάνεια.



(α)



(β)

**Εικόνα 4.4** (α) Εγκιβωτισμένο δοκίμιο σε ρητίνη και (β) αυτόματος λειαντής

#### **4.2.2 Χημική προσβολή της επιφάνειας των δοκιμίων.**

Προκειμένου να διαβρωθούν τα όρια των κόκκων και να γίνει διακριτή η μικροδομή των δοκιμίων, είναι απαραίτητη η χημική προσβολή των επιφανειών τους. Το χημικό αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε είναι το διάλυμα Keller's του οποίου η σύσταση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Χημική σύσταση αντιδραστηρίου Kellers		
Συστατικό		Ποσότητα (ml)
Απεσταγμένο νερό	(H <sub>2</sub> O)	190
Υδροξείδιο του Νατρίου	(HNO <sub>3</sub> )	5
Υδροχλώριο	(HCl)	3
Υδροφθόριο	(HF)	2

**Πίνακας 4.2** Χημική σύσταση του αντιδραστηρίου Keller's.



Αφού παρασκευάστηκε το αντιδραστήριο έγινε η προσβολή των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια παρέμειναν σε επαφή με το αντιδραστήριο για δεκαπέντε δευτερόλεπτα και εν συνεχεία πλύθηκαν με απεσταγμένο νερό και αιθανόλη.

#### **4.2.3 Μεταλλογραφικός έλεγχος.**

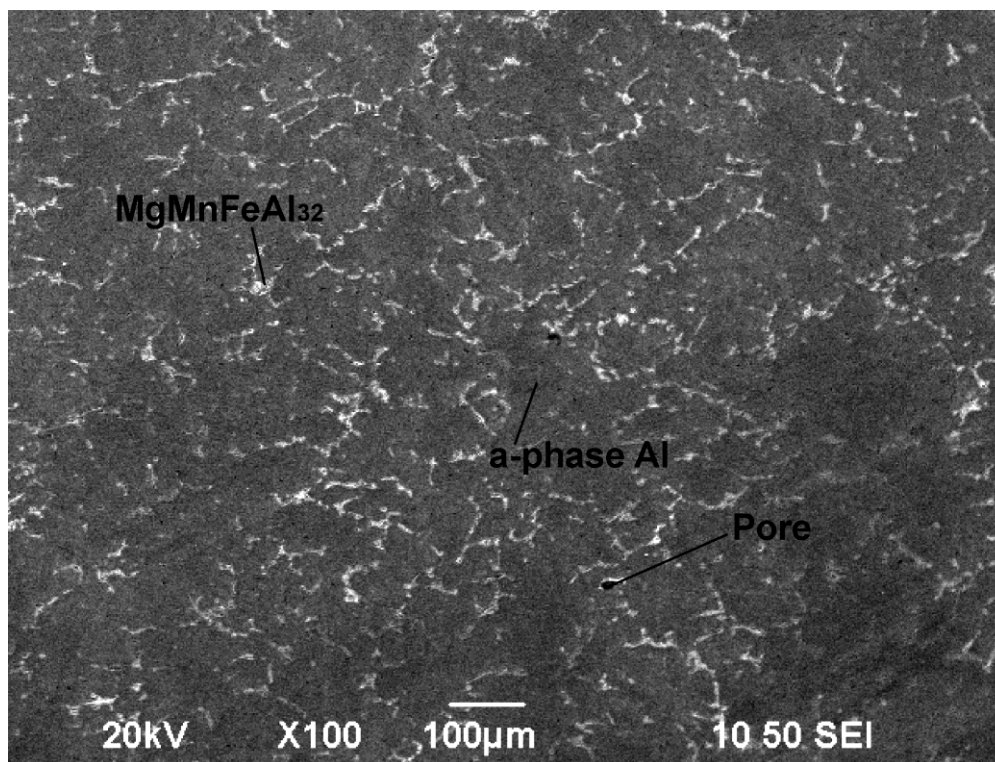
Για να εξεταστεί η μικροδομή των επιφανειών χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο και μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM) από τα οποία ελήφθησαν αντιπροσωπευτικές εικόνες για κάθε ένα από τα τρία δοκίμια, δηλαδή του δοκιμίου αλουμινίου καθαρότητας 96,66% και των δοκιμίων με περιεκτικότητες 0,25% και 0,50% κ.β. σε φολίδες χάλυβα, αντίστοιχα. Οι μικροδομές των εξεταζόμενων δοκιμίων παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.

##### **4.2.3.1 Δοκίμιο αλουμινίου (96,66%).**

Πρόκειται για δοκίμιο από κράμα αλουμινίου καθαρότητας 96,66% , το οποίο περιέχει αρκετά κραματικά στοιχεία, τα κυριότερα από τα οποία είναι το Μαγγάνιο (Mn = 1,08%), το Μαγνήσιο (Mg = 0,976%), ο Σίδηρος (Fe = 0,59376%) και το Πυρίτιο (Si = 0,21376%). Ο πλήρης φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αρχικού κράματος αλουμινίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3. Όπως είναι προφανές από τον πίνακα αυτό, το κράμα αλουμινίου περιέχει πολλούς εκλεπτυντές κόκκων (π.χ. Zr, Sr, κ.ά.).

<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>
0,21376	0,59376	0,30011	1,08012	0,97600	0,04119
<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>Na</b>
0,02244	0,02497	0,00527	0,00371	0,00131	0,01801
<b>Ca</b>	<b>B</b>	<b>Bi</b>	<b>Zr</b>	<b>V</b>	<b>Be</b>
0,02133	0,00011	0,00001	0,00126	0,0,00944	0,00000
<b>Sr</b>	<b>Co</b>	<b>Cd</b>	<b>Sb</b>	<b>Ga</b>	<b>P</b>
0,00020	0,00032	0,00043	0,00327	0,01625	0,00232
<b>Li</b>	<b>As</b>	<b>Hg</b>	<b>Al</b>	<b>FeMn</b>	<b>HeavyMet</b>
0,00011	0,00120	0,00071	96,66310	1,67400	0,00430
<b>FeSi</b>	<b>MgMn</b>	<b>CrMn</b>	<b>FedivSi</b>		
0,80800	2,05600	1,10500	2,77600		

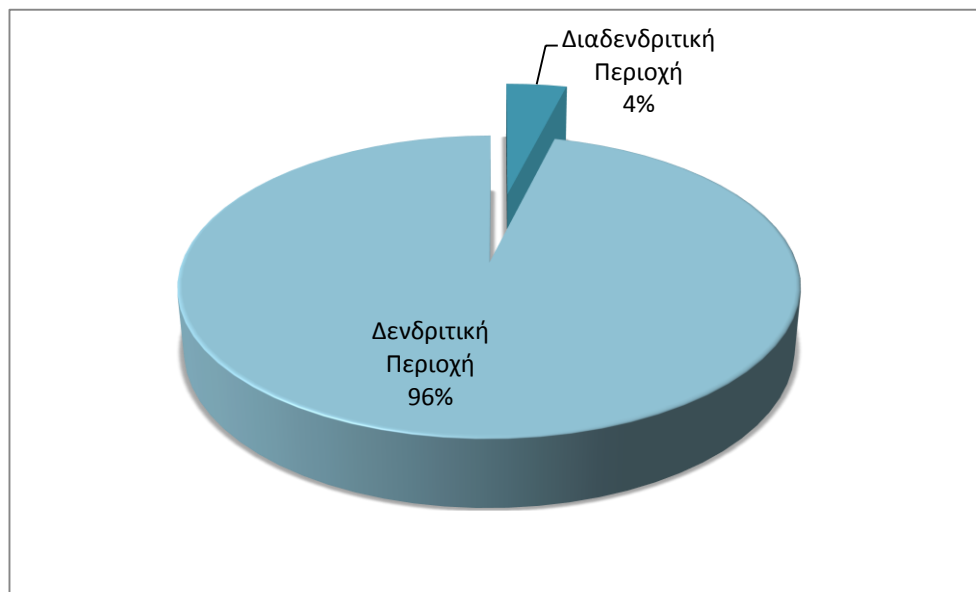
*Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα φασματογράφου για τη σύσταση του χρησιμοποιηθέντος κράματος  
αλουμινίου*



*Εικόνα 4.5 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100)*

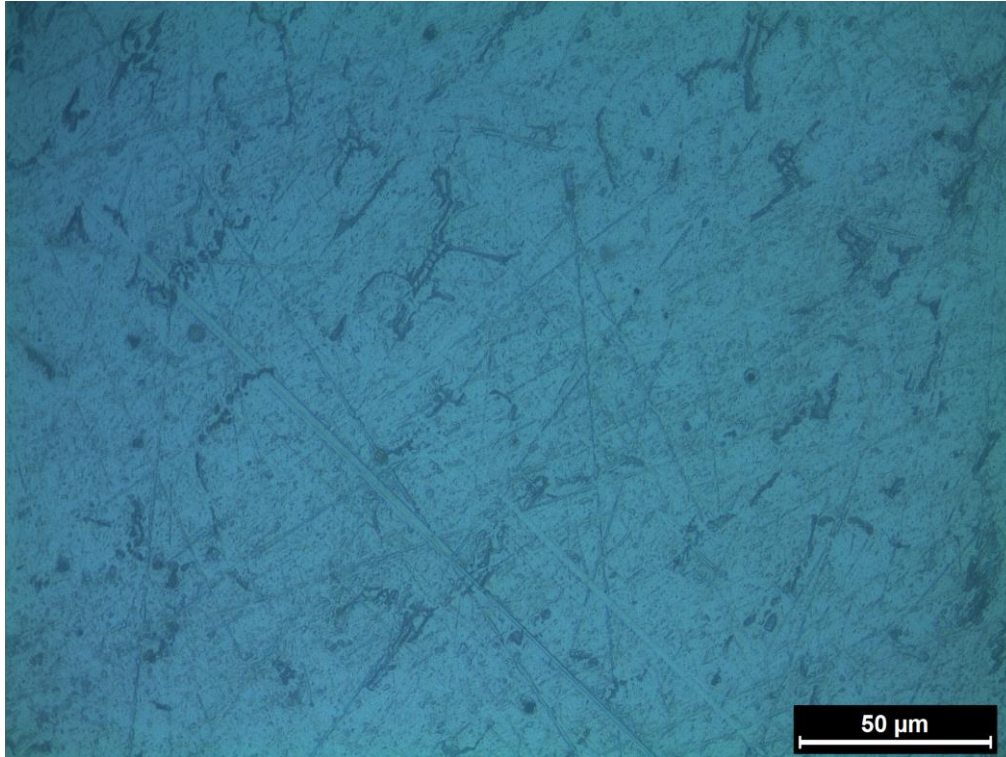


Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται σε μικροσκοπική απεικόνιση (φακός x100) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο το δοκίμιο καθαρού αλουμινίου. Λόγω μεγάλης περιεκτικότητας σε εκλεπτυντές κόκκων του κράματος αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται μεγάλες δενδριτικές περιοχές α-φάσης, αφήνοντας έτσι πολύ μικρές διαδενδριτικές περιοχές βελονοειδούς μορφής και μικρού μήκους. Στις διαδενδριτικές περιοχές παρατηρείται κατακρήμνιση φάσης  $MgMnFeAl_{32}$ . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το εμβαδό της διαδενδριτικής περιοχής ως ποσοστό του συνολικού εμβαδού της επιφάνειας που εξετάστηκε.

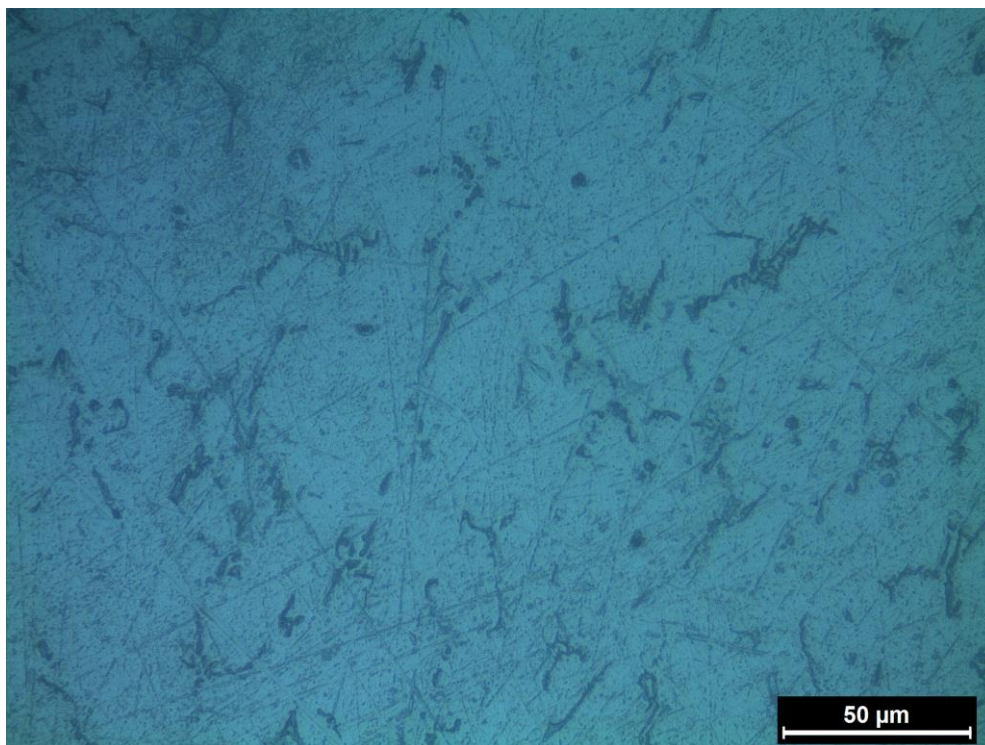


**Σχήμα 4.1 Ποσοστιαία απεικόνιση του εμβαδού της δενδριτικής  
και της διαδενδριτικής περιοχής του δοκιμίου Al.**

Στη συνέχεια παρατίθενται εικόνες οι οποίες ελήφθησαν τόσο από το οπτικό όσο κι από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σε διάφορες μεγεθύνσεις, οι οποίες βοηθούν στην αναλυτικότερη μελέτη των μικροδομών των δοκιμίων.

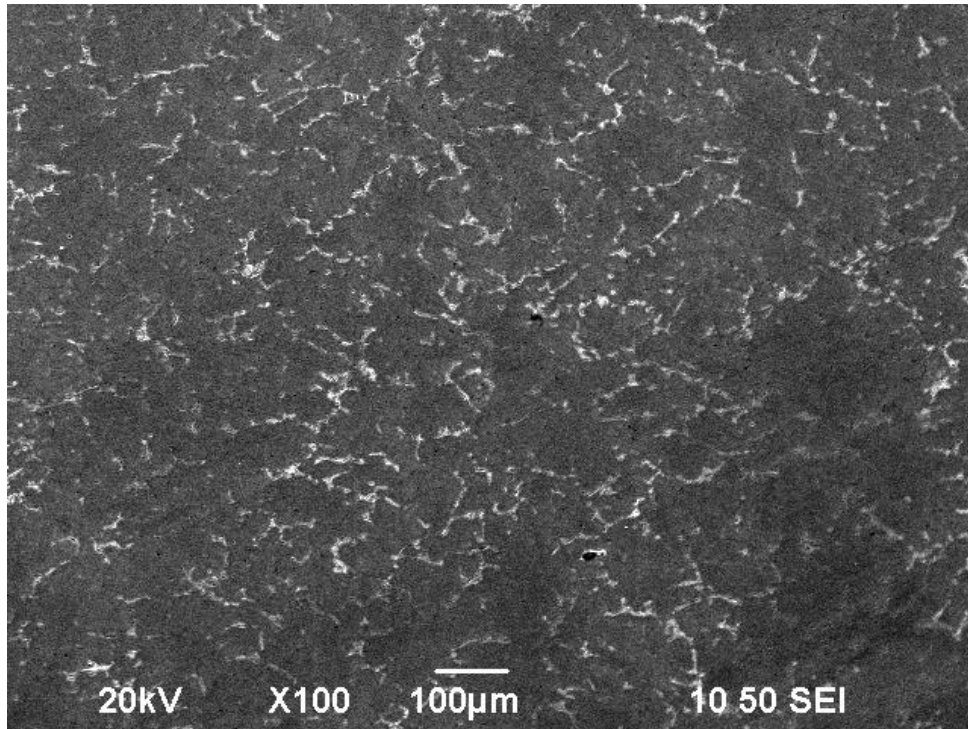


*Εικόνα 4.6* Άποψη της μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).

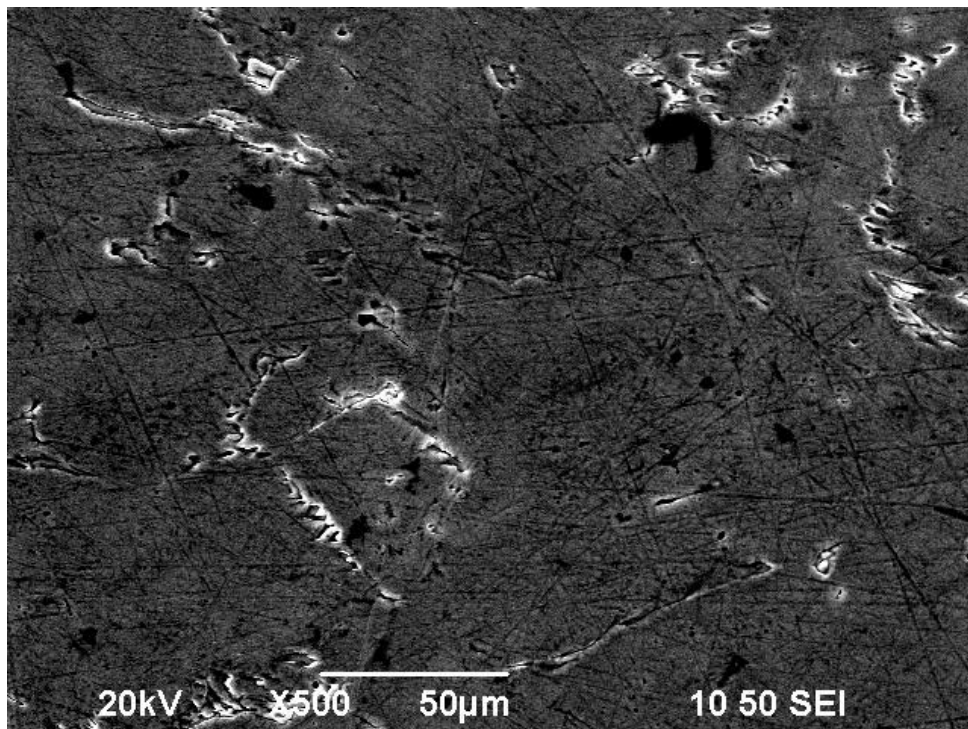


*Εικόνα 4.7* Άποψη της μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).

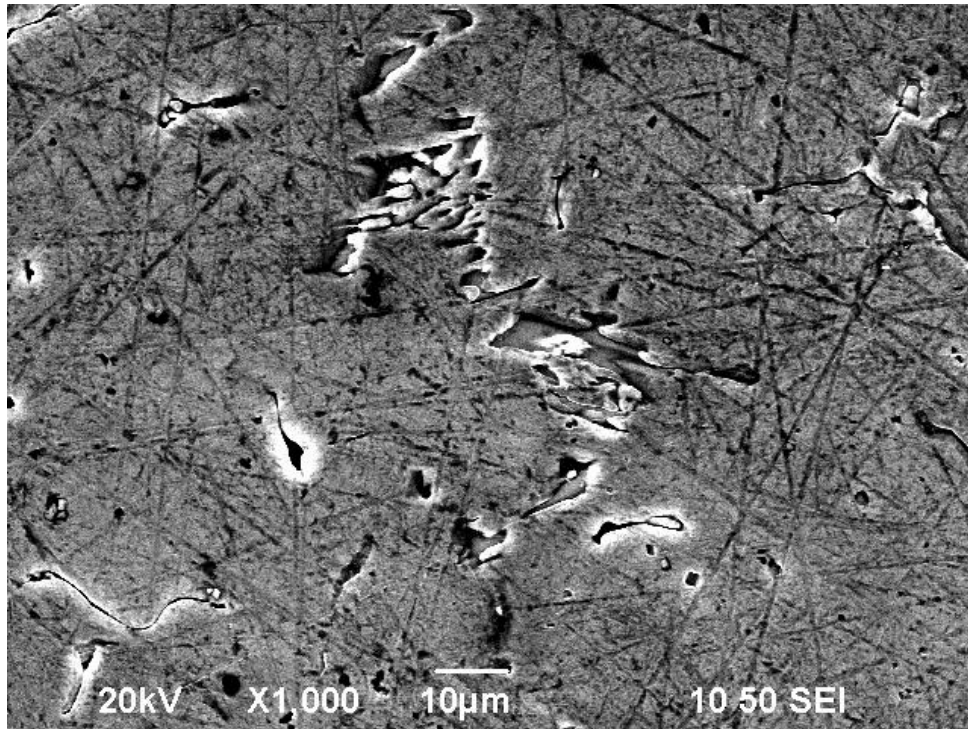




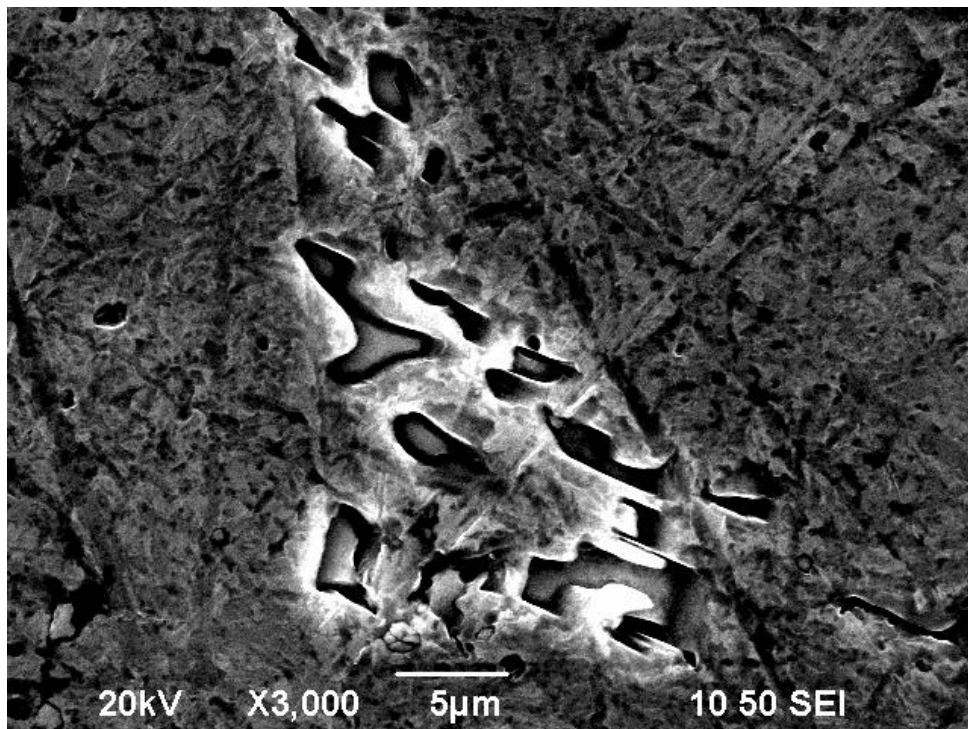
***Εικόνα 4.8** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χτυπημένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x100).*



***Εικόνα 4.9** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χτυπημένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x500).*



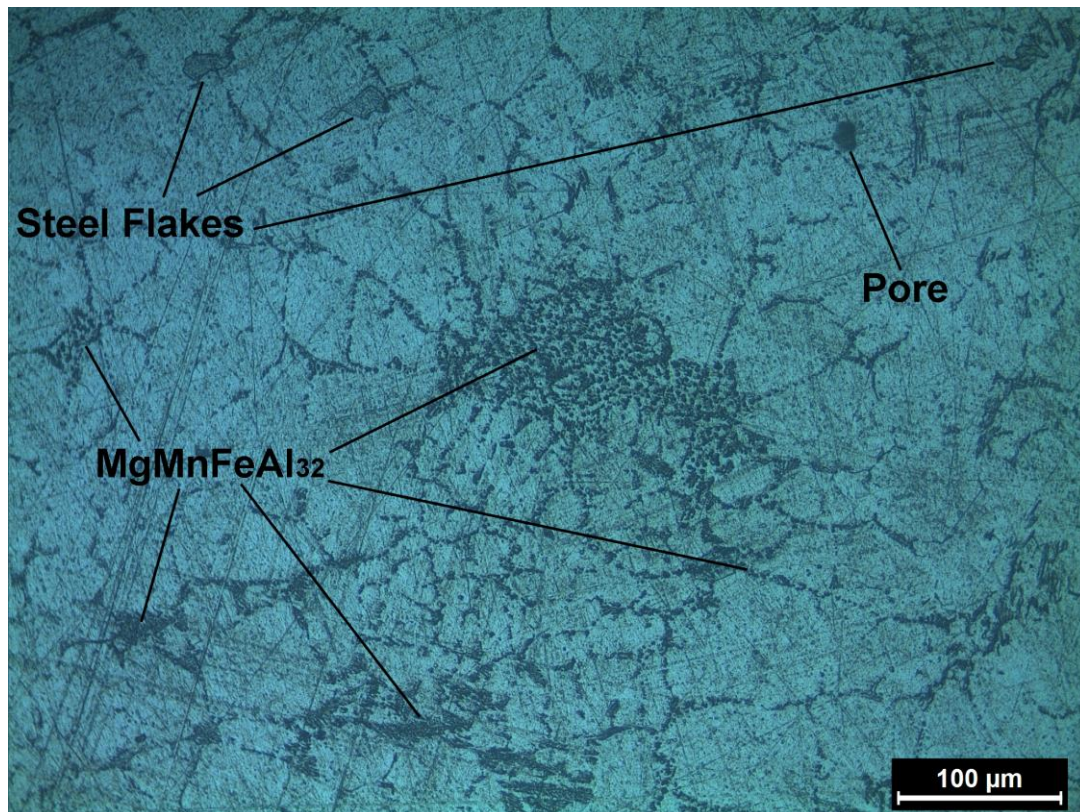
Εικόνα 4.10 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x1000).



Εικόνα 4.11 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 30°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x3000)

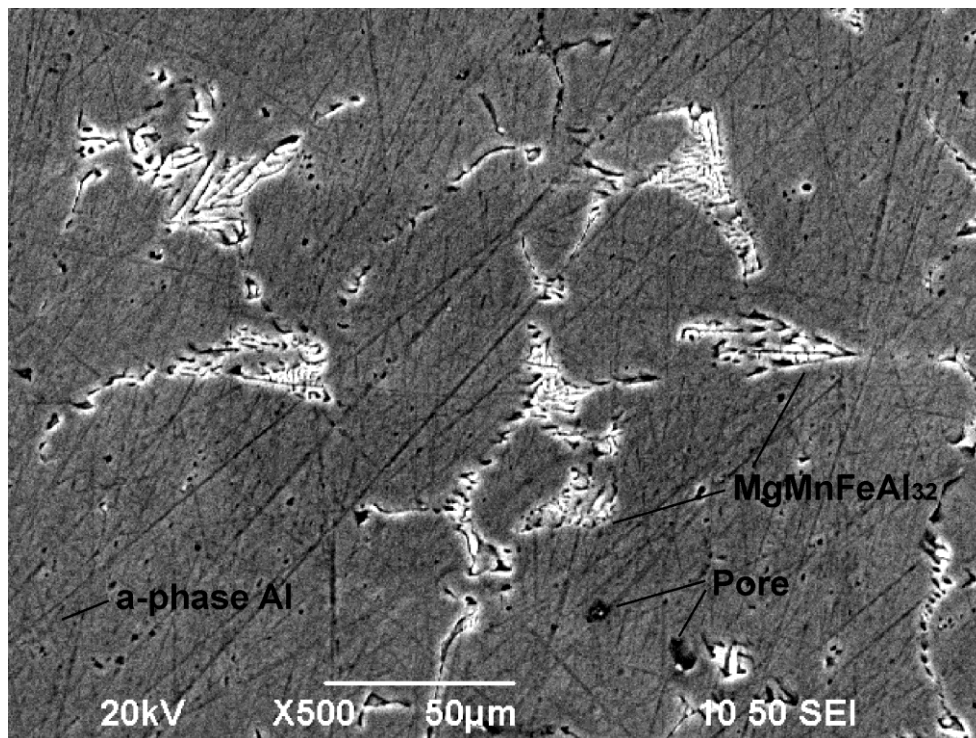
#### **4.2.3.2 Δοκίμιο περιεκτικότητας 0,25% κ.β. St**

Στη συνέχεια μελετήθηκε το δοκίμιο περιεκτικότητας 0,25% κ.β. σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα. Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες από οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και επεξηγούνται τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του δοκιμίου.



*Εικόνα 4.12 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο  
(φακός x20)*



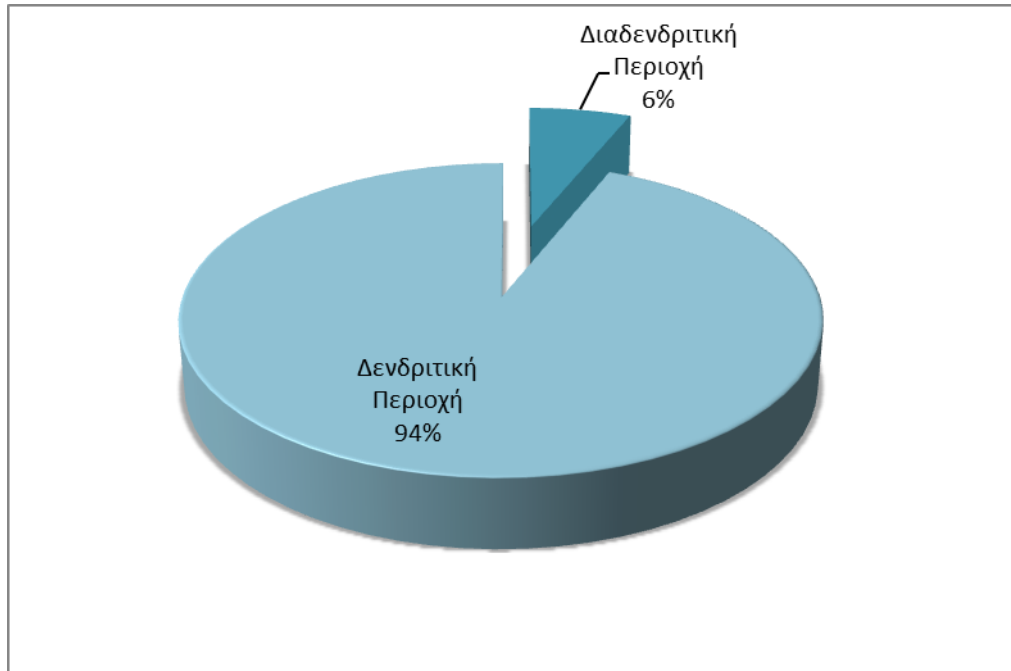


**Εικόνα 4.13** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. Στ από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x500).

Όπως φαίνεται από τη μικροσκοπική παρατήρηση, η προσθήκη φολίδων χάλυβα σε ποσοστό 0,25% κ.β. στο αλουμίνιο οδηγεί σε σημαντική μείωση του μεγέθους των δενδριτικών περιοχών, χωρίς να μεταβάλλεται ιδιαίτερα η συνολική επιφάνεια που καταλαμβάνουν. Συνολικά, οι περιοχές α-φάσης ελαττώνονται ως προς το μέγεθός τους (εμβαδό) και οι περιοχές των ορίων τους εμφανίζονται καλά ορισμένες, με πυκνότερες και μεγάλου μήκους συνεχείς διαδενδριτικές περιοχές.

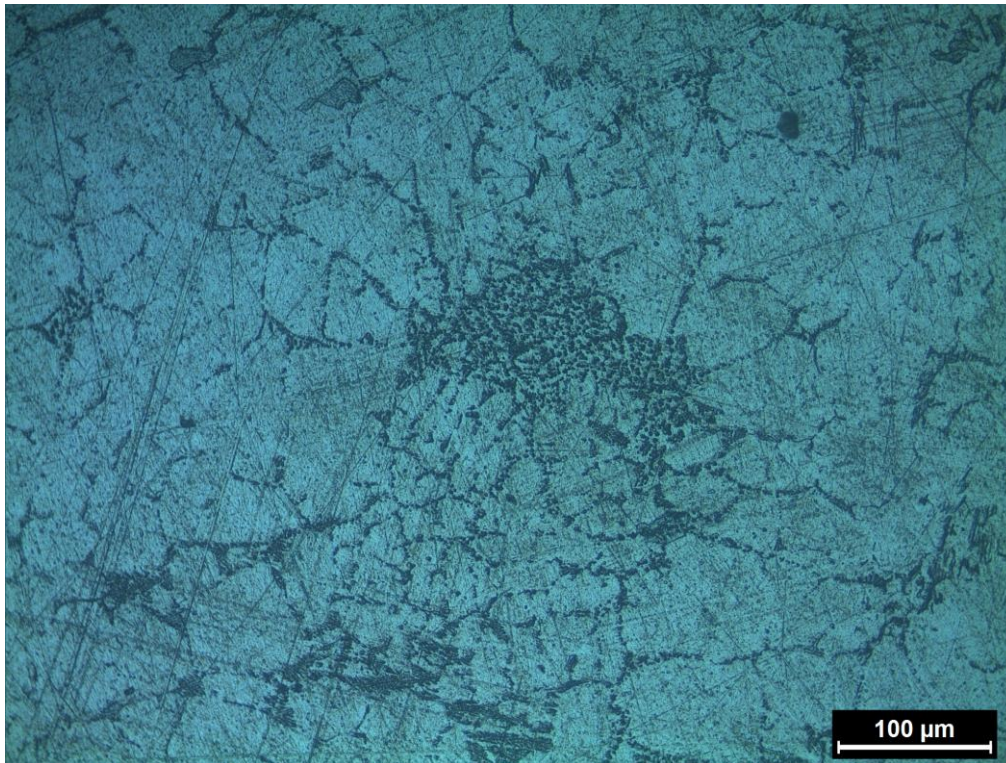
Το μήκος των βελονοειδών δομών παρουσιάζεται αρκετά ελαττωμένο, ενώ το μήκος των συνεχών διαδενδριτικών περιοχών αυξάνεται διαχωρίζοντας πολύ καλύτερα τα όρια των δενδριτικών κλάδων. Πιο συγκεκριμένα το μέσο μήκος των διαδενδριτικών περιοχών αυξήθηκε κατά 35%, όπως διαπιστώθηκε μετά τον υπολογισμό του στο λογισμικό ImageJ. Στις μεγάλες διαδενδριτικές περιοχές παρουσιάζονται δομές τυπου chinese script. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι παρουσιάζονται ελάχιστοι αλλά αρκετά βαθείς πόροι, όπως φαίνεται σε αρκετές εικόνες διάφορων μεγεθύνσεων που

ακολουθούν. Η αύξηση του εμβαδού των διαδενδριτικών περιοχών φαίνεται στο παρακάτω γράφημα (Σχ. 4.2).

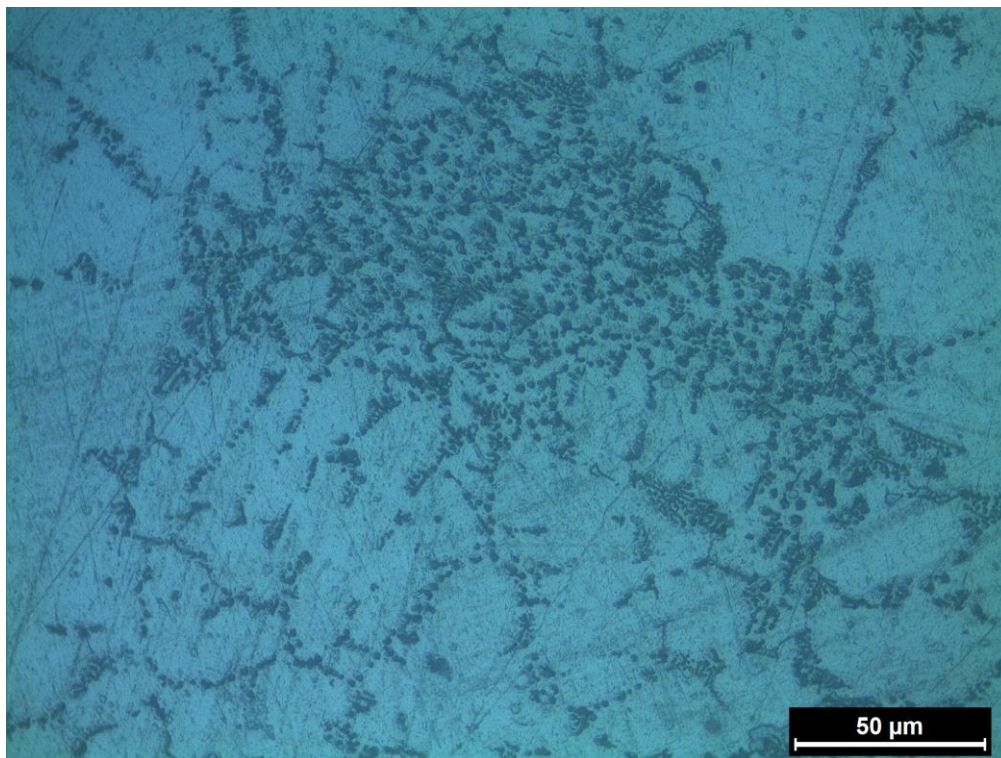


**Σχήμα 4.2 Ποσοστιαία απεικόνιση του εμβαδού της δενδριτικής και της διαδενδριτικής περιοχής (Δοκίμιο Al-0,25%St)**

Στη συνέχεια παρατίθενται εικόνες του δοκιμίου από τη μελέτη του στο μικροσκόπιο, όπου φαίνονται οι δομές που περιγράφηκαν σε διάφορα επίπεδα μεγέθυνσης.

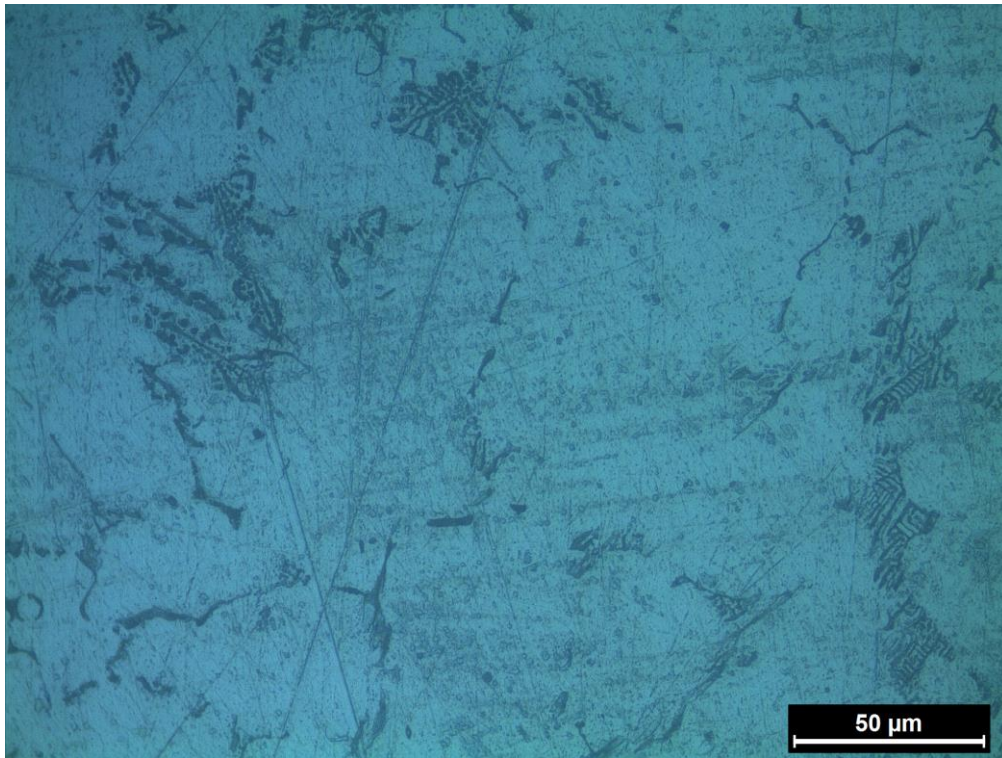


*Εικόνα 4.14 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20).*

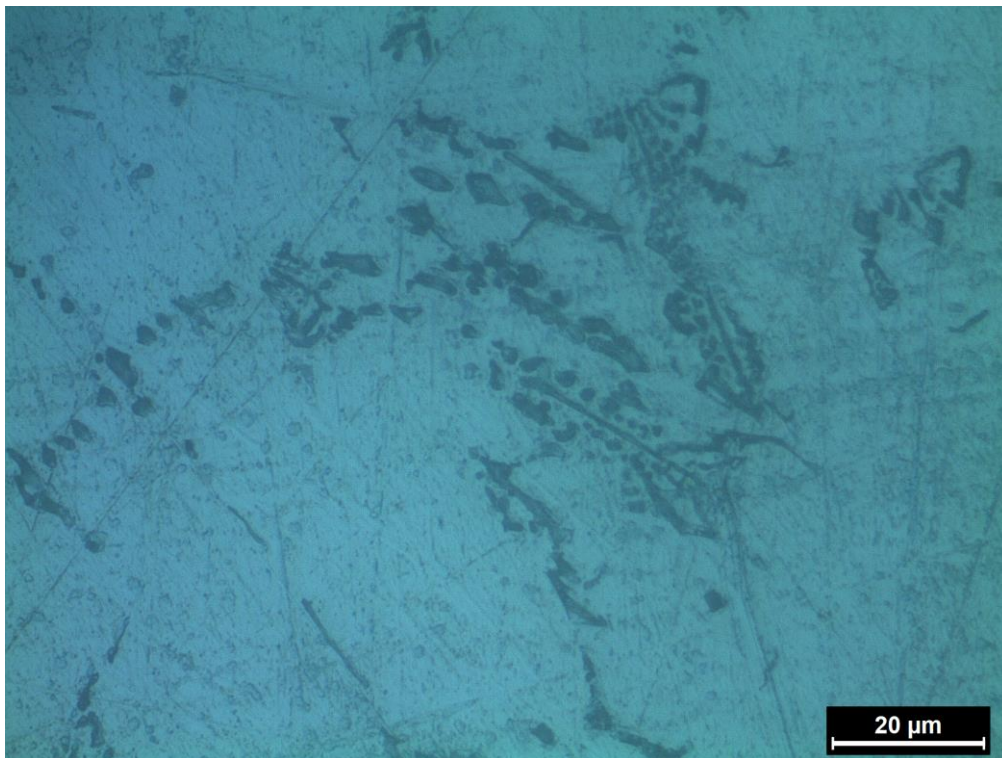


*Εικόνα 4.15 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).*

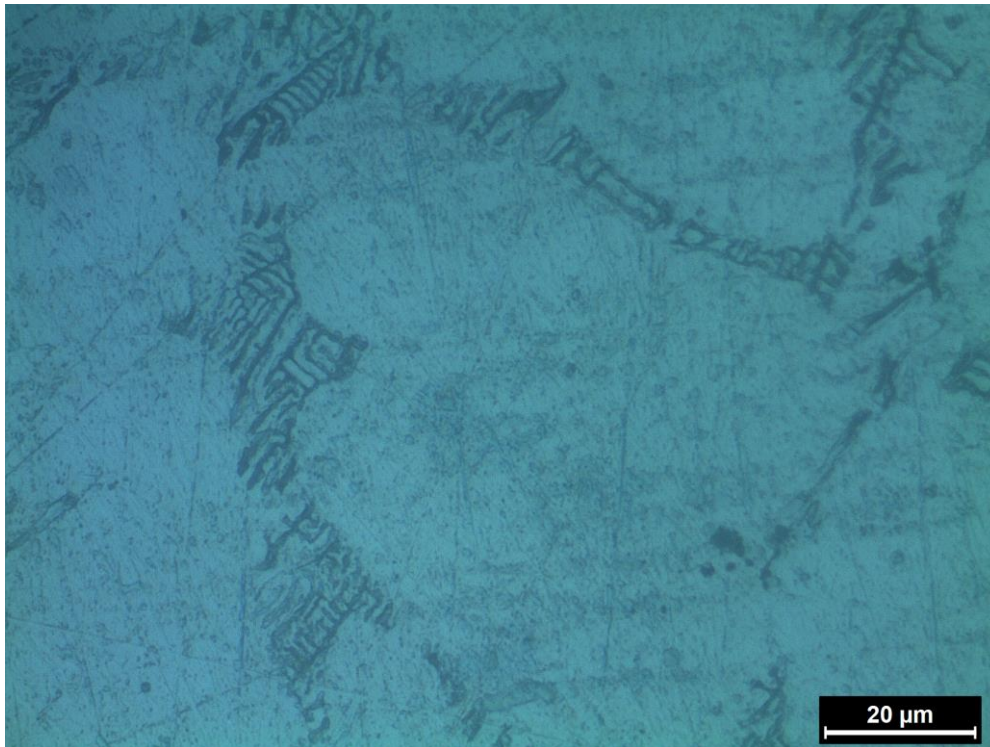




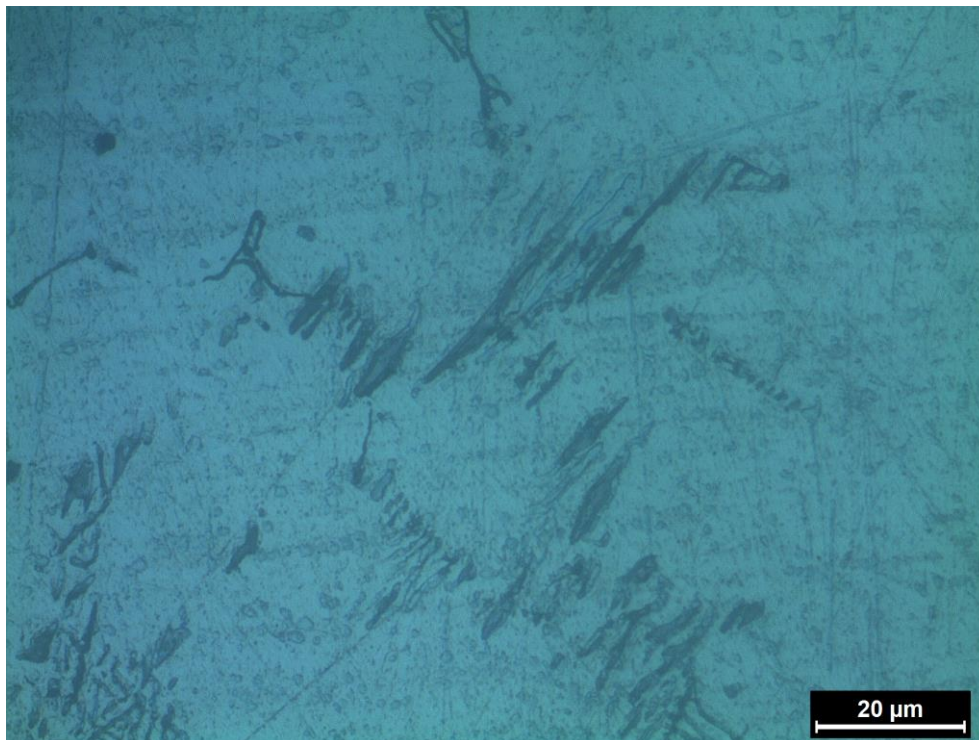
*Εικόνα 4.16* *Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. Στ από οπτικό μικροσκόπιο*  
*(φακός x50).*



*Εικόνα 4.17* *Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. Στ από οπτικό μικροσκόπιο*  
*(φακός x100).*

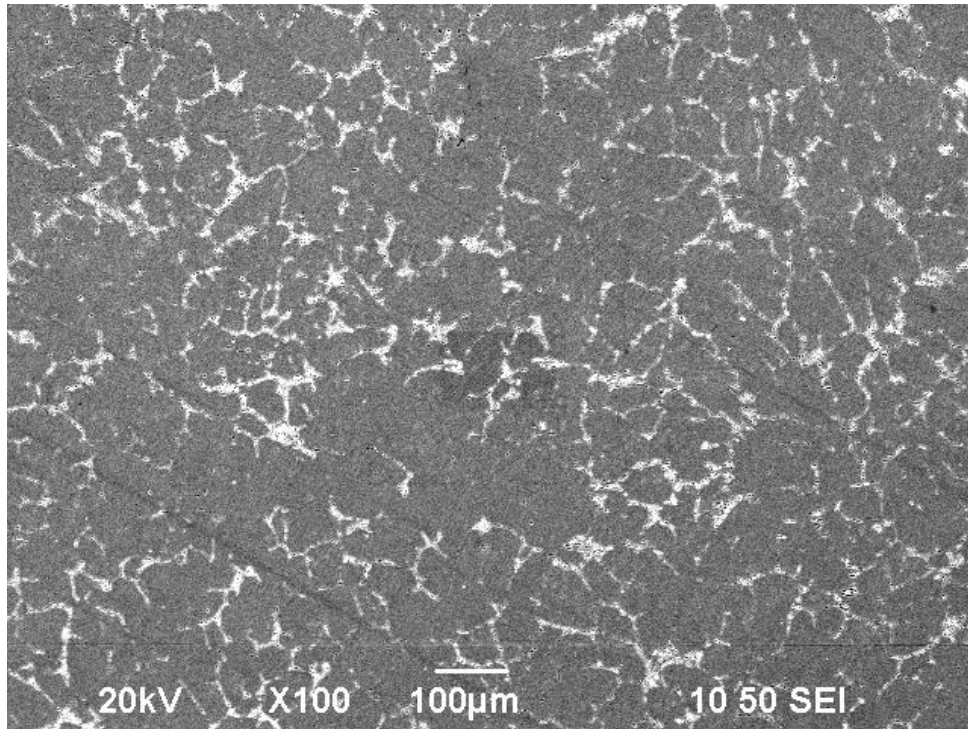


***Εικόνα 4.18*** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. *St* από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).

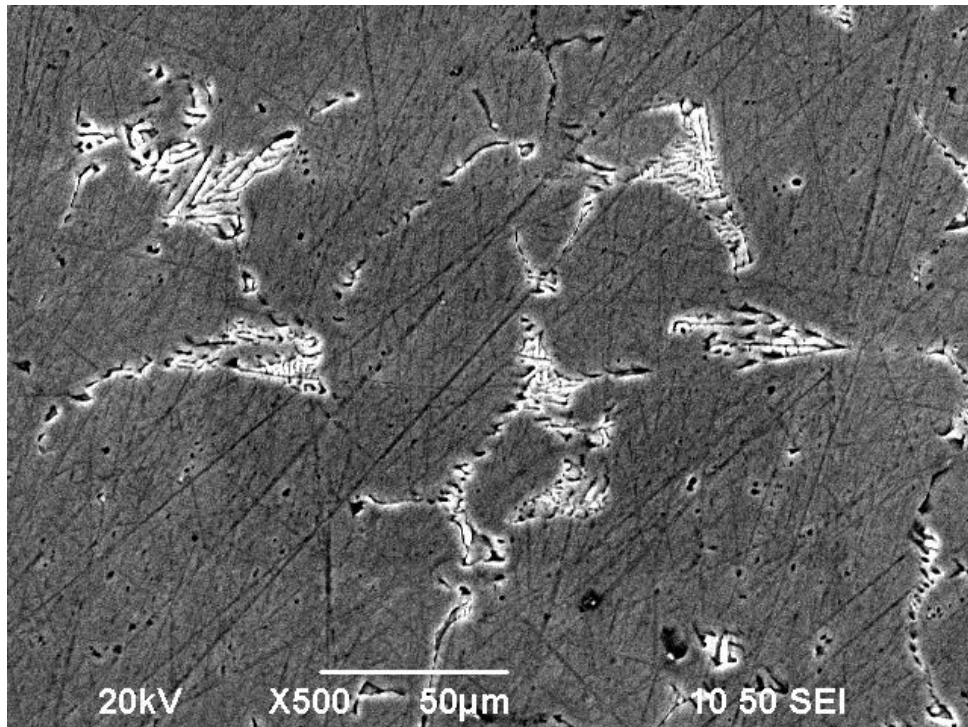


***Εικόνα 4.19*** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. *St* από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).

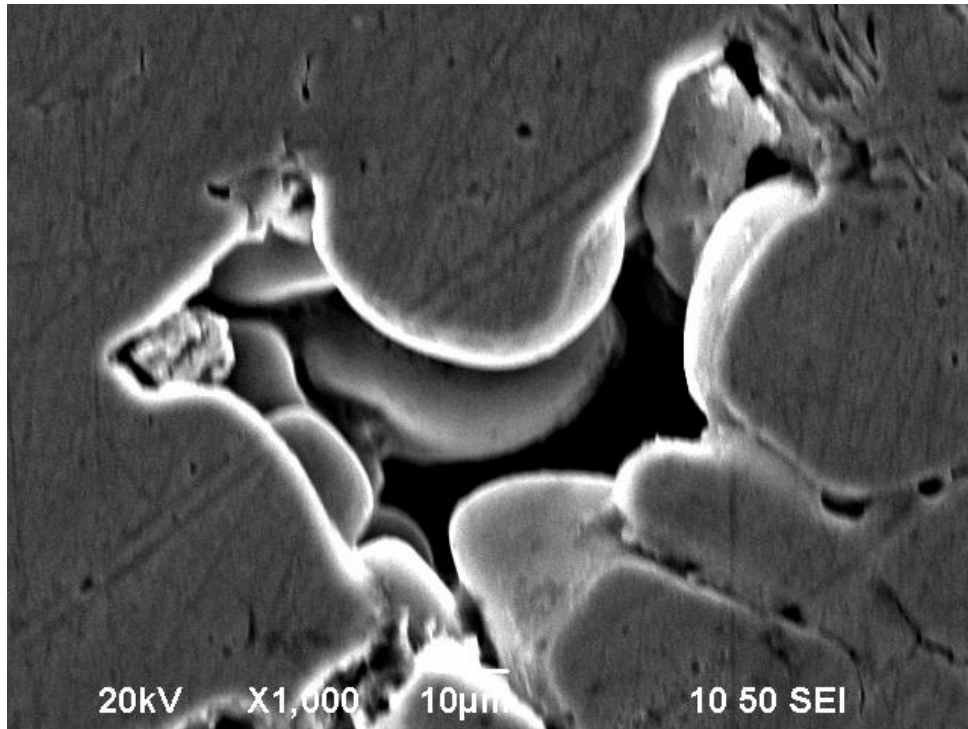




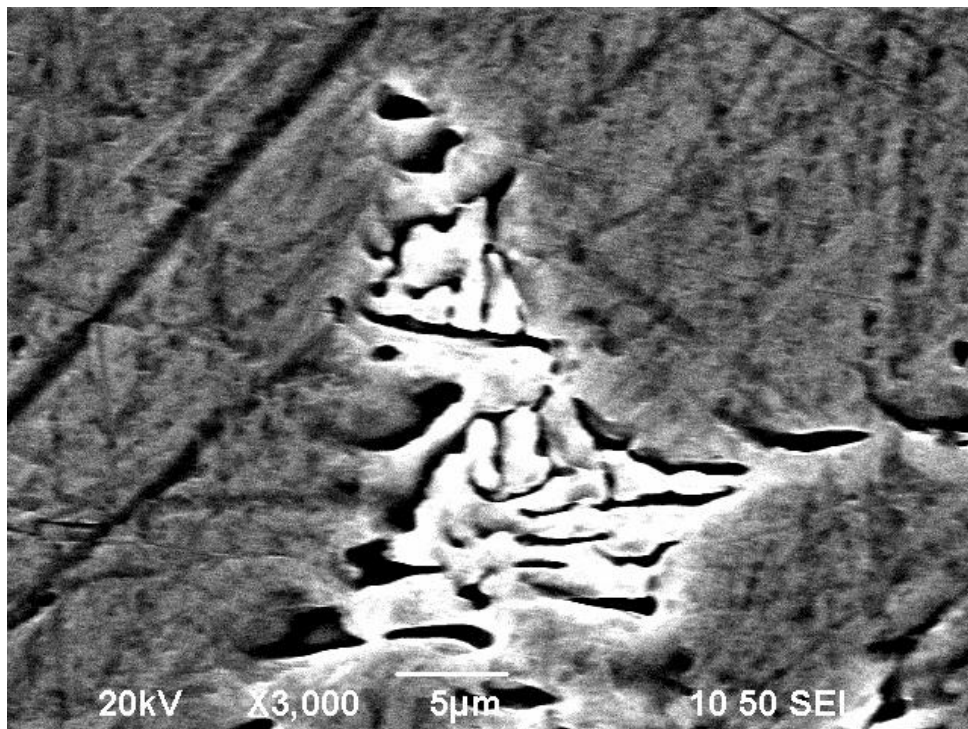
*Εικόνα 4.20 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x100).*



*Εικόνα 4.21 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x500).*



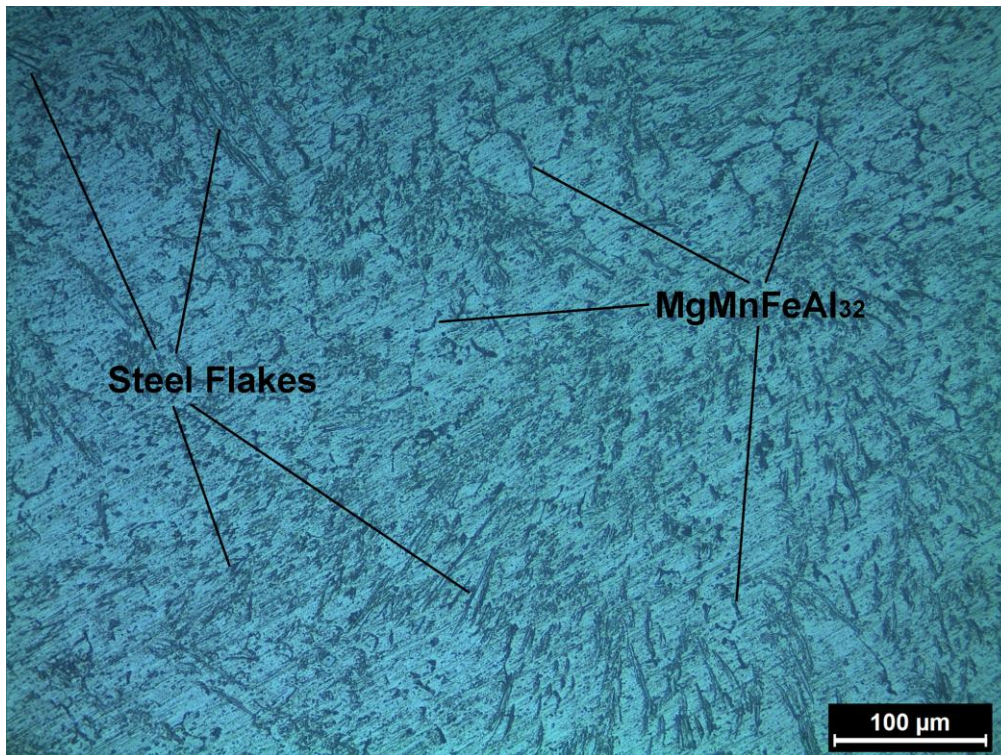
*Εικόνα 4.22 Πόρος στη μικροδομή του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St. Αποψη από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x1000).*



*Εικόνα 4.23 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,25% κ.β. St από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φακός x3000).*

#### **4.2.3.3 Δοκίμιο περιεκτικότητας 0,50% κ.β. St**

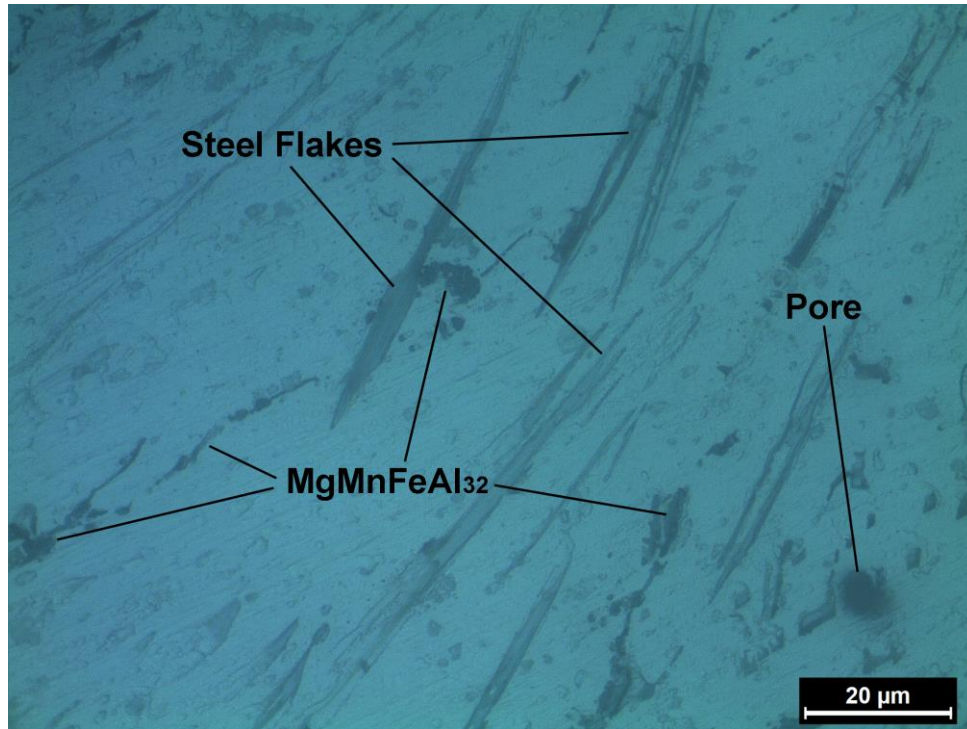
Στο δοκίμιο αυτό οι πολύ αραιές διαδενδριτικές περιοχές παρουσιάζουν το μικρότερο μέσο μήκος σε σχέση με τα δοκίμια αλουμινίου και αλουμινίου με ποσοστό 0,25% κ.β. φολίδων χάλυβα. Επίσης παρατηρούνται μεγάλες περιοχές συσσωρευμένων εγκλεισμάτων οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονη κατευθυντικότητα. Οι κατευθύνσεις των εγκλεισμάτων ποικίλουν ανάλογα με τα κέντρα στερεοποίησης. Στις εικόνες που ακολουθούν σημειώνονται οι περιοχές των δενδριτών, των εγκλεισμάτων φολίδων χάλυβα, οι διαδενδριτικές περιοχές και οι πόροι που δημιουργήθηκαν.



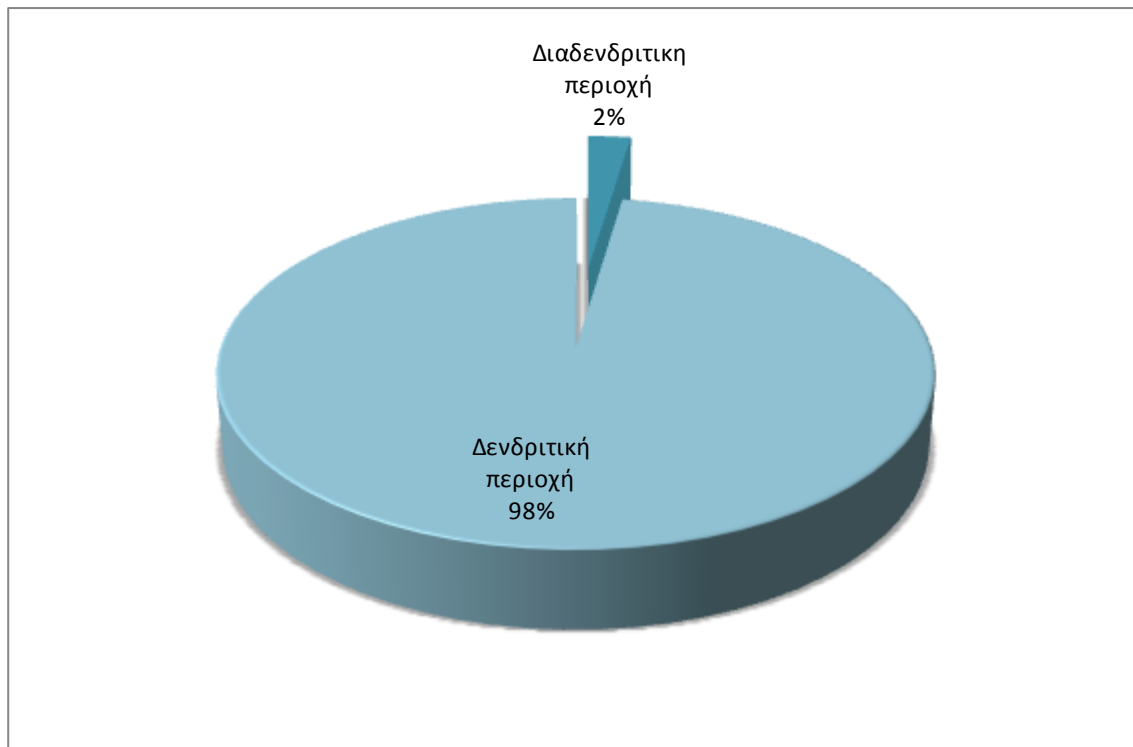
***Εικόνα 4.24** Άποψη μικροδομής του δοκίμιου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20).*

Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα (Σχ. 4.3) το μικρότερο εμβαδό διαδενδριτικών περιοχών προκύπτει για το δοκίμιο με περιεκτικότητα 0,50% κ.β. σε φολίδες χάλυβα. Εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο για το συγκεκριμένο δοκίμιο παρουσιάζονται παρακάτω.

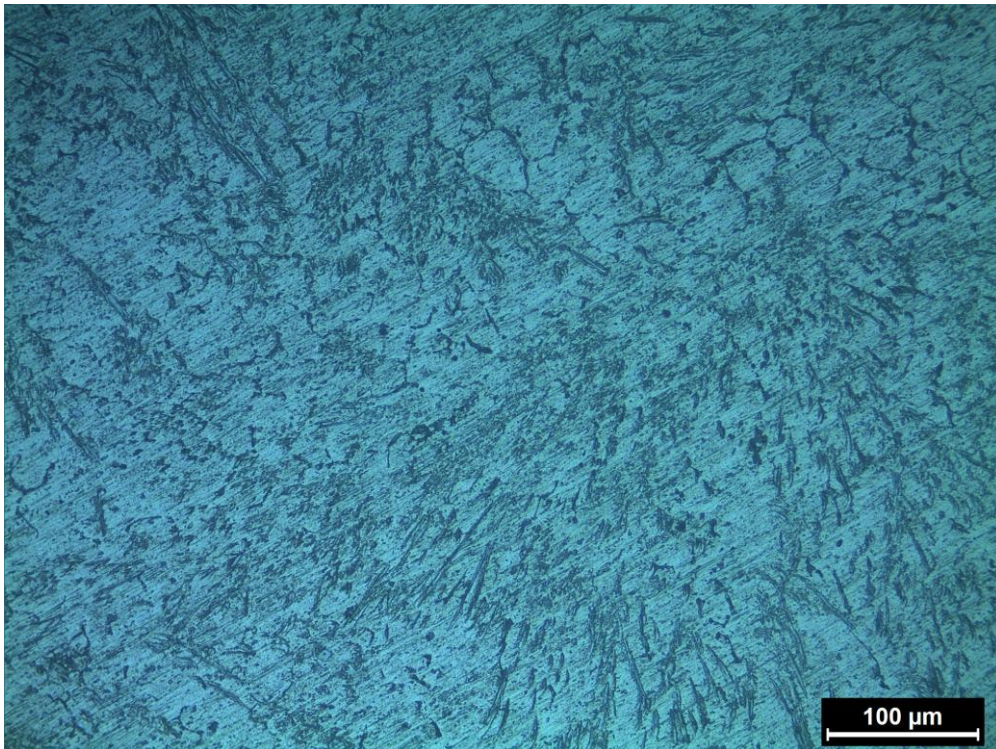




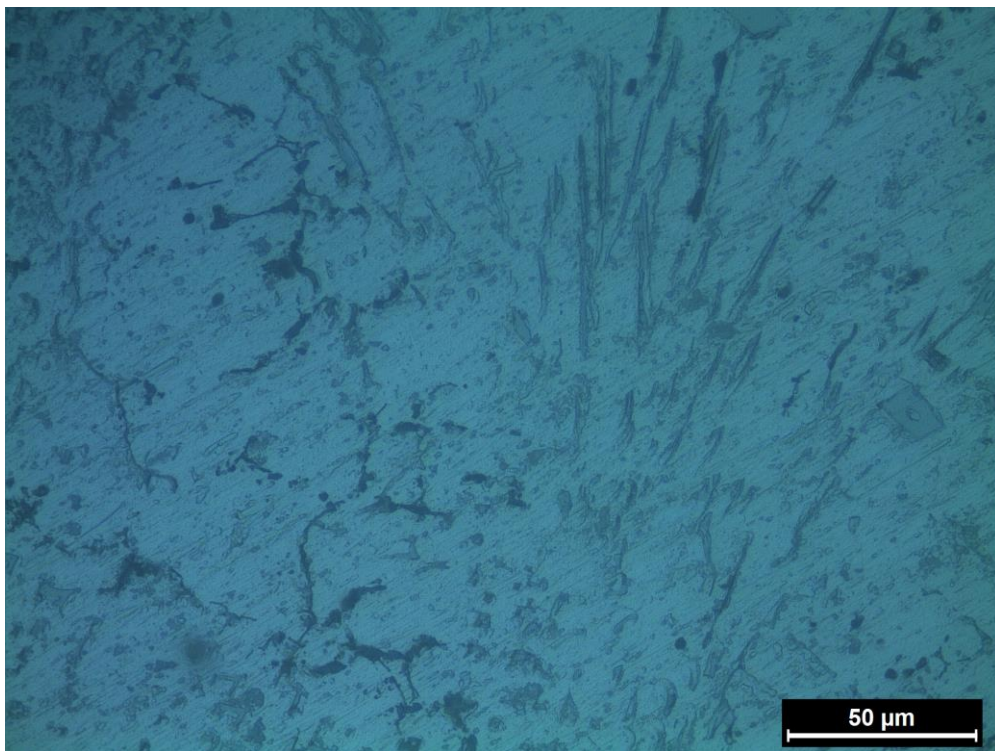
**Εικόνα 4.25** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. St από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).



**Σχήμα 4.3** Ποσοστιαία απεικόνιση του εμβαδού της δενδριτικής και της διαδενδριτικής περιοχής (Δοκίμιο Al-0,50%St).

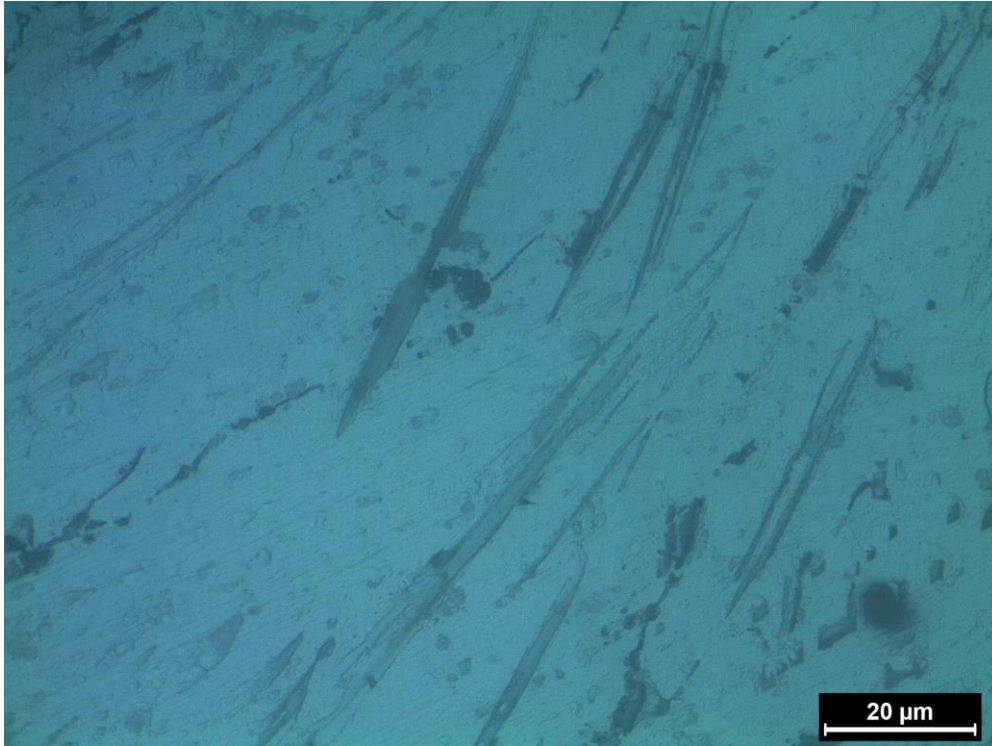


**Εικόνα 4.26** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. Στ από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20).

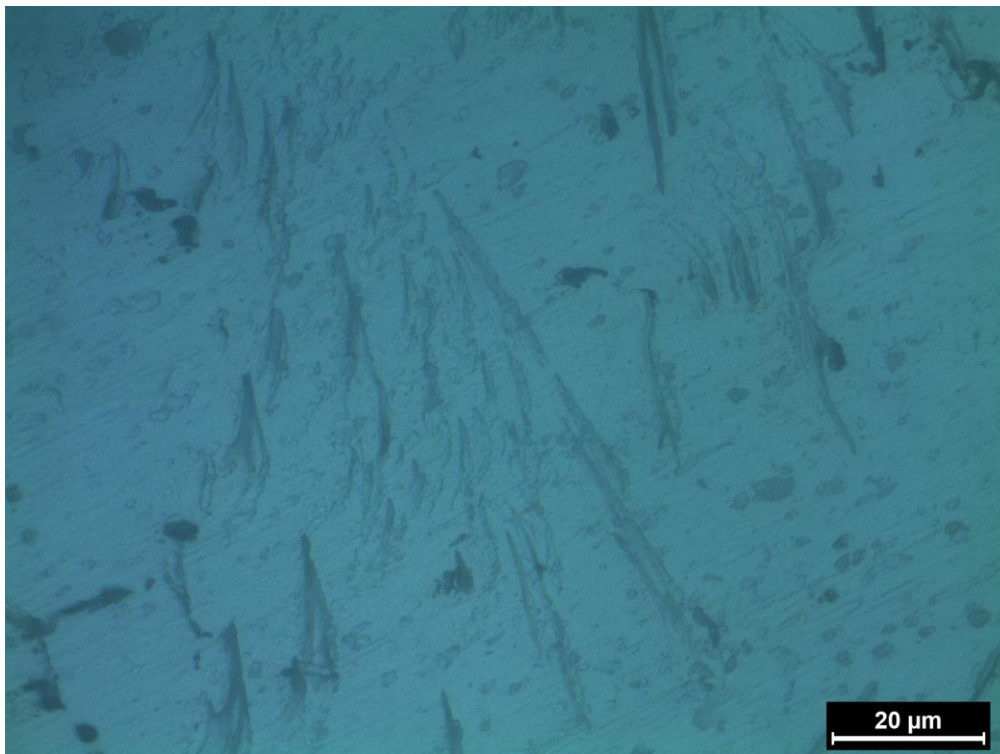


**Εικόνα 4.27** Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. Στ από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).





***Εικόνα 4.28*** *Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. Στ από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).*



***Εικόνα 4.29*** *Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al-0,50% κ.β. Στ από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).*

### 4.3 Σκληρομέτρηση

Προκειμένου να προσδιοριστεί η σκληρότητα του κάθε δοκιμίου, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε σκληρομέτρηση κατά Vickers με βάρος διείδυσης 5 kp και χρόνο διείδυσης 15 sec. Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε διάφορα σημεία της επιφάνειας κάθε δοκιμίου προκειμένου να προσδιοριστεί η μέση σκληρότητά του. Σε κάθε σκληρομέτρηση, μετρήθηκε η μέση διάμετρος του αποτυπώματος του διείδυτη. Με την μέση διάμετρο και την τυποποίηση κατα Vickers προσδιορίζεται τελικά η σκληρότητα του υλικού. Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που έγιναν παρουσιάζονται, για κάθε υλικό, στους παρακάτω πίνακες.

AL (30)				
Μέτρηση	d1 (mm)	d2 (mm)	d (mm)	HV5
1	0,441	0,433	0,437	48,7
2	0,435	0,453	0,444	47,1
3	0,434	0,444	0,441	47,8
Μέση σκληρότητα	47,9			

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα της σκληρομέτρησης για το δοκίμιο Al.

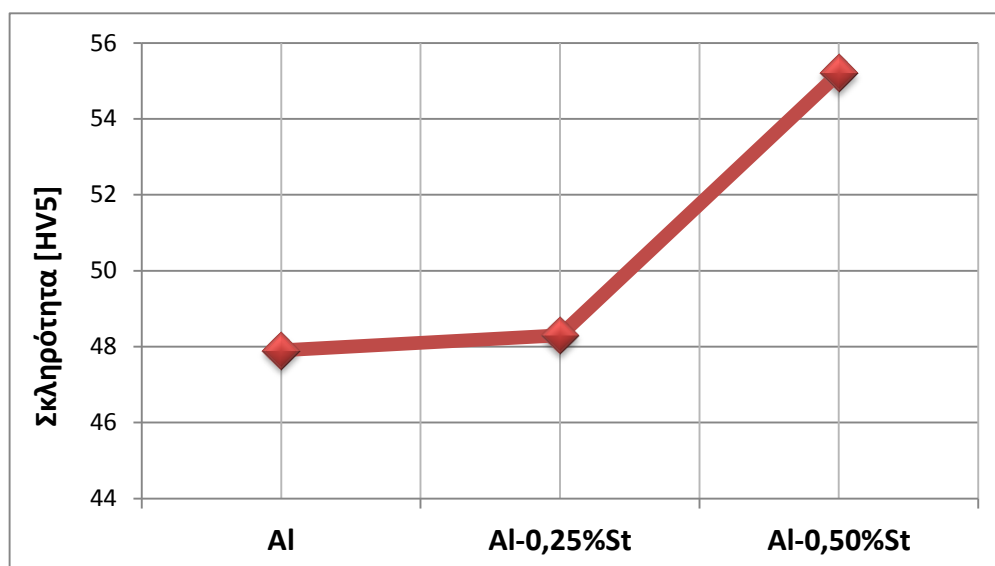
St 0,25% κ.β.				
Μέτρηση	d1 (mm)	d2 (mm)	d (mm)	HV5
1	0,439	0,436	0,438	48,3
2	0,439	0,439	0,439	48,1
3	0,434	0,440	0,437	48,6
Μέση σκληρότητα	48,3			

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα της σκληρομέτρησης για το δοκίμιο Al-0,25%St.

St 0,50% κ.β.				
Μέτρηση	d1 (mm)	d2 (mm)	d (mm)	HV5
1	0,408	0,407	0,408	55,7
2	0,417	0,407	0,412	54,6
3	0,415	0,404	0,410	55,2
Μέση σκληρότητα	55,2			

**Πίνακας 4.6** Αποτελέσματα της σκληρομέτρησης για το δοκίμιο Al-0,50%St.

Είναι προφανές ότι με προσθήκη φολίδων χάλυβα αυξάνεται η σκληρότητα του κράματος. Η αύξηση αυτή είναι εμφανέστερη στην περίπτωση της περιεκτικότητας 0,50% κ.β. φολίδων χάλυβα. Η μεταβολή της σκληρότητας για κάθε περιεκτικότητα φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα 316-L φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



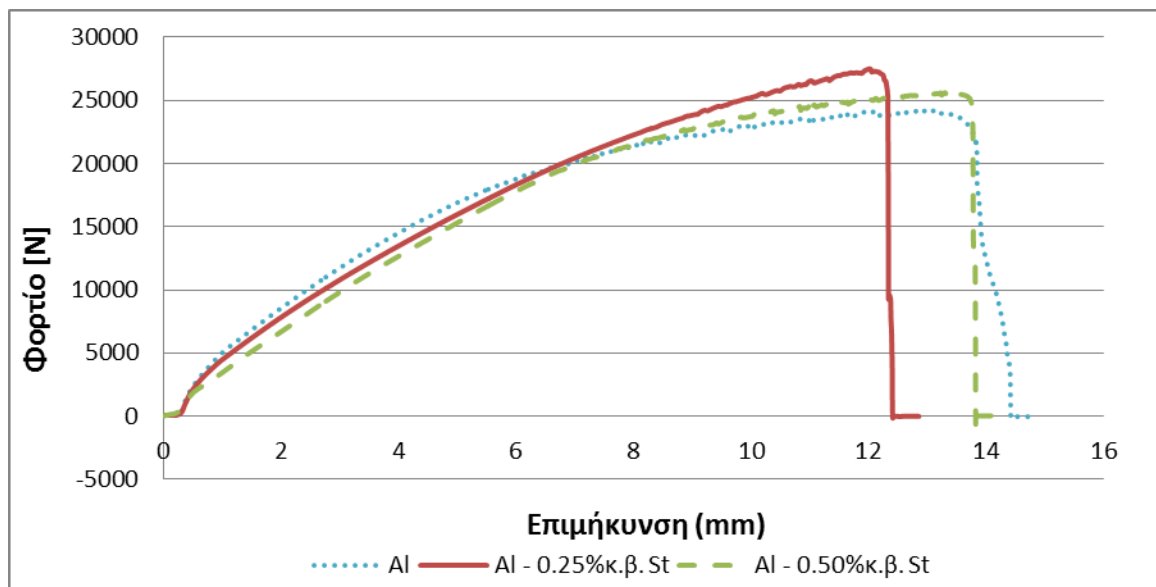
**Σχήμα 4.4** Διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής της σκληρότητας του κράματος.



#### **4.4 Δοκιμή αντοχής σε Εφελκυσμό (Tensile Strength Test)**

Για τη δοκιμή και εξαγωγή συμπερασμάτων από τον εφελκυσμό χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια απο κάθε υλικό. Οι δοκιμές έγιναν στην πρέσσα INSTRON 4482 του εργαστηρίου, δυναμικότητας 100 kN. Με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η μηχανή εφελκυσμού, πραγματοποιήθηκε η αυτόματη καταγραφή των μετρήσεων. Τα δοκίμια κόπηκαν σε διαστάσεις 100 mm × 26.5 mm × 5 mm. Οι περιοχές συγκράτησης στις δαγκάνες ήταν μήκους 25 mm, αφήνοντας έτσι περιοχή ελέγχου μήκους 50 mm. Λόγω της πολύ καλής επαναληψιμότητας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός αντιπροσωπευτικού δοκιμίου για κάθε περιεκτικότητα.

Στο διάγραμμα φορτίου/επιμήκυνσης που ακολουθεί φαίνεται η συμπεριφορά κάθε δοκιμίου κατά τη δοκιμή εφελκυσμού.

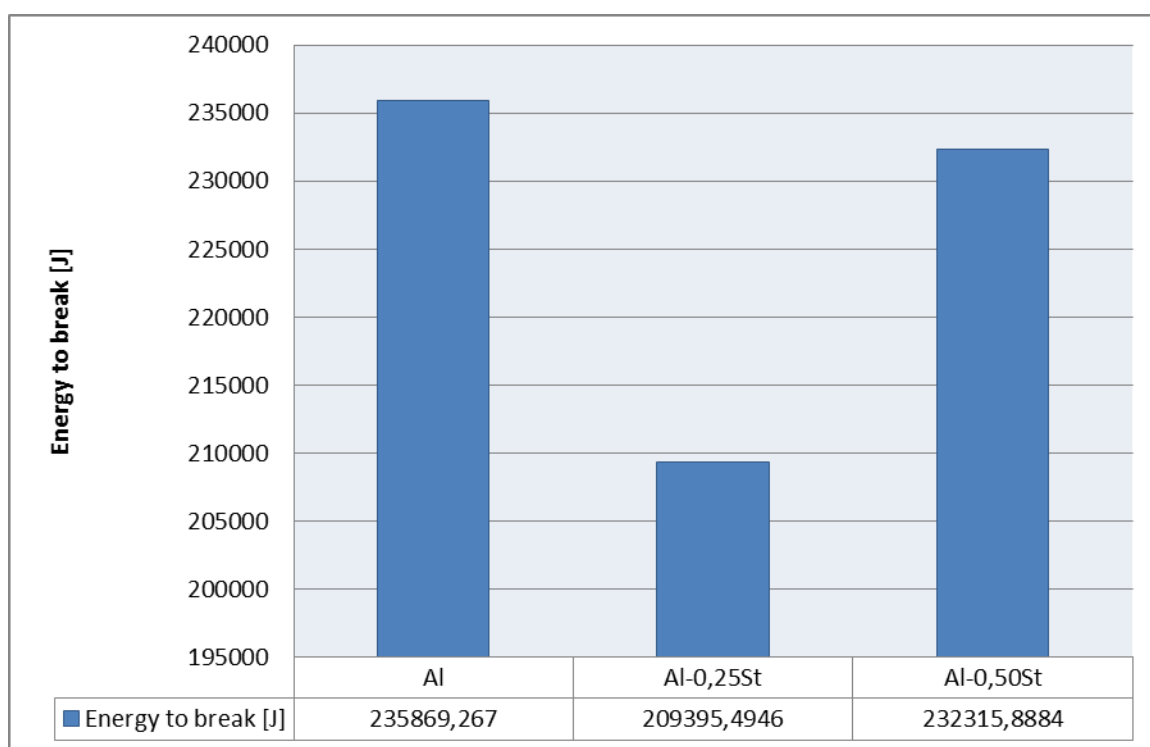


***Σχήμα 4.5** Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης για κάθε δοκίμιο.*

Από τη μορφή των καμπυλών παρατηρείται ότι για περιεκτικότητα 0,50% φολίδων χάλυβα το διάγραμμα παραμένει σχεδόν αμετάβλητο. Κατά συνέπεια, για την περιεκτικότητα αυτή, δεν παρατηρείται επίδραση στην επίδοση του υλικού. Για την

περιεκτικότητα 0,25% φολίδων χάλυβα, το διάγραμμα ελαφρά διαφοροποιείται. Όσον αφορά το φορτίο θραύσης, παρατηρείται μία μικρή αύξηση, που συνοδεύεται από μικρή μείωση της επιμήκυνσης θραύσης. Έτσι, για την περιεκτικότητα αυτή, το υλικό ενισχύεται ελαφρά σε αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζεται λιγότερο ελαστικό.

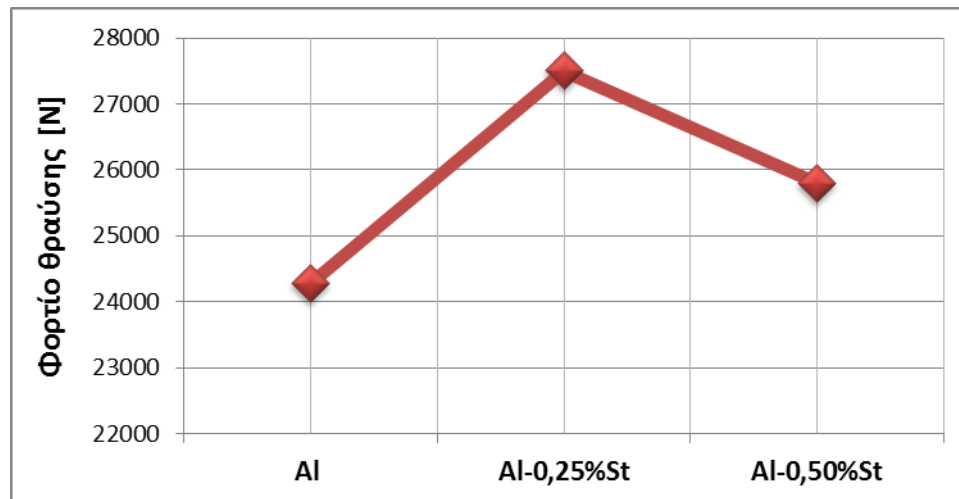
Υπολογίζοντας το εμβαδό κάθε καμπύλης προσδιορίζεται η ενέργεια που απορροφήθηκε από κάθε δοκίμιο μέχρι τη θραύση του (Σχ. 4.6)



**Σχήμα 4.6** Γράφημα σύγκρισης των ενεργειών θραύσης των δοκιμίων.

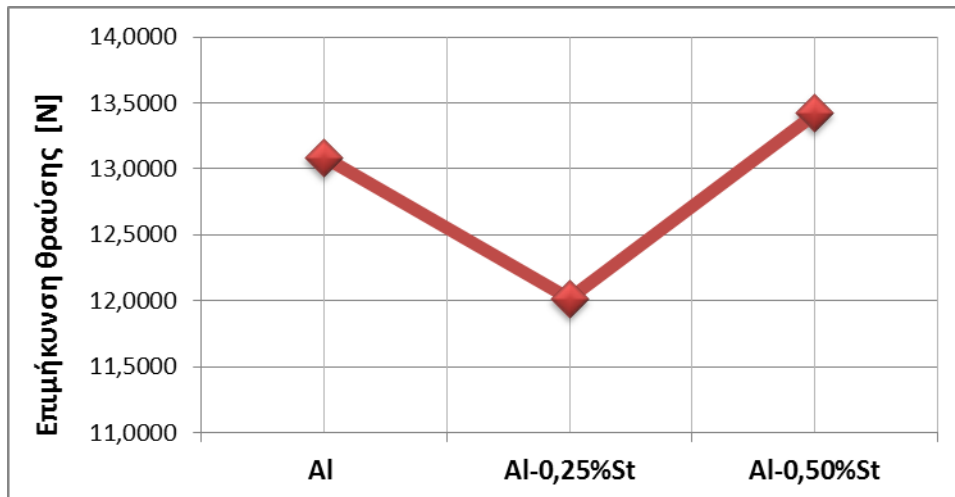
Παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα ότι τα δοκίμια του καθαρού αλουμινίου και του αλουμινίου με περιεκτικότητα 0,50% κ.β. σε φολίδες (flakes) χάλυβα απορρόφησαν παραπλήσια ποσά ενέργειας (διαφορά 1,51%). Μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με το δοκίμιο του αλουμινίου παρουσίασε το δοκίμιο με ποσοστό 0,25% κ.β. φολίδων χάλυβα, είχε δηλαδή διαφορά της τάξης του 11,22%.

Σχετικά με το φορτίο θραύσης (Ultimate Tensile Strength) παρατηρήθηκε ότι το δοκίμιο Al-0,25% κ.β. St ήταν εκείνο για το οποίο καταγράφηκε η μεγαλύτερη τιμή φορτίου (27503 N). Ακολούθησε το δοκίμιο Al-0,50% κ.β. St ενώ το μικρότερο φορτίο μέχρι τη θραύση ήταν εκείνο του δοκιμίου του αλουμινίου υψηλής καθαρότητας με τιμή 24281,56 N.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα απεικόνισης του φορτίου θραύσης κάθε δοκιμίου.

Οι τιμές της μέγιστης επιμήκυνσης (επιμήκυνση θραύσης) για το αλουμίνιο και το αλουμίνιο με 0,50% κ.β. φολίδων χάλυβα είναι παραπλήσιες, με μια απόκλιση της τάξης του 2,48%. Η μικρότερη επιμήκυνση μέχρι τη θραύση παρουσιάστηκε για το δοκίμιο Al-0,25% κ.β. St (12,0153mm). Η μεταβολή της επιμήκυνσης θραύσης παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα της επιμήκυνσης θράυσης κάθε δοκιμίου.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής σε εφελκυσμό αποτυπώνονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

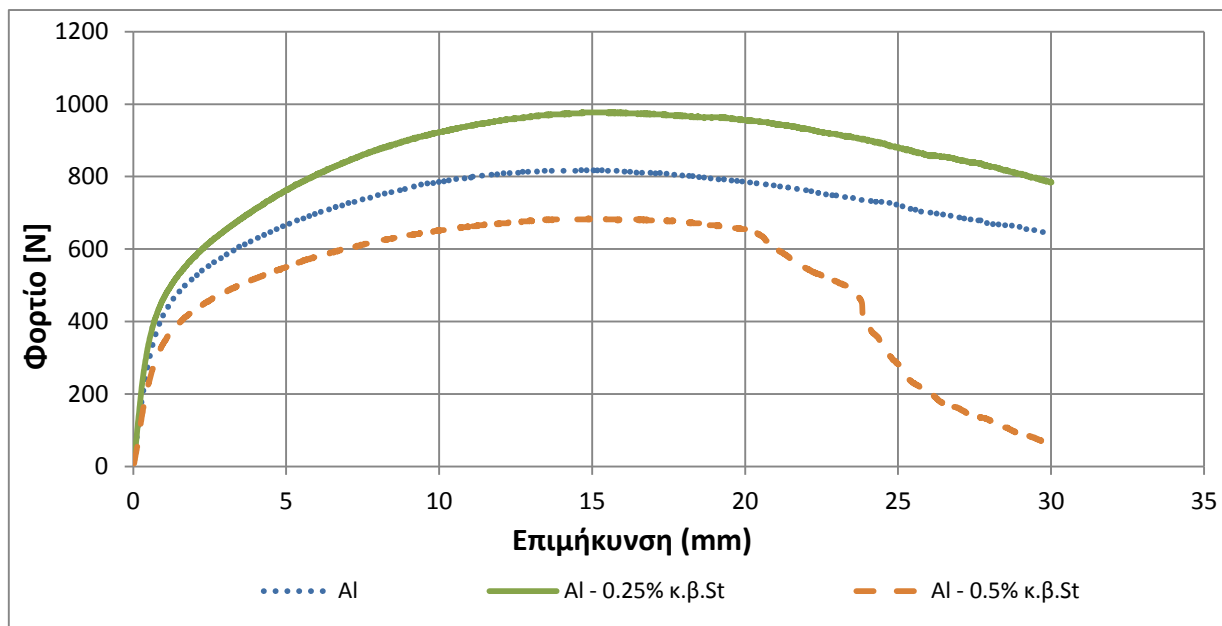
Υλικό	Φορτίο θραύσης (N)	Μεταβολή (%)	Επιμήκυνση θραύσης (mm)	Μεταβολή (%)	Ενέργεια θραύσης (J)	Μεταβολή (%)
Al	24281,56		13,0861		235869,2670	
Al-0,25% κ.β. St	27503,00	11,71	12,0153	-8,18	209395,4946	-11,22
Al-0,50% κ.β. St	25798,32	5,88	13,4192	2,48	232315,8884	-1,51

Πίνακας 4.7 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού.

#### **4.5 Δοκιμή αντοχής σε Κάμψη τριών σημείων (3Point Bending Test)**

Όπως και στη δοκιμή εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή σε κάμψη τρία δοκίμια από κάθε υλικό στην ίδια μηχανή δοκιμών. Οι διαστάσεις στις οποίες κόπηκαν τα δοκίμια ήταν  $100 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ . Η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης της βάσης ήταν 80mm σύμφωνα με τα πρότυπα δοκιμών για σύνθετα υλικά. Υπολογίστηκαν τα ίδια μεγέθη όπως και στον εφελκυσμό για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά των δοκιμίων. Επίσης, υπολογίστηκε το flexure extension (το μήκος, δηλαδή, της περιοχής καθαρής κάμψης στα διαγράμματα φορτίου/επιμήκυνσης κάμψης).

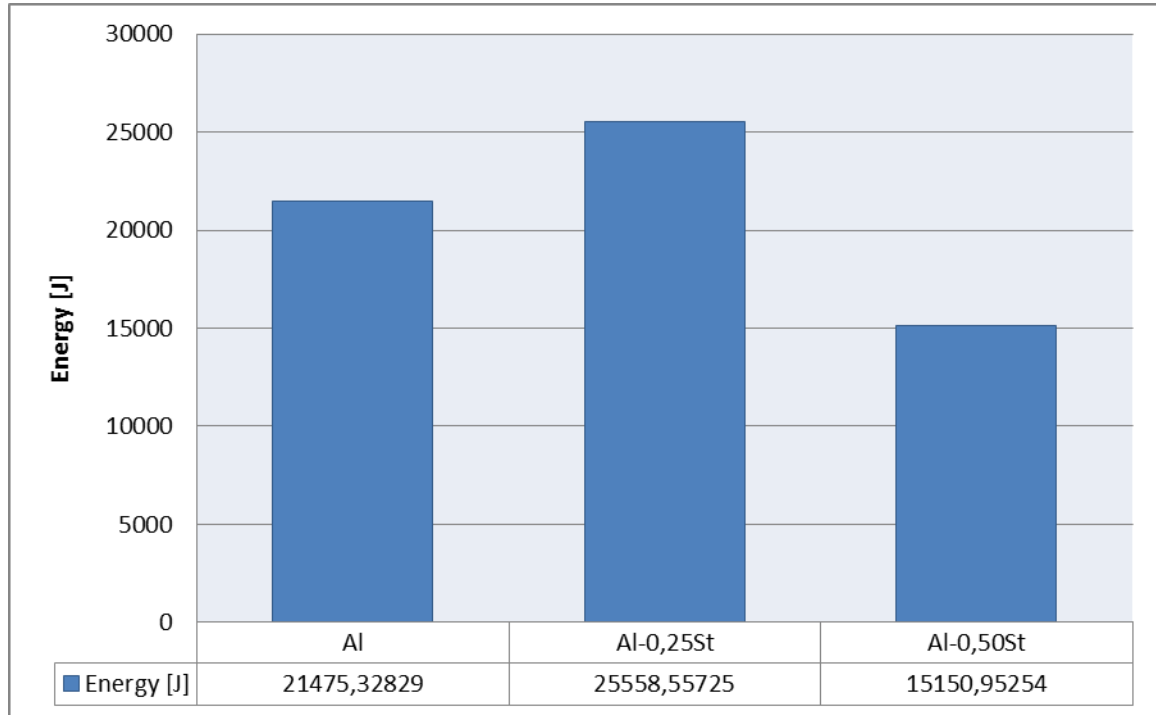
Στο διάγραμμα που παρατίθεται στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται συγκριτικά η συμπεριφορά των δοκιμίων κάθε υλικού συναρτήσει του φορτίου και της επιμήκυνσης κάμψης.



*Σχήμα 4.9 Διάγραμμα Φορτίου-Επιμήκυνσης για κάθε δοκίμιο.*

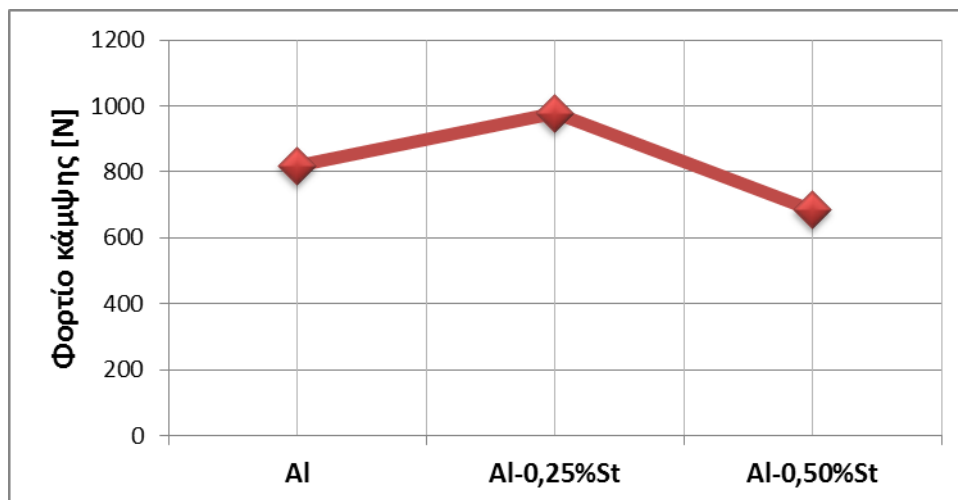
Αντίθετα από τη δοκιμή εφελκυσμού η μεγαλύτερη ενέργεια εδώ απορροφήθηκε απο το δοκίμιο Al-0,25% κ.β. St ενώ επίσης το μικρότερο ποσοστό αντιστοιχεί στο δοκίμιο της μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε φολίδες χάλυβα με μεγάλη απόκλιση

από το δοκίμιο του καθαρού αλουμινίου (29,45%). Αναλυτικά τα ποσά της απορροφούμενης ενέργειας και η σύγκρισή τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10.



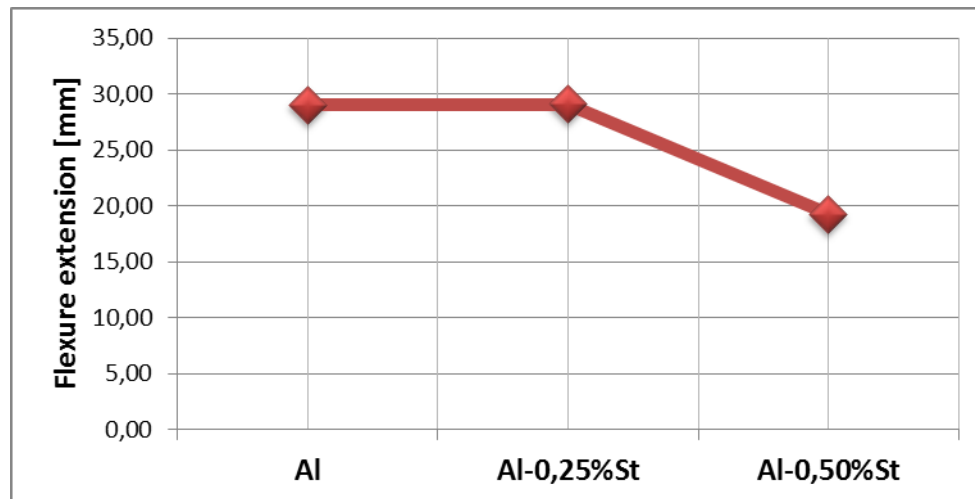
*Σχήμα 4.10* Απορροφούμενες ενέργειες κατά την κάμψη για όλες τις σειρές δοκιμών.

Η μεταβολή του μέγιστου φορτίου κάθε δοκιμίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11.



*Σχήμα 4.11* Διάγραμμα φορτίου κάμψης των υλικών.

Επιπλέον στον έλεγχο αντοχής σε κάμψη μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το flexure extension, το οποίο για το δοκίμιο του καθαρού αλουμινίου και το δοκίμιο Al-0,25%St είναι πρακτικά ίδιο με μια αμελητέα μεταβολή μόλις 0,2%. Αλλαγή παρατηρείται για το δοκίμιο Al-0,50%St όπου η τιμή του flexure extension μειώνεται κατά ποσοστό 33,64% και ισούται με 19,25mm. Στο σημείο αυτό παρατηρήθηκε ρωγμή στο κέντρο του δοκιμίου.



Σχήμα 4.12 Διάγραμμα μεταβολής της flexure extension.

Η δοκιμή της κάμψης τριών σημείων συνοψίζεται αριθμητικά στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Υλικό	Μέγιστο φορτίο κάμψης (N)	Μεταβολή (%)	Flexure extension (mm)	Μεταβολή (%)	Ενέργεια κάμψης (J)	Μεταβολή (%)
Al (30)	818,79		29,01		21475,3283	
Al-0,25%St	977,17	19,34	29,07	0,21	25558,5572	15,98
Al-0,50%St	684,56	-16,39	19,25	-33,64	15150,9525	-29,45

Πίνακας 4.8 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων της δοκιμής σε κάμψη.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Συμπεράσματα

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, ως προς τα πεδία ελέγχου στα οποία υποβλήθηκαν τα παραχθέντα δοκίμια:

- **Μεταλλογραφική μελέτη**

Η μεταλλογραφική μελέτη έδειξε ότι τόσο το εμβαδό των διαδενδριτικών περιοχών όσο και το μέσο μήκος τους αυξάνεται στην περίπτωση της προσθήκης φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα σε ποσοστό 0,25% ενώ δε διακρίνεται σε μεγάλο βαθμό η δημιουργία εγκλεισμάτων. Τα εγκλείσματα που δημιουργούνται είναι σαφώς εμφανέστερα σε περίπτωση διπλασιασμού του ποσοστού των φολίδων (δοκίμιο Al-0,50%St) όπως είναι εμφανές στις εικόνες της μικροδομής που ελήφθησαν από το οπτικό μικροσκόπιο. Οι περιοχές όπου εμφανίζονται εγκλείσματα, για την περιεκτικότητα αυτή, χαρακτηρίζονται από μεγάλη συσσώρευση και κατευθυντικότητα.

- **Σκληρομέτρηση**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, είναι προφανές ότι η σκληρότητα των δοκιμίων αυξάνεται, αυξανόμενης της περιεκτικότητάς τους σε φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα. Συγκεκριμένα το δοκίμιο αλουμινίου παρουσίασε μέση σκληρότητα 47,9 HV5, το δοκίμιο Al-0,25% κ.β. St 48,3HV5 και το δοκίμιο Al-0,50% κ.β. St εμφάνισε σκληρότητα 55,2 HV5.



- **Δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό**

Στη δοκιμή εφελκυσμού παρατηρήθηκε ότι με προσθήκη φολίδων χάλυβα στο αλουμίνιο σε ποσοστό 0,25%St η τιμή του φορτίου θραύσης αυξάνεται κατά 11,71%, ενώ η επιμήκυνση θραύσης και η ενέργεια θραύσης μειώνονται κατά 8,18% και 11,22%, αντίστοιχα. Για το δοκίμιο Al-0,50%St οι τιμές της ενέργειας που απορροφά το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και της επιμήκυνσης θραύσης είναι παραπλήσιες με αυτές του δοκιμίου του αλουμινίου. Μεγαλύτερη απόκλιση υπάρχει στην τιμή του φορτίου θραύσης που φτάνει το 5,88%.

- **Δοκιμή αντοχής σε κάμψη τριών σημείων**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δοκιμή σε κάμψη καθώς σ' αυτήν το δοκίμιο Al-0,25%St εμφανίζεται βελτιωμένο σε σχέση με το δοκίμιο του αλουμινίου, αφού απορρόφησε 15,98% περισσότερη ενέργεια, ενώ το μέγιστο φορτίο κάμψης του ισούται με 977,17 N έναντι 818,79 N που είναι το μέγιστο φορτίο κάμψης που καταγράφηκε στο δοκίμιο του αλουμινίου. Το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε φολίδες χάλυβα παρουσιάζει πιο φτωχές ιδιότητες, για παράδειγμα η ποσοστιαία μεταβολή της flexure strength ισούται με -3,64%.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα Διπλωματική εργασία αφορούσε την επίδραση της προσθήκης φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα σε κράμα αλουμινίου υψηλής καθαρότητας. Η επίδραση αυτή, μελετήθηκε μέσω μίας σειράς μηχανικών δοκιμών, σκληρομετρήσεων και μεταλλογραφικών παρατηρήσεων.

Ως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, προτείνεται η μελέτη της επίδρασης του εξεταζόμενου υλικού προσθήκης (φολίδες ανοξείδωτου χάλυβα 316-L) σε ένα ευρύτερο φάσμα μηχανικών δοκιμών (π.χ. κόπωση και θλίψη) και σε ταχύτητες επιβολής φορτίου τόσο στατικές, όσο και δυναμικές. Πέραν όμως των μηχανικών δοκιμών, η επίδραση της προσθήκης φολίδων ανοξείδωτου χάλυβα στην κατεργασιμότητα και διαμορφωσιμότητα κραμμάτων αλουμινίου, αποτελεί επίσης ενδιαφέρον αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα θα μπορούσαν να εξαχθούν από τη μελέτη επίδρασης της ενσωμάτωσης κόνεων/φολίδων και άλλων ισχυρών μετάλλων σε αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Fler, July 2010, *Heat Recovery from the Exhaust Gas of Aluminum Reduction Cells*, School of Science and Engineering, Reykjavík University.
- [2] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, 1996, *Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [3] D. Altenpohl, 1982, *Aluminum Viewed from Within*, Aluminium Verlag, Dusseldorf, West Germany, p.1-2.
- [4] W. T. Choate, J. A. S. Green, 2003, *Energy Requirements for Aluminum Production Historical Perspective, Theoretical Limits and Current Practices*, US Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington D.C.
- [5] U.S. Department of energy, Waste Heat Recovery: «Technology and Opportunities in U.S. Industry», March 2008, U.S.A.
- [6] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, 1999, *Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Υλικά*, Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα
- [7] Γ. Κ. Στάμουλας, 1987, *Στοιχεία Μεταλλουργίας*, Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς.
- [8] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, 2007 *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [9] Β.Ι. Παπάζογλου, 1995, *Ναυπηγική τεχνολογία*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.



- [10] ‘Aluminium alloys’, The Aluminum Association, Inc , viewed 5 January 2016  
<<http://www.aluminum.org/>>
- [11] Vanderlei Gusberti, Dagoberto S. Severo, Barry J. Welch, Maria Skyllas-Kazacos, *Modelling the Aluminium Smelting Cell Mass and Energy Balance – A tool based on the 1st law of Thermodynamics*, Brazil.
- [12] N. Dautzenberg and H.Gessel, 1976, *Production Technique and Properties of Austenitic Gr-Ni Stainless Steel Powders*, Powder Metall. Int. Vol 8 (No 1), p. 14-17.
- [13] G. Schulz, Oct 18-20 2000 ‘Melt Film Gas Atomization – The key to Cheaper MIM Powders’, Second European Symposium on Powder Injection Molding, EPMA Munich Germany p. 265-272.
- [14] L. Tremblay, F. Chagnon and Y.Thomas, 2000, *Enhancing Green Strength of P/M Materials, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, MPIF, Part 3, p.129.
- [15] Metal Powder Industries Federation (MPIF), Princeton, N.J. Unpublished Data.
- [16] P.U. Gummeson, 1972, *Modern Atomizing Techniques*, Powder Metallurgy, Vol. 15 (No 290), p. 67-94.
- [17] Apparatus for Producing Molten Metal, U.S. Patent 2,956,304 1960.
- [18] J.-P. Birat, 2006, *Alternative ways of making steel: Retrospective and prospective*, a Revue de Métallurgie – CIT, (no 11), p. 937–955.
- [19] A.J. Yule and J.J. Dunkeley, 1994, *Atomization of Melts*, Claredon Press, Oxford.
- [20] R.C. Leyton and O. Andersson, 2002, *High Density Sintered Stainless Steel with Close Tolerances, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, MPIF Vol 7, p. 118-126.
- [21] A.K. Sinha, 1989, *Ferrous Physical Metallurgy*, Butterworths, London,.
- [22] T. Allen, 1981, *Particle Size Measurement*, 3<sup>rd</sup> ed., Champan And Hall, p.136
- [23] E. Klar, P.K. Samal, 2007 *Powder Metallurgy Stainless Steels, Processing, Microstructures and Properties*, ASM International, USA p. 23-35
- [24] Apparatus for Producing Molten Metal, U.S. Patent 3,309,733 1960.
- [25] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, *Γενική Μεταλλογνωσία*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.



[26] ‘Metal Powders’, Metal Powder Industries Federation, Inc US viewed 18 January 2016,

<[www.mdif.org](http://www.mdif.org)>

[27] ‘Stainless Steel - Grade 316L - Properties, Fabrication and Applications (UNS S31603)’, Atlas Specialty Metals, viewed 6 January 2016,

<<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2382>>.

[28] Δ. Α. Λάγαρης, 2009, *Ανάπτυξη και Τεχνολογικές Ιδιότητες Προηγμένου Κράματος Αλουμινίου 7075*, ΕΜΠ, Αθήνα.

[29] ‘Wrought Aluminium Alloys’, Alumatter, viewed January 7 2016

<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417080>>

