



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών**

Διπλωματική Εργασία

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΑΝΟΔΟΜΩΝ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑΣ 96,66%**

ΚΡΟΜΜΥΔΑΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αθήνα, Μάρτιος 2016



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών**

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση νανοδομών γραφενίου στις μηχανικές ιδιότητες και τη
μικροδομή αλουμινίου καθαρότητας 96,66%

Effect of graphene nanoplatelets on the mechanical properties and
microstructure of aluminum (96,66% Al)

ΚΡΟΜΜΥΔΑΣ ΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν σε αυτήν.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, καθώς και τον Υπ. Διδάκτορα κ. Γεώργιο Σερέτη για την άψογη συνεργασία, την πολύτιμη βοήθεια του, τη συνεχή καθοδήγηση αλλά και την απεριόριστη υπομονή του από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υπ. Διδάκτορα κ. Ιωάννη Παπαντωνίου για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια των μηχανικών δοκιμών, όπως επίσης και τον Υπ. Διδάκτορα κ. Παναγιώτη Καρακίζη για τη βοήθεια του στο κομμάτι της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Επίσης, ευχαριστώ θερμά το τεχνικό προσωπικό του Τομέα κους Κερασιώτη Κωνσταντίνο και Μελισσά Νικόλαο για τη σημαντικότητα συμβολή τους, τόσο στην προετοιμασία, όσο και στην εκτέλεση των πειραματικών διαδικασιών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνεργάτη, συμφοιτητή και φίλο μου, Γεώργιο Κουτή, για τη στήριξη αλλά και τη βοήθεια του από την πρώτη μέχρι και την τελευταία μέρα της συνεργασίας μας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την μελέτη της επίδρασης νανοδομών γραφενίου (Graphene nanoplatelets - GNPs) στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου καθαρότητας 96.66%.

Η ενσωμάτωση των νανοδομών γραφενίου στο αλουμίνιο πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της ελεύθερης χύτευσης με ανάδευση σε θερμοκρασία καλουπιού 100°C. Η προσθήκη των GNPs έγινε σε περιεκτικότητες 0.10% w.t. και 0.20% w.t. Στα προκύπτοντα υλικά πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφικός έλεγχος, σκληρομέτρηση και μηχανικές δοκιμές (εφελκυσμός και κάμψη τριών σημείων).

Όσον αφορά τον μεταλλογραφικό έλεγχο, τα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη, λειάνθηκαν, στιλβώθηκαν και προσβλήθηκαν χημικά σε αντιδραστήριο Keller's. Τέλος, οι επιφάνειες των δοκιμίων παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο και σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Υπολογίστηκε ότι η προσθήκη των GNPs δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το εμβαδό των διαδενδριτικών περιοχών, όμως στην προσθήκη 0.10% w.t.GNPs μειώνεται το μέσο μήκος τους κατά 8%, ενώ στην προσθήκη 0.20% w.t.GNPs αυξάνεται το μέσο μήκος τους κατά 19%. Επίσης, η προσθήκη 0.10% w.t.GNPs παρουσιάζει εγκλείσματα GNPs τα οποία δεν φαίνεται να λειτουργούν σαν πυρήνες ανάπτυξης δενδριτών (όπως αναμενόταν λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους), ενώ παρουσιάζει ίδια κατακρήμνιση φάσης στις διαδενδριτικές περιοχές (MnFeAl_{32}) με το αλουμίνιο καθαρότητας 96.66%. Επίσης, δημιουργούνται και κάποιες αραιές καθιζήσεις (MgAl_{53}). Στην περίπτωση της προσθήκης 0.20% w.t. GNPs, παρατηρείται διαφοροποίηση των διαδενδριτικών περιοχών, οι οποίες πλέον αποτελούνται από διαφορετική φάση (MgAl_{53}). Και στην περίπτωση αυτή, σχηματίζονται εγκλείσματα GNPs χωρίς πάλι να λειτουργούν σαν πυρήνες ανάπτυξης

δενδριτών, καθιζήσεις (MgSiAl_{30}), δενδριτική δομή αλουμινίου α-φάσης, ενώ δημιουργούνται και κρύσταλλοι ($\text{Al}_{12}\text{C}_4\text{O}$), συσσωρευμένοι σε άκρα διαδενδριτικών περιοχών. Επίσης, οι βελονοειδείς δομές των διαδενδριτικών περιοχών έχουν μειωθεί σημαντικά ως προς το μήκος τους.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις σκληρομετρήσεις σε δοκίμια κάθε περιεκτικότητας σε GNPs, από τις οποίες παρατηρήθηκε ότι η σκληρότητα των υλικών είναι ανάλογη της κατά βάρος προσθήκης γραφενικών νανοδομών.

Όσον αφορά τις μηχανικές δοκιμές, για περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs, στον εφελκυσμό παρατηρήθηκε αύξηση του φορτίου θραύσης (UTS) κατά 12.4%, αύξηση της ενέργειας θραύσης (Energy at break) κατά 6% και μείωση της επιμήκυνσης θραύσης (extension at break) κατά 14%. Στην κάμψη το υλικό παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με το αλουμίνιο καθαρότητας 96.66%. Η προσθήκη 0.20% w.t. GNPs, εκτός από μία μικρή αύξηση του φορτίου θραύσης (UTS), της τάξης του 4.4%, που προσέδωσε στο υλικό, φαίνεται να μειώνει γενικότερα τις επιδόσεις του.

Από το σύνολο των ελέγχων και των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προσθήκη γραφενικών νανοδομών (GNPs) σε περιεκτικότητα 0.10% w.t. βελτιώνει τις επιδόσεις του αλουμινίου, ενώ περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αυτού φαίνεται να τις εξασθενεί.

Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of graphene nanoplatelets (GNPs) addition on the mechanical properties and microstructure of aluminum (96.66% pure).

The incorporation of the graphene nanoplatelets in aluminum was performed by stir casting process on hot steel mold (mold temperature 100°C). The investigated additions of GNPs were 0.10% w.t. and 0.20% w.t. The resulting materials were metallographically investigated, as well as they underwent Vickers hardness tests, tensile tests and three point bending tests.

The specimens were encased in resin and underwent grinding, polishing, and etching processes. Finally, the surfaces of the specimens observed using optical microscope and scanning electron microscope (SEM). It was estimated that the addition of GNPs does not affect the area of the interdendritic regions but the addition 0.10% w.t. GNPs reduces their average length by 8%, while the addition of 0.20% w.t. GNPs increases it by 19%. Also, the addition of 0.10% w.t. GNPs results in GNPs inclusions which do not seem to play the role of dendrite growth cores (as expected due to their small dimensions). The same phase precipitates (MnFeAl_{32}) in the interdendritic regions with aluminum 96.66%, exist in this case, as well. Limited MgAl_{53} precipitates can also be observed. Regarding the 0.20% w.t. GNPs addition a different interdendritic phase (MgAl_{53}) can be observed. In this case, there are also GNPs inclusions, which do not seem to play the role of dendrite growth cores, limited MgSiAl_{30} precipitates, α -phase aluminum dendrites and $\text{Al}_{12}\text{C}_4\text{O}$ crystals accumulated near the limits of the interdendritic regions. Also, the acicular forms of the interdendritic regions' precipitates has significantly reduced in length.

Three hardness measurements on each specimen were performed. It was observed that the hardness of the material is proportional to the GNPs w.t. addition.

Regarding the 0.10% w.t. GNPs addition, increased ultimate tensile strength (UTS) by 12.4%, increased energy at break by 6% and reduced extension at break by 14% were observed on tensile test results. In three point bending tests, this material had similar behavior to the pure aluminum. The 0.20% w.t. GNPs addition, besides a slight increase in UTS by 4.4%, seems to reduce the general performance of the material.

As a general remark, it can be noted that a 0.10% w.t. GNPs addition improves the performance of pure aluminum, while further increase of this percentage weakens it.

Πίνακας περιεχομένων

Εικόνες - Σχήματα.....	1
Πίνακες.....	8
Εισαγωγή.....	9
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
Κεφάλαιο 1 ^ο	13
1. Αλουμίνιο	13
1.1 Παραγωγή αλουμινίου.....	13
1.1.1 Παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου	14
1.1.1.1 Μέθοδος Bayer	14
1.1.1.2 Μέθοδος Hall-Heroult	16
1.1.2 Παραγωγή δευτερόχυτου αλουμινίου.....	17
1.2 Ιδιότητες αλουμινίου.....	19
1.3 Κράματα αλουμινίου	21
1.3.1 Ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου	21
1.3.2 Κύρια κραματικά στοιχεία.....	22
1.3.3 Συμβολισμός και ταξινόμηση κραμάτων αλουμινίου.....	28
1.3.3.1 Κράματα διαμόρφωσης.....	28
1.3.3.2 Κράματα χύτευσης.....	36
1.4 Βασικές κατεργασίες αλουμινίου	41

1.5	Εφαρμογές του αλουμινίου και των κραμάτων του	43
1.6	Σύγχρονες εφαρμογές του αλουμινίου και των κραμάτων του	44
Κεφάλαιο 2^ο		46
2.	Γραφένιο (Graphene)	46
2.1	Ο άνθρακας και οι αλλοτροπικές μορφές του	46
2.2	Ιδιότητες και εφαρμογές του γραφενίου	47
2.2.1	Ιδιότητες του γραφενίου	48
2.2.2	Εφαρμογές του γραφενίου	50
2.3	Νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets)	51
2.3.1	Μέθοδοι παρασκευής νανοδομών γραφενίου	52
2.3.2	Ιδιότητες των νανοδομών γραφενίου	53
2.4	Επίδραση του γραφενίου στο αλουμίνιο	54
 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ		
Κεφάλαιο 3^ο		57
3.	Πειραματικό μέρος	57
3.1	Χύτευση	57
3.1.1	Υλικά και Εξοπλισμός	57
3.1.2	Μέτρα προστασίας	60
3.1.3	Διαδικασία της χύτευσης	61
3.1.4	Παραχθέντα δοκίμια	64
3.2	Μεταλλογραφία	64
3.2.1	Προετοιμασία δοκιμίων	65
3.2.2	Αποτελέσματα μεταλλογραφικής μελέτης	66
3.3	Σκληρομέτρηση	96
3.4	Δοκιμές Εφελκυσμού	97
3.5	Δοκιμές κάμψης	101
Κεφάλαιο 4^ο		106

4.	Συμπεράσματα.....	106
Κεφάλαιο 5 ^ο		108
5.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	108
Βιβλιογραφία		109



Εικόνες – Σχήματα

Εικόνα 1.1 Το ορυκτό Βωξίτης.....	9
Εικόνα 1.2 Σπουδαίοι Εφευρέτες.....	10
Εικόνα 1.3 Το μεγαλύτερο ορυχείο βωξίτη στον κόσμο ιδρυμένο στην Αυστραλία το 1976 ...	13
Εικόνες 1.4 New scrap materials (α) old scrap materials (β)	17
Εικόνα 1.5 Περιοδικός Πίνακας.....	19
Εικόνες 1.6 Αλουμινόχαρτο (α) συσκευασίες φαρμάκων (β).....	29
Εικόνα 1.7 Δεξαμενή καυσίμου για αεροναυπηγική χρήση (α) εσωτερική επένδυση αεροσκάφους από αλουμίνιο (β).....	30
Εικόνες 1.8 Επικαλύψεις κτιρίων (α) συσκευασίες αναψυκτικών (β)	31
Εικόνες 1.9 Πιστόνια (α) συγκολλήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία (β).....	32
Εικόνες 1.10 Εξέδρα άντλησης πετρελαίου (α) εξωτερική επένδυση αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία (β).....	33
Εικόνες 1.11 Η Γέφυρα Forsmo στην Νορβηγία (α) γιγαντιαίος θόλος αλουμινίου (β)	34
Εικόνα 1.12 Περίβλημα αεροσκάφους από κράματα αλουμινίου σειράς 7xxx και 2xxx.....	35
Εικόνες 1.13 Προφυλακτήρες αυτοκινήτων (α) Πριτσίνια αλουμινίου (β)	35
Εικόνες 1.14 Εφαρμογή στην αεροδιαστημική (α) Κατασκευή Boeing από κράμα αλουμινίου-λιθίου (β).....	36
Εικόνες 1.15 Χύτευση σε άμμο (α) χύτευση σε καλούπι μεταλλικού τύπου (β)	37



Εικόνες 1.16	Κεφαλές κυλίνδρων (α) μέρη εξατμίσεως αυτοκινήτου (β)	38
Εικόνες 1.17	Ζάντα αλουμινίου (α) εξάρτημα αντλίας νερού (β)	39
Εικόνες 1.18	Κούφωμα αλουμινίου (α) μέρη για αεροναυπηγική χρήση (β)	40
Εικόνες 1.19	Ρουλεμάν (α) κορμός μηχανής εσωτερικής καύσης (β)	41
Εικόνα 1.20	Ηλεκτρικά καλώδια αλουμινίου για μεταφορά ενέργειας	44
Εικόνα 2.1	Άνθρακας.....	46
Εικόνα 2.2	Η μορφή του γραφενίου.....	47
Εικόνα 2.3	Μικροσκοπική απεικόνιση νανοδομών γραφενίου (φακός x5).....	51
Εικόνες 2.4	Μικροσκοπική απεικόνιση νανοδομών γραφενίου(φακός x50) (α) Μικροσκοπική απεικόνιση νανοδομών γραφενίου με χρωματικό φίλτρο (φακός x50) (β).....	52
Εικόνα 3.1	Χύτευση αλουμινίου σε μεταλλικό καλούπι βαμμένου χάλυβα	57
Εικόνα 3.2	Υλικά και εξοπλισμός πειραμάτων.....	59
Εικόνα 3.3	Μέτρα προστασίας που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων	61
Εικόνα 3.4	Εισαγωγή κομματιών αλουμινίου ορθογωνικής διατομής στο κεραμικό δοχείο....	62
Εικόνα 3.5	Εισαγωγή κεραμικού δοχείου στον εργαστηριακό κλίβανο	62
Εικόνα 3.6	Χύτευση αλουμινίου στο μεταλλικό καλούπι βαμμένου χάλυβα	62
Εικόνα 3.7	Τοποθέτηση άνω τμήματος στο μεταλλικό καλούπι	62
Εικόνα 3.8	Παραμονή του υλικού στο μεταλλικό καλούπι για 2 λεπτά	63
Εικόνα 3.9	Αφαίρεση δοκιμίου απο το καλούπι και ελεύθερη ψύξη στον αέρα	63
Εικόνα 3.10	Δοκίμια κράματος αλουμινίου καθαρότητας 96.66%.....	64
Εικόνα 3.11	Εγκιβωτισμένο δοκίμιο σε ρητίνη	65
Εικόνα 3.12	Περιστρεφόμενος λειαντικός τροχός	65
Εικόνα 3.13	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x20).....	68
Εικόνα 3.14	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x10).....	69

Εικόνα 3.15	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x20).....	70
Εικόνα 3.16	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x20).....	70
Εικόνα 3.17	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x20).....	71
Εικόνα 3.18	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x50).....	71
Εικόνα 3.19	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x50).....	72
Εικόνα 3.20	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x50).....	72
Εικόνα 3.21	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x100)....	73
Εικόνα 3.22	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο σάρωσης (φακός x100)....	73
Εικόνα 3.23	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100)	74
Εικόνα 3.24	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100)	74
Εικόνα 3.25	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)	75
Εικόνα 3.26	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)	75

Εικόνα 3.27 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x1000)	76
Εικόνα 3.28 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x1000)	76
Εικόνα 3.29 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)	77
Εικόνα 3.30 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)	77
Εικόνα 3.31 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)	78
Εικόνα 3.32 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)	79
Εικόνα 3.33 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)	79
Εικόνα 3.34 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)	80
Εικόνα 3.35 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)	81
Εικόνα 3.36 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)	81
Εικόνα 3.37 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)	82
Εικόνα 3.38 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)	82
Εικόνα 3.39 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)	83

Εικόνα 3.40	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).....	83
Εικόνα 3.41	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).....	84
Εικόνα 3.42	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).....	84
Εικόνα 3.43	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).....	85
Εικόνα 3.44	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).....	86
Εικόνα 3.45	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500).....	86
Εικόνα 3.46	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000).....	87
Εικόνα 3.47	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000).....	87
Εικόνα 3.48	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10).....	88
Εικόνα 3.49	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10).....	89
Εικόνα 3.50	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20).....	89
Εικόνα 3.51	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20).....	90
Εικόνα 3.52	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).....	90
Εικόνα 3.53	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50).....	91
Εικόνα 3.54	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).....	91

Εικόνα 3.55	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).....	92
Εικόνα 3.56	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100).....	92
Εικόνα 3.57	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100).....	93
Εικόνα 3.58	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500).....	93
Εικόνα 3.59	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500).....	94
Εικόνα 3.60	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x1000).....	94
Εικόνα 3.61	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000).....	95
Εικόνα 3.62	Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000).....	95
Εικόνα 3.63	Προοδευτικές απόψεις εφελκυσμού σε δοκίμιο αλουμινίου καθαρότητας 96,66%	97
Εικόνα 3.64	Προοδευτικές απόψεις δοκιμής κάμψης 3-σημείων σε δοκίμιο αλουμινίου καθαρότητας 96,66%	102
Σχήμα 1.1	Διάγραμμα ροής της μεθόδου Bayer	14
Σχήμα 1.2	Διάταξη της μεθόδου Hall-Heroult.....	16
Σχήμα 1.3	Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Χαλκού	23
Σχήμα 1.4	Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγνησίου.....	24
Σχήμα 1.5	Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγγανίου	25
Σχήμα 1.6	Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Πυριτίου.....	25
Σχήμα 1.7	Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Ψευδαργύρου.....	26
Σχήμα 3.1	Ποσοστιαία απεικόνιση δενδριτικών-διαδενδριτικών περιοχών σε δοκίμιο αλουμινίου μήτρας	69



Σχήμα 3.2 Ποσοστιαία απεικόνιση δενδριτικών-διαδενδριτικών περιοχών σε δοκίμιο Al-0.10% w.t. GNPs	80
Σχήμα 3.3 Ποσοστιαία απεικόνιση δενδριτικών-διαδενδριτικών περιοχών σε δοκίμιο Al-0.20% w.t. GNPs	88
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα μέσης σκληρότητας κατά Vickers των εξετασθέντων δοκιμίων	97
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα εφελκυσμού φορτίου-επιμήκυνσης.....	98
Σχήμα 3.6 Φορτίο θραύσης εφελκυσμού για κάθε υλικό.....	99
Σχήμα 3.7 Επιμήκυνση θραύσης εφελκυσμού για κάθε υλικό	100
Σχήμα 3.8 Ενέργεια θραύσης εφελκυσμού για κάθε υλικό.....	100
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα κάμψης φορτίου-επιμήκυνσης	102
Σχήμα 3.10 Μέγιστο φορτίο κάμψης για κάθε υλικό.....	103
Σχήμα 3.11 Flexure extension για κάθε υλικό	104
Σχήμα 3.12 Ενέργεια κάμψης για κάθε υλικό.....	104



Πίνακες

Πίνακας 1.1 Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων στο αλουμίνιο	22
Πίνακας 1.2 Ταξινόμηση κραμάτων αλουμινίου	28
Πίνακας 3.1 Φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αλουμινίου μήτρας.....	67
Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers... ..	96
Πίνακας 3.3 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού... ..	99
Πίνακας 3.4 Ποσοστιαίες μεταβολές τιμών εφελκυσμού... ..	101
Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης.....	103
Πίνακας 3.6 Ποσοστιαίες μεταβολές τιμών κάμψης.....	105

Εισαγωγή

Το αλουμίνιο (αργίλιο) είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα στοιχεία του στερεού φλοιού της γης μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο [1]. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο το οποίο υπάρχει σχεδόν παντού στη φύση, αλλά "κλειδωμένο" σε χημικές ενώσεις με μεγάλη χημική ευστάθεια. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού και βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Το 98% της βιομηχανικής παραγωγής του αλουμινίου προέρχεται από τον βωξίτη.[2]



Εικόνα 1.1 Το ορυκτό βωξίτης



Εικόνα 1.2 Σπουδαίοι Εφευρέτες

Πρώτος ο Βρετανός Davy το 1808 ανακαλύπτει την ύπαρξη του μετάλλου ενώ το 1821 Ο P. Berthier ανακαλύπτει κοντά στο χωριό Les Baux στη Γαλλία, μια σκληρή κοκκινωπή ουσία που περιέχει 52% αλουμίνιο και την ονομάζει Βωξίτη. Το 1825 ο Δανός Hans Christian Oersted παράγει μια μικρή ποσότητα αλουμινίου χρησιμοποιώντας διάλυμα ποτάσας. Ο Γερμανός Friedrich Wohler το 1827 ανακοινώνει την ανακάλυψή του που έχει να κάνει με την παραγωγή αλουμινίου μέσω της αντίδρασης ποτάσας με άνυδρο χλωρίδιο του αλουμινίου ενώ ο ίδιος το 1845 ανακαλύπτει και καταγράφει την πυκνότητα του αλουμινίου και μία από τις βασικές του ιδιότητες, την ελαφρότητα. Για πρώτη φορά στην ιστορία το 1854 ο Γάλλος Henri Saite-Claire Deville βελτιώνει τη μέθοδο του Wohler και παράγει βιομηχανικά αλουμίνιο. Η τιμή του μετάλλου ξεπερνά αυτή του χρυσού και της πλατίνας. Το 1855 μία ράβδος αλουμινίου εκτίθεται στη Διεθνή Έκθεση των Παρισίων, μαζί με άλλα πολύτιμα μέταλλα ενώ το 1886 δύο νέοι και άγνωστοι επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Toussaint Heroult και ο Αμερικάνος Charles Martin Hall εφευρίσκουν τη μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος αλουμίνας. Οι δύο επιστήμονες εργάστηκαν χωριστά, χωρίς να ξέρουν ο ένας την εργασία του άλλου. Οι πρώτες εταιρείες παραγωγής αλουμινίου γεννήθηκαν στη Γαλλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ το 1888, ενώ το 1889 ο Αυστριακός Friedrich Bayer, γιός του ιδρυτή της περίφημης εταιρίας χημικών ουσιών, εφευρίσκει τη μέθοδο παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων αλουμίνας από τον βωξίτη. Το 1900 η ετήσια παραγωγή αλουμινίου σπάει κάθε ρεκόρ, φτάνοντας τους 8 τόνους σε ετήσια βάση. Η πρώτη μονάδα παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου σε βιομηχανικές ποσότητες δημιουργήθηκε στον Καναδά από την Northern Aluminium Company, που αργότερα έγινε η γνωστή σε όλους Alcoa. Η πατρίδα της πρώτης αυτής μονάδας ήταν το Shawinigan Falls Quibec, κοντά στον ποταμό Saint Maurice, μία ιδανική τοποθεσία για την παραγωγή υδροηλεκτρικής



ενέργειας. Η μονάδα παρήγαγε έναν τόνο αλουμινίου την ημέρα από το 1901, όταν ξεκίνησε η παραγωγή, έτσι λοιπόν το αλουμίνιο αρχίζει να δημιουργεί τη δική του αγορά καθώς η παραγωγή του στις αρχές του αιώνα έβγαλε το μέταλλο αυτό από τους πίνακες των πολυτίμων μετάλλων. Στις αρχές του αιώνα, η παραγωγή έφτασε σε μερικούς χιλιάδες τόνους. Το 1908 ξεκίνησαν οι πρώτες χρήσεις του αλουμινίου σε βιομηχανικές εφαρμογές με την παραγωγή καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης και το 1910 στην Βοστώνη χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά καλώδια σε υπόγειες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μονωμένες με χαρτί και μολύβι. Το 1912 έχουμε την παραγωγή κουπαστών εσωτερικών χώρων από αλουμίνιο για το επιβατικό πλοίο Aquitana και το 1917 την παραγωγή καλωδίου για μετασχηματιστές ηλεκτρικής ενέργειας, φτάνοντας στο 1920 με την παραγωγή μηχανικών μερών για μηχανές. Το 1925, καθώς η ζήτηση για αλουμίνιο αυξάνονταν, η Alcan αύξησε την παραγωγή της κατασκευάζοντας νέα μονάδα παραγωγής αλουμινίου και ηλεκτρικής ενέργειας στην πόλη Arvida της ίδιας Καναδικής πολιτείας. Η άνοδος της κατανάλωσης αλουμινίου σήμανε τη μείωση κατανάλωσης χαλκού.

Λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας, η αγορά έχει ανάγκη καθημερινά απο νέες προτάσεις και λύσεις όσον αφορά τη δημιουργία ισχυρότερων και ανθεκτικότερων υλικών με σκοπό τη χρήση τους σε όλο και πιο απαιτητικές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια μελετήθηκαν διάφοροι τρόποι ενίσχυσης αλουμινίου καθώς και σύνθετα υλικά μήτρας αλουμινίου με διαφόρων τύπου ενισχυτικά εγκλείσματα. Η παρούσα διπλωματική έχει σαν σκοπό την μελέτη της επίδρασης νανοδομών γραφενίου στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή αλουμινίου καθαρότητας 96.66%.



1ο ΜΕΡΟΣ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1

Αλουμίνιο (Aluminum)

1.1 Παραγωγή αλουμινίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το αλουμίνιο παρήχθη βιομηχανικά για πρώτη φορά το 1886. Όπως τα περισσότερα μέταλλα, έτσι και αυτό βρίσκεται υπό τη μορφή ορυκτών. Από βιομηχανικής πλευράς το πλέον σημαντικό ορυκτό είναι ο βωξίτης, όπου το αργίλιο περιέχεται εκεί υπό τη μορφή οξειδίων ή ένυδρων οξειδίων (Al_2O_3) την λεγόμενη αλουμίνα. Ο βωξίτης για να θεωρηθεί οικονομικά εκμεταλεύσιμος πρέπει να έχει περιεκτικότητα σε αλουμίνα τουλάχιστον 55%. Το μέταλλο που παράγεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας είτε ως καθαρό αλουμίνιο είτε ως κράμα αλουμινίου ονομάζεται πρωτόχυτο αλουμίνιο ενώ μια άλλη πηγή αλουμινίου, που είναι ιδιαίτερα σημαντική από ενεργειακής άποψης, είναι η επανάτηξη και επαναχύτευση κομματιών που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί (scrap). Το αλουμίνιο που παράγεται μέσα από αυτή την διαδικασία ονομάζεται δευτερόχυτο αλουμίνιο.



Εικόνα 1.3 Το μεγαλύτερο ορυχείο εξόρυξης βωξίτη στον κόσμο βρίσκεται στην Αυστραλία και ιδρύθηκε το 1976

1.1.1 Παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου

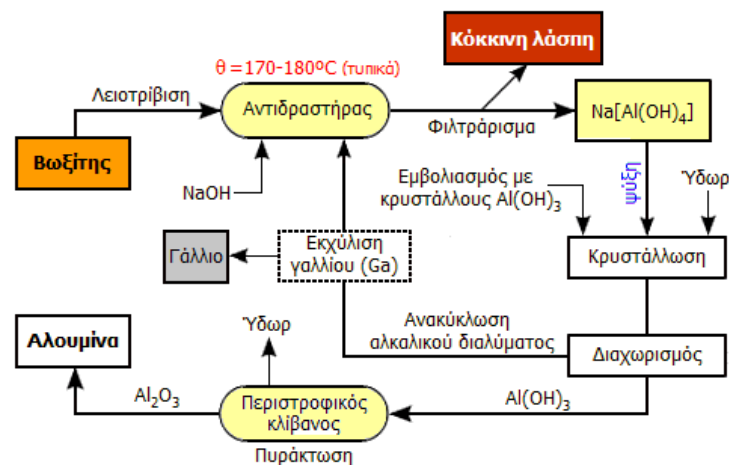
Η παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου παγκοσμίως πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Πρώτο στάδιο είναι η παραγωγή αλουμίνας από το βωξίτη με τη μέθοδο *Bayer* και δεύτερο στάδιο η εξαγωγή του αλουμινίου από την αλουμίνα με την ηλεκτρολυτική μέθοδο *Hall-Heroult*.

1.1.1.1 Μέθοδος Bayer

Η μέθοδος Bayer, η οποία ανακαλύφθηκε από τον Karl Josef Bayer(1847–1904) είναι μία υδρομεταλλουργική εξαγωγική μέθοδος, η οποία εφαρμόστηκε βιομηχανικά το 1888. Στη διεργασία αυτή ο βωξίτης εκχυλίζεται με πυκνό διάλυμα καυστικού νατρίου (NaOH). Η διεργασία είναι κυκλική με την έννοια της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης του μεγαλύτερου μέρους του NaOH [3]. Η μέθοδος αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια, τα οποία είναι:

1. Προετοιμασία βωξίτη (Raw materials preparation)
2. Εκχύλιση υπό πίεση (Digestion)
3. Καταβύθιση (Precipitation)
4. Θερμική διάσπαση (Calcination).

Το διάγραμμα ροής της μεθόδου Bayer παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

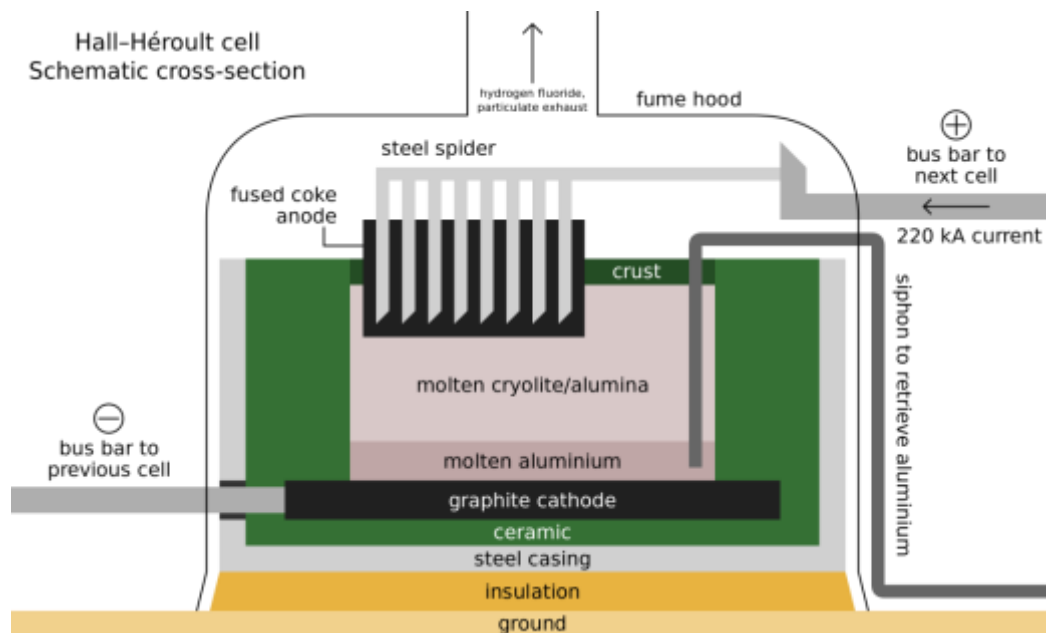


Σχήμα 1.1 Διάγραμμα ροής της μεθόδου Bayer

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου Bayer αρχίζει με την προετοιμασία της τροφοδοσίας στο σύστημα επεξεργασίας. Η τροφοδοσία θα πρέπει να έχει ίδια χημική σύσταση κάθε φορά για να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αυτό επιτυγχάνεται με ανάμειξη βωξιτών από διαφορετικές πηγές, έτσι ώστε να επιτευχθεί ομοιομορφία ως προς τη σύσταση. Επιπλέον, για να πραγματοποιηθούν όλες οι αντιδράσεις που θα αναφερθούν παρακάτω, το υλικό θα πρέπει να θραυστεί και να λειοτριβηθεί ώστε να αποκτήσει μέγεθος κόκκων μικρότερο των 0,15cm. Στη συνέχεια, το υλικό προσβάλλεται με πυκνό διάλυμα NaOH και θερμαίνεται σε αυτόκλειστο (autoclave) υπό πίεση 5-6 Atm και θερμοκρασία 170 βαθμούς κελσίου (digestion). Τα ορυκτά του αργιλίου που περιέχονται στο βωξίτη διαλυτοποιούνται, ενώ το στερεό υπόλειμμα που περιέχει τα οξείδια του σιδήρου και άλλων μετάλλων απομακρύνεται και απορρίπτεται υπό μορφή ιλύος που είναι γνωστή ως «ερυθρά ιλύς» (red mud). Στη συνέχεια ψύχεται το κυοφορούν διάλυμα και αρχίζει η καταβύθιση των κρυστάλλων υδροξειδίου του αλουμινίου (precipitation). Για την όλη διαδικασία χρησιμοποιούνται ειδικά δοχεία, που ονομάζονται κρυσταλλωτήρες. Πρόκειται για κατακόρυφες κυλινδρικές δεξαμενές με ύψος 2,5 έως 3 φορές τη διάμετρο τους που μπορούν να φθάσουν τα 30 m, οι οποίες τοποθετούνται σε διαδοχικές σειρές και ο αριθμός τους μπορεί να φθάσει τα 13-15 δοχεία. Με την ολοκλήρωση του σταδίου καταβύθισης και το διαχωρισμό του προϊόντος σε δύο κλάσματα, συλλέγεται η χονδρομερής ένυδρη αλουμίνα $Al(OH)_3$, ξεπλένεται από υπολείμματα καυστικής σόδας και οδηγείται στο τελευταίο στάδιο της μεθόδου Bayer, τη θερμική διάσπαση της ένυδρης αλουμίνας (calcination). Το τελευταίο αυτό στάδιο λαμβάνει χώρα σε υψηλή θερμοκρασία (1100 °C), χάρη στην οποία η ένυδρη αλουμίνα μετατρέπεται σε άνυδρη αλουμίνα (Al_2O_3), με την απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού. Το τελικό προϊόν ονομάζεται μεταλλουργική άνυδρη αλουμίνα και αποτελεί την τροφοδοσία των κελιών ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή αλουμινίου.

1.1.1.2 Μέθοδος Hall-Heroult

Η μέθοδος Hall-Heroult εφαρμόζεται σε βιομηχανική κλίμακα, για την παραγωγή αλουμινίου από την αλουμίνα. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η άνυδρη αλουμίνα διαλύεται σε τήγμα κρυολίθου (Na_3AlF_6) στους 940°C . Το μείγμα στη συνέχεια, ηλεκτρολύεται και η αλουμίνα διασπάται. Πριν εφευρεθεί η μέθοδος Hall-Heroult, είχαν γίνει πολλές μελέτες για την εξαγωγή του αλουμινίου από την αλουμίνα, χωρίς την προσθήκη κρυολίθου. Όπως για παράδειγμα, να παραχθεί αλουμίνιο από την τήξη καθαρής αλουμίνας. Ωστόσο, λόγω του πολύ υψηλού σημείου τήξης της αλουμίνας (2045°C), μία τέτοια μέθοδος κρίθηκε αντιοικονομική. Επιπλέον, ούτε η ηλεκτρόλυση του αλουμινίου σε υδατικά διαλύματα θα μπορούσε να οδηγήσει σε καθοδική απόθεση του μετάλλου, καθώς το αλουμίνιο είναι ένα ισχυρά ηλεκτροθετικό μέταλλο με συνέπεια τη μαζική ηλεκτρόλυση του H_2O πριν την αναγωγή του αλουμινίου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη της μεθόδου Hall-Heroult. [4]



Σχήμα 1.2 Διάταξη της μεθόδου Hall-Heroult

Η ηλεκτρολυτική λεκάνη αποτελείται από ένα χαλύβδινο περίβλημα στερεωμένο στο έδαφος, το εσωτερικό του οποίου συνίσταται από μονωτικό υλικό και επένδυση άνθρακα. Ο πυθμένας της λεκάνης αποτελεί την κάθοδο, δηλαδή το αρνητικό

ηλεκτρόδιο (-) του κελιού, στο οποίο επικάθεται το τηγμένο μέταλλο. Η άνοδος, δηλαδή το θετικό ηλεκτρόδιο (+) του κελιού, αποτελείται από προεψημένα μεγάλα κομμάτια άνθρακα. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, η αλουμίνα τροφοδοτείται συνεχώς στο τήγμα κρυολίθου, έτσι ώστε η συγκέντρωσή της να είναι περίπου 2% με 6% κ.β του λουτρού, ενώ διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης, αλλά εξαιρετικά υψηλής έντασης, περίπου $1,5 \cdot 10^5 \text{ A}$. Η αλουμίνα διασπάται σε αλουμίνιο, το οποίο συλλέγεται στο βυθό της λεκάνης σε ρευστή κατάσταση, και σε οξυγόνο. Το παραγόμενο κατά την ηλεκτρόλυση οξυγόνο στην άνοδο του κελιού αντιδρά με τον άνθρακα της ανόδου και παράγει διοξείδιο του άνθρακα, διατηρώντας έτσι την θερμοκρασία του τήγματος σε υψηλά επίπεδα.

1.1.2 Παραγωγή δευτερόχυτου αλουμινίου

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η παραγωγή δευτερόχυτου αλουμινίου πραγματοποιείται με την επανάτξη και επαναχύτευση ήδη χρησιμοποιημένων κομματιών, το λεγόμενο scrap. Το scrap προέρχεται από τα αποκόμματα που δημιουργούνται κατά την επεξεργασία του αλουμινίου για την παραγωγή προϊόντων (new scrap) και από συλλογή διαφόρων κομματιών αλουμινίου που η χρήση τους έχει πάψει (old scrap). Κουτιά αναψυκτικών, οχήματα που δεν λειτουργούν πια, κατεδαφισμένα κτίρια και οικιακές συσκευές είναι μερικές από τις πιθανές πηγές για την συλλογή αλουμινίου.[5]



Εικόνα 1.4 (α) new scrap materials



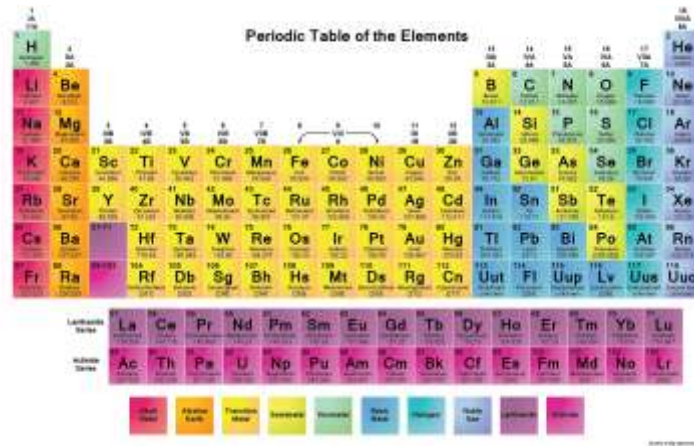
Εικόνα 1.4 (β) old scrap materials



Το δευτερόχυτο αλουμίνιο, εάν ακολουθηθεί ο σωστός τρόπος παραγωγικής διαδικασίας, έχει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με το πρωτόχυτο αλουμίνιο. Η παραγωγή αλουμινίου από ανακυκλωμένο σκραπ απαιτεί μόνο το 5-10% της ενέργειας που απαιτεί η πρωτογενής παραγωγή. Και μειώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη βωξίτη, η ανακύκλωση του αλουμινίου βοηθά στην αποφυγή των τοξικών μεταλλευτικών αποβλήτων. Η παγκόσμια δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου έχει αυξηθεί σταθερά από 2.6 εκατ. τόνους το 1970 σε περίπου 9 εκατ. τόνους το 2000. Από τότε ωστόσο η τάση αντιστράφηκε, αν και η πρωτογενής παραγωγή συνέχισε να αυξάνεται ραγδαία. Ενδεικτικά το 2008, η παραγωγή αλουμινίου από σκραπ ήταν 6,3 εκατ. τόνοι, που αντιστοιχεί στο 16% μόνο της συνολικής παραγωγής. Η εμπειρία της Ιαπωνίας είναι μοναδική κατά το ότι έχει εγκαταλείψει σχεδόν ολοκληρωτικά την πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου, την οποία αντικατέστησε με τη δευτερογενή παραγωγή και τις εισαγωγές. Στις ΗΠΑ, η δευτερογενής παραγωγή από παλαιό σκραπ αντιστοιχεί στο 30% της παραγωγής, ενώ το νέο σκραπ (από την παραγωγική διαδικασία) διπλασιάζει αυτό το ποσοστό. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η δευτερογενής παραγωγή αλουμινίου έχει τριπλασιαστεί από το 1980 και έχει φτάσει το 40% του συνολικού.[6]

1.2 Ιδιότητες Αλουμινίου

➤ Ατομική δομή



A standard periodic table of elements, color-coded by groups. The title 'Periodic Table of the Elements' is centered at the top. The table includes all elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og), with Lanthanide and Actinide series shown separately at the bottom.

Εικόνα 1.5 Περιοδικός Πίνακας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο κοινό στοιχείο στο γήινο φλοιό, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο που υπάρχουν σε μεγαλύτερες ποσότητες. Ανήκει στην ομάδα III_A του περιοδικού συστήματος μαζί με το Βόριο, συμβολίζεται ως Al και έχει ατομικό αριθμό 13.

➤ Κρυσταλλική δομή



Όπως συμβαίνει και στα περισσότερα μαλακά μέταλλα, το αλουμίνιο κρυσταλλώνεται με την κυβική διάταξη των ατόμων. Αυτό σημαίνει ότι τα άτομα του αλουμινίου σχηματίζουν τις γωνίες ενός κύβου με ένα άτομο στο κέντρο της κάθε έδρας με μήκος ακμής κύβου στα $4,049 \times 10^{-8}$ cm και κοντινότερη απόσταση μεταξύ δύο ατόμων στην κρυσταλλική δομή $\sqrt{2} \times 4,049 \times 10^{-8}$ cm.

➤ Πυκνότητα

Κατά κύρια ομολογία, η ελαφρότητα του αλουμινίου είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του. Εάν εξαιρέσουμε το μαγνήσιο και το τιτάνιο, το αλουμίνιο έχει το ένα τρίτο του βάρους των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μετάλλων. Έχει ατομικό βάρος 26,98 και ειδικό βάρος $2,70 \text{ g/cm}^3$. Όπως συμβαίνει και στα περισσότερα μέταλλα, με την αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μείωση της πυκνότητας.

➤ Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, λ , είναι αντίστροφη της αντίστασης και είναι από τις πιο ευαίσθητες ιδιότητες του αλουμινίου. Επηρεάζεται από τη σύνθεσή του και από τη θερμική του επεξεργασία. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του καθαρού αλουμινίου (99,99%) στους 20°C είναι στο 63,8 % του IACS (International Annealed Copper Standard). Λόγω του μικρού ειδικού βάρους του, είναι διπλάσια ανά μονάδα βάρους από αυτή του χαλκού και μεγαλύτερη από κάθε άλλο μέταλλο.

➤ Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα, κ , του καθαρού αλουμινίου είναι 244 W/mK για θερμοκρασία μεταξύ $0-100^\circ\text{C}$ που είναι το 61,9 % του IACS. Όπως η ηλεκτρική, έτσι και η θερμική αγωγιμότητα λόγω του μικρού ειδικού βάρους είναι ανά μονάδα βάρους διπλάσια του χαλκού. Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης βάσει της σχέσης $\kappa = 5,0\lambda T \times 10^{-9} + 0,03$ όπου T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν. Η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με την προσθήκη στοιχείων στα κράματα.

➤ Αντοχή στη διάβρωση

Το αλουμίνιο διακρίνεται για την σημαντική αντοχή του στη διάβρωση, αν και δεν είναι πολύ ευγενές μέταλλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο και τα κράματά του αντιδρούν με το οξυγόνο και τους υδρατμούς του αέρα με αποτέλεσμα την

παραγωγή ενός λεπτού συμπαγούς φιλμ οξειδίου το οποίο προστατεύει το υποκείμενο μέταλλο από περαιτέρω προσβολή. Έτσι, το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματά του που δεν περιέχουν χαλκό μπορεί να αποδειχθούν πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση, αν η τιμή του pH οποιουδήποτε υγρού επαφής βρίσκεται μεταξύ 5 και 8 (με αυτό το εύρος καλύπτονται οι περισσότερες υπάρχουσες ατμοσφαιρικές /περιβαλλοντικές συνθήκες). Κάτω από pH 5 και πάνω από 8, η μεν όξινη αντίδραση οδηγεί σε $Al_3 +$ ιόντα, ενώ η αλκαλική σχηματίζει AlO_2 . Το υγρό περιβάλλον θεωρείται εξαιρετικά υποβοηθητικό για τη λειτουργία της χημείας της διάβρωσης.

➤ Μη μαγνητικότητα

Το αλουμίνιο έχει μαγνητική διαπερατότητα, m , ελαφρώς μεγαλύτερη από τη μονάδα. Έχει πάρα πολύ μικρή μαγνητική ευαισθησία πράγμα που σημαίνει στις πρακτικές εφαρμογές ότι δεν έχει μαγνητισμό.

1.3 Κράματα αλουμινίου

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το αλουμίνιο λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του βρίσκεται στην δεύτερη θέση (μετά τους χάλυβες) όσον αφορά την παραγωγή και χρήση βιομηχανικών κραμάτων.

1.3.1 Ιδιότητες κραμάτων αλουμινίου

Με βάση εκτίμησης τον λόγο αντοχής/βάρους τα κράματα αλουμινίου υπερτερούν κατά πολύ των χαλύβων, αντίθετα υστερούν ελαφρώς από την άποψη της αντοχής του ερπυσμού, της φθοράς της κόπωσης αλλά και του κόστους. Επίσης το αλουμίνιο και τα κράματά του κρατούν την ολκιμότητα τους και δεν γίνονται ψαθυρά ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που δεν συμβαίνει με τον χάλυβα και το τιτάνιο. Όπως συμβαίνει και με τα περισσότερα μέταλλα, το αλουμίνιο ενισχύεται με ψυχρηλασία καθώς επίσης και με κραμάτωση με διάφορα στοιχεία. Με την χρήση προσθηκών παράγεται ένας μεγάλος αριθμός υλικών τα οποία ανάλογα με την συγκεκριμένη

σύσταση τους υφίστανται κατεργασίες κοπής διαμόρφωσης ή συγκόλλησης σχετικά εύκολα.[7]

1.3.2 Κύρια κραματικά στοιχεία

Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία στα κράματα αλουμινίου είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος, ενώ άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ ειδικούς σκοπούς.[8] Στον παρακάτω πίνακα αναφέρεται η μέγιστη διαλυτότητα των κραματικών στοιχείων καθώς και η θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται.

Πίνακας 1.1 Μέγιστη διαλυτότητα των κύριων κραματικών στοιχείων στο αλουμίνιο

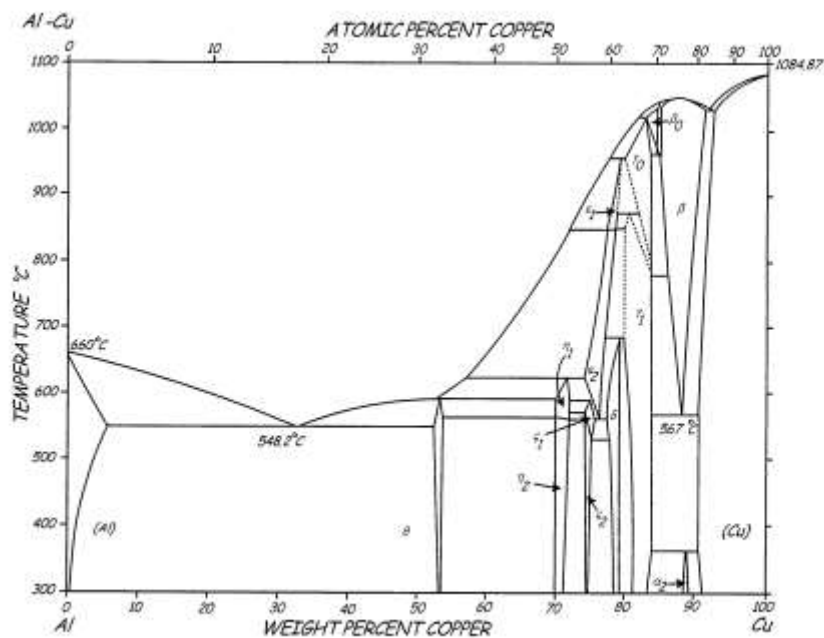
Προσθήκη	% κ/β	Θερμοκρασία °C
Χαλκός (Cu)	5,6	548
Μαγνήσιο (Mg)	14,9	450
Μαγγάνιο (Mn)	1,8	671
Πυρίτιο (Si)	1,6	577
Ψευδάργυρος (Zn)	82,8	382
Πυριτιούχο Μαγνήσιο (Mg ₂ Si)	1,8	595

Οι παραπάνω τιμές δίνονται για διμερή συστήματα, ενώ η παρουσία άλλων στοιχείων στο κράμα επηρεάζει κατά πολύ την διαλυτότητα. Με το πυρίτιο γίνονται προσθήκες μεγαλύτερες απο την μέγιστη διαλυτότητα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παρουσία ετερογενών σωματιδίων στο στερεό διάλυμα. Από όλα τα κύρια

κραματικά στοιχεία μόνο ο ψευδάργυρος έχει σημαντική διαλυτότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και μάλιστα λίγες μονάδες. Έτσι κάτω από συνθήκες ισορροπίας οι περισσότερες κραματικές προσθήκες βρίσκονται διεσπαρμένες στη μήτρα του αλουμινίου και το ενισχύουν με διασπορά. Πάντως δεν επιδέχονται όλα τα κράματα θερμική κατεργασία και απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση με ψυχρηλασία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιδράσεις των παραπάνω κραματικών στοιχείων καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα ισορροπίας τους

➤ Χαλκός (Cu)

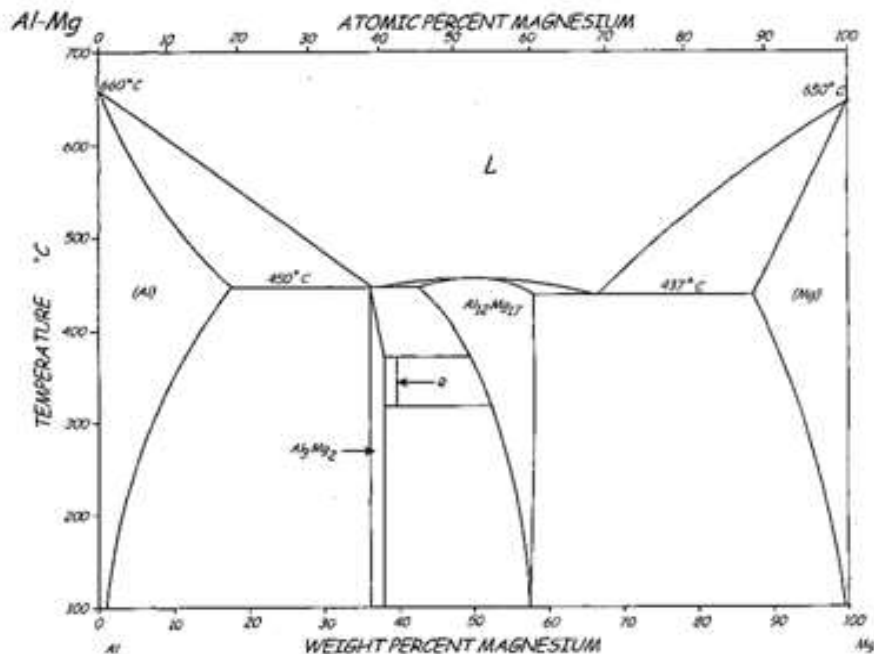
Ο χαλκός είναι ένα από τα πιο σπουδαία στοιχεία για το αλουμίνιο. Έχει σημαντική διαλυτότητα και ενισχύει σημαντικά το αλουμίνιο με θερμική κατεργασία κατακρήμνισης και γήρανσης. Πολλά κράματα περιέχουν χαλκό είτε σαν κύριο κραματικό στοιχείο, ή μεταξύ των κυρίων κραματικών στοιχείων σε περιεκτικότητες από 1 έως 10%.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Χαλκού

➤ Μαγνήσιο (Mg)

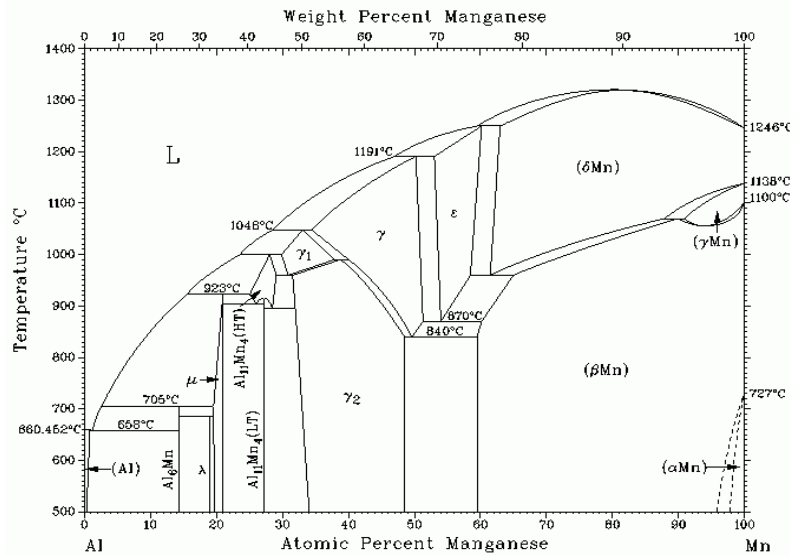
Το μαγνήσιο παρέχει σημαντική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών της ψυχρηλασίας. Έχει σχετικά μεγάλη διαλυτότητα στο στερεό αλουμίνιο αλλά τα κράματα Al- Mg που περιέχουν Mg λιγότερο από 7% δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Το Mg προστίθεται επίσης σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία κυρίως χαλκό και ψευδάργυρο, για ακόμη καλύτερη ενίσχυση της αντοχής.



Σχήμα 1.4 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγνησίου

➤ Μαγγάνιο (Mn)

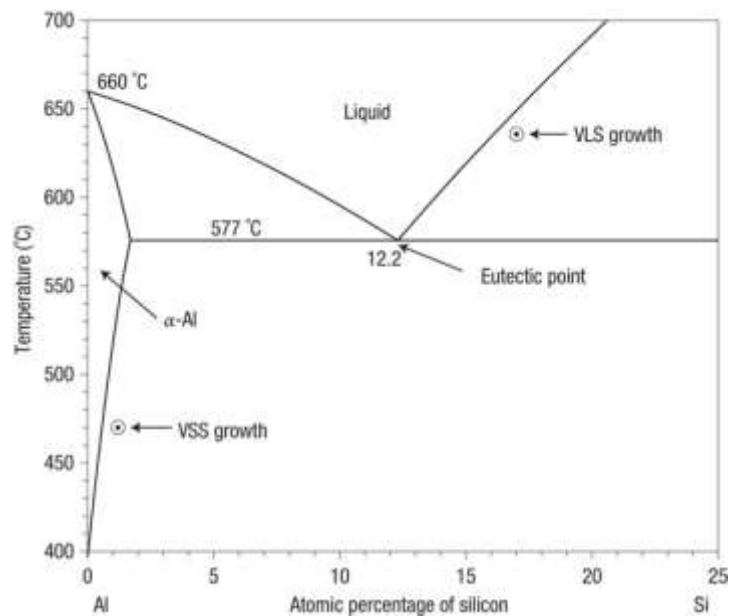
Το μαγγάνιο έχει περιορισμένη διαλυτότητα στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου αλλά σε περιεκτικότητες περίπου 1% σχηματίζει μια σειρά από κατεργάσιμα κράματα που δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Προστίθεται ευρέως σαν συμπληρωματικό στοιχείο σε κράματα (επιδεκτικά ή μη επιδεκτικά θερμικής κατεργασίας) και προσδίδει σημαντική ενίσχυση.



Σχήμα 1.5 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Μαγγανίου

➤ Πυρίτιο (Si)

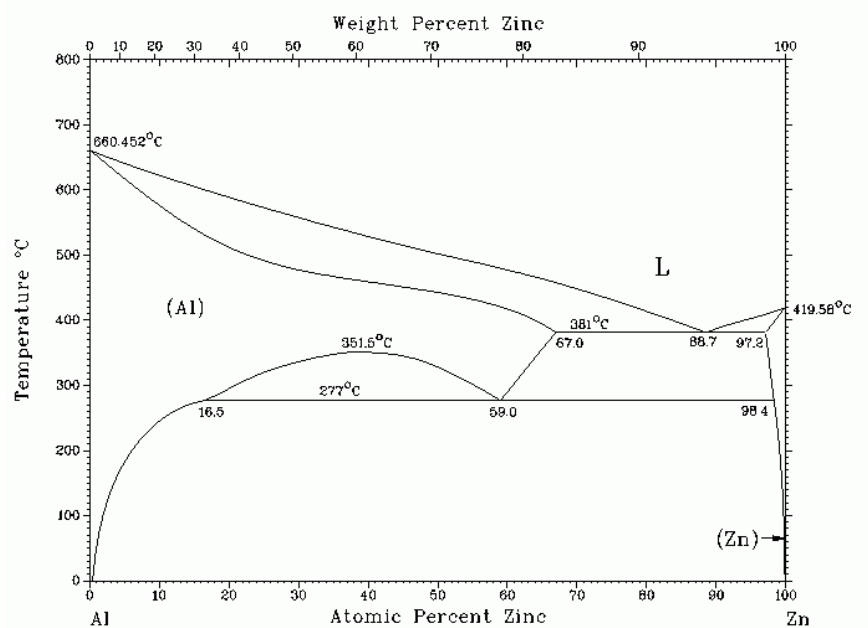
Τα περισσότερα κράματα χύτευσης έχουν σαν κυρίαρχο κραματικό στοιχείο το πυρίτιο. Η προσθήκη πυριτίου βελτιώνει την χυτευσιμότητα και αυξάνει την αντοχή σε διάβρωση. Επίσης μειώνει το σημείο τήξης και αυξάνει σε μέτριο βαθμό την αντοχή του.



Σχήμα 1.6 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Πυρίτιο

➤ Ψευδάργυρος (Zn)

Ο ψευδάργυρος εισάγεται στα χυτευτικά κράματα και σε συνδυασμό με το μαγνήσιο στα κράματα διαμόρφωσης. Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης παράγει κράματα που έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή μεταξύ των κραμάτων του αλουμινίου.



Σχήμα 1.7 Διάγραμμα Ισορροπίας Αλουμινίου-Ψευδάργυρος

Πέρα από τα παραπάνω βασικά στοιχεία, στα κράματα συνηθίζεται να προστίθενται και άλλα στοιχεία σε μικρές ποσότητες. Μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω, καθώς επίσης και οι επιδράσεις τους στο κράμα.

➤ Σίδηρος (Fe)

Βελτιώνει την αντοχή και την σκληρότητα ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά την χύτευση. Η κατεργασιμότητα, η ολκιμότητα και η αντοχή σε κρούση μειώνονται όταν η περιεκτικότητα του σιδήρου στο κράμα είναι υψηλή.



➤ Λίθιο (Li)

Στα διαμορφωμένα κράματα και σε πολύ μικρές ποσότητες έως και 3% βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αντιθέτως, στα κράματα χύτευσης οι συνέπειες του είναι βλαβερές οπότε συνιστάται η περιεκτικότητα του να μην υπερβαίνει το 0,003%

➤ Ζιρκόνιο (Zr)

Επηρεάζει την σκληρότητα και λειτουργεί ως σταθεροποιητής

➤ Χρώμιο (Cr)

Αυξάνει τις αντιστάσεις στη διάβρωση

➤ Νικέλιο (Ni)

Αυξάνει την αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες

➤ Τιτάνιο (Ti)

Προσδίδει στο κράμα μειωμένο μέγεθος

1.3.3 Συμβολισμός και ταξινόμηση κραμάτων αλουμινίου

Πίνακας 1.2 Ταξινόμηση κραμάτων αλουμινίου

Κράματα Διαμόρφωσης (Wrought alloys)		Κράματα Χύτευσης (Casting alloys)	
Κύριο κραματικό στοιχείο	Ονομασία	Κύριο κραματικό στοιχείο	Ονομασία
Αλουμίνιο	1XXX	Αλουμίνιο	1XX.X
Χαλκός	2XXX	Χαλκός	2XX.X
Μαγγάνιο	3XXX	Πυρίτιο με χαλκό και/ή μαγνήσιο	3XX.X
Πυρίτιο	4XXX	Πυρίτιο	4XX.X
Μαγνήσιο	5XXX	Μαγνήσιο	5XX.X
Μαγνήσιο και Πυρίτιο	6XXX	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά	6XX.X
Ψευδάργυρος	7XXX	Ψευδάργυρος	7XX.X
Άλλα στοιχεία	8XXX	Κασσίτερος	8XX.X
Μη χρησιμοποιούμενη σειρά	9XXX	Άλλα στοιχεία	9XX.X

Τα κράματα αλουμινίου διατίθενται ως κράματα διαμόρφωσης (*Wrought alloys*) και ως κράματα χύτευσης (*Casting 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 των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί. Στον παραπάνω πίνακα έχουν παρατεθεί οι ονομασίες των κραμάτων του αλουμινίου.

1.3.3.1 Κράματα διαμόρφωσης

Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminium Association περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία. Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά στοιχεία. Το δεύτερο ψηφίο δείχνει το όριο

των ακαθαρσιών που μπορεί να περιέχονται στο κράμα και τις τροποποιήσεις (0 για το πρωταρχικό κράμα, 1 έως 9 οι τροποποιήσεις). Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο τις διαφορετικές μορφές του κάθε κράματος.

➤ 1xxx Καθαρό Al (Al >99,00%)

Η σειρά αυτή αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al). Οι μηχανικές ιδιότητες του καθαρού αλουμινίου είναι φτωχές αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Διακρίνεται για την αντοχή του σε υγρό και θαλάσσιο περιβάλλον και είναι κατάλληλο για επεξεργασία “εν ψυχρώ”. Μερικοί τύποι, σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η σειρά αυτή βρίσκει εφαρμογή σε καλώδια και σύρματα λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθώς και σε καλοριφέρ λόγω της θερμικής αγωγιμότητας. Επιπλέον λόγω της αντοχής στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, της εξαιρετικά υψηλής αντίστασης στην διάβρωση και στην καλή ολκιμότητα, το βρίσκουμε σε εφαρμογές όπως φύλλα συσκευασίας, χημικούς εξοπλισμούς, συσκευασίες φαρμάκων, σασί αυτοκινήτων κλπ.[1]



Εικόνα 1.6 (α) Φύλλα συσκευασίας



Εικόνα 1.6 (β) Συσκευασίες φαρμάκων

➤ 2xxx Κράματα Al-Cu

Η σειρά αυτή υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις

καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται η επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς αυτής κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ 2219, 2048) συγκολλούνται και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται. Άλλα κράματα όπως το 2165 έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μεγάλων δεξαμενών καυσίμου για χρήση στην αεροναυπηγική. Τα πλούσια σε αλουμίνιο κράματα της συγκεκριμένης σειράς ονομάζονται και ντουραλουμίνια και περιέχουν χαλκό σε περιεκτικότητα $2.6 \div 6.3 \%$ ή και μαγνήσιο σε περιεκτικότητα $0.5 \div 1.5\%$. Το ντουραλουμίνιο 2017 είναι το παλαιότερο κράμα που χρησιμοποιήθηκε και το οποίο σκληρύνεται με γήρανση ενώ το 2024 είναι το πιο διαδεδομένο στην αεροναυπηγική βιομηχανία. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της σειράς κραμάτων είναι η χαμηλή συγκολλησιμότητα στις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.[1] Η εσωτερική κατασκευή των αεροσκαφών περιλαμβάνει διατομές και φύλλα της σειράς αυτής αλλά και της 7xxx που θα δούμε παρακάτω (2024, 2124 και 2618). Το εξωτερικό φύλλο μπορεί να είναι Alclad 2024 ή 2618. Επένδυση με υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο (Alclad) προσδίδει προστασία στη διάβρωση.



Εικόνα 1.7 (α) Δεξαμενή καυσίμου για αεροναυπηγική χρήση



Εικόνα 1.7 (β) Εσωτερική επένδυση αεροσκάφους

➤ 3xxx Κράματα Al-Mn

Η σειρά αυτή υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές κατασκευές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα βασικά υλικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Εφαρμογές της σειράς αυτής βρίσκουμε σε μορφή λαμαρίνας και σε μορφή σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς. Το περισσότερο παραγόμενο κράμα στη βιομηχανία είναι των σειρών 3004 ή 3104, από το οποίο κατασκευάζεται το σώμα από τις συσκευασίες των αναψυκτικών.



Εικόνα 1.8 (α) Επικαλύψεις κτιρίων



Εικόνα 1.8 (β) Συσκευασίες αναψυκτικών

➤ 4xxx Κράματα Al-Si

Τα κράματα αυτής της σειράς είναι θερμικά κατεργάσιμα, έχουν κάλα χαρακτηριστικά ροής όμως έχουν μέτρια αντοχή. Χρησιμοποιούνται για χυτές διατομές και συγκολλημένο καλώδιο πλήρωσης. Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς αυτής, το 4032, είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αυτοκινήτων αλλά και αεροσκαφών.[11] Από την άλλη πλευρά, το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα. Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς αυτής. Η καλή ολκιμότητα

που οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε Si, εξασφαλίζει στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών, στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται.



Εικόνα 1.9 (α) Πιστόνια αυτοκινήτων

Εικόνα 1.9 (β) Εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία

➤ 5xxx Κράματα Al-Mg

Όλα τα κράματα της σειράς αυτής υφίστανται σκλήρυνση με ψυχρηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, όπως επίσης και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0° K. Επίσης, παρουσιάζουν πολύ καλή ποιότητα στην επιφάνεια τους μετά από λείανση και ανοδίωση. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω η σειρά αυτή βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κατασκευές κτιρίων, κατασκευές γεφυρών, δοχεία αποθήκευσης, εφαρμογές συστημάτων για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και παραθαλάσσιες εφαρμογές όπως εξέδρες άντλησης πετρελαίου. Οι απαιτήσεις σε διάβρωση λόγω της υψηλής υγρασίας και έκθεσης στο νερό καλύπτονται από συγκολλητές κατασκευές με κράματα 5454, 5086 και 5083. Απο τα περισσότερο παραγόμενα κράματα της σειράς αυτής είναι το 5182 που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυθμένα των συσκευασιών των αναψυκτικών. Επίσης στη βιομηχανία αυτοκινήτου η ποσότητα του 5754-Ο κράματος σε μορφή φύλλων αυξάνει συνεχώς.



Εικόνα 1.10 (α) Εξέδρα άντλησης πετρελαίου



Εικόνα 1.10 (β) Επένδυση αυτοκινήτου

➤ 6xxx Κράματα Al-Mg-Si

Τα κράματα της σειράς αυτής έχουν εξαιρετική αντίσταση στην ατμοσφαιρική διάβρωση και στην διάβρωση κάτω από μηχανική φόρτιση. Επίσης έχουν πολύ καλή διαμορφωσιμότητα εν θερμώ και πολύ καλή συγκολλησιμότητα.[1] Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει μία από τις πρώτες επιλογές για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή. Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Forth της Νορβηγίας και χρησιμοποιείται και στις κατασκευές οροφών σταδίων, γυμναστηρίων ακόμα και στην κατασκευή γιγαντιαίων θόλων. Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά, βαγόνια τρένου και σωληνώσεις. Μεταξύ των ειδικών κραμάτων της σειράς είναι το 6066-T6 με υψηλή αντοχή για σφυρήλατα, το 6111 για panel πλαίσιων αυτοκινήτου και τα 6101 και 6201 για υψηλής αντοχής ηλεκτρικούς αγωγούς.[10]



Εικόνα 1.11 (α) Γέφυρα Forsmo της Νορβηγίας



Εικόνα 1.11 (β) Γιγαντιαίος θόλος

➤ 7xxx Κράματα Al-Zn

Τα κράματα της σειράς αυτής υφίστανται θερμική κατεργασία. Οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που διακρίνονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, όπως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας. Η μεγαλύτερη εφαρμογή της συγκεκριμένης σειράς ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλησίμα με τις κοινές μεθόδους. Δεν διακρίνονται για αντοχή τους στην ατμοσφαιρική διάβρωση επομένως, όπως είδαμε και σε προηγούμενες σειρές, επενδύονται ή αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα. Συνήθεις εφαρμογές της σειράς βρίσκουμε σε κατασκευές προφυλακτήρων (7129,7029) που διακρίνονται για την ελαφρότητα τους με αποτέλεσμα την χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, όπως και κατασκευές αεροσκαφών από φύλλα ή διατομές (7050, 7075, 7475). Επίσης την σειρά 7075 την συναντάμε από πυρηνικές εφαρμογές μέχρι και στην κατασκευή πριτσινιών αλλά και ρακετών.[13]



Εικόνα 1.12 Περίβλημα αεροσκάφους από κράματα σειράς 7xxx και 2xxx



Εικόνα 1.13 (α) Προφυλακτήρες αυτοκινήτων



Εικόνα 1.13 (β) Πριτσίνια αλουμινίου

➤ 8xxx Κράματα Al με άλλα στοιχεία

Η σειρά αυτή έχει μεγάλη αντοχή, αγωγιμότητα και σκληρότητα. Επίσης υφίσταται θερμική κατεργασία. Στην σειρά αυτή βρίσκουμε προσθήκες κραματικών στοιχείων όπως ο σίδηρος το λίθιο, το νικέλιο το σεληνίο κ.α. Το λίθιο στο 8090 προσφέρει υψηλό μέτρο ελαστικότητας και εξαιρετικά υψηλή αντοχή, έτσι χρησιμοποιείται σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Ο σίδηρος και το νικέλιο παρέχουν υψηλή αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Με την προσθήκη σεληνίου τα κράματα βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή αυτοκινήτων και φορτηγών (8081, 8280) ενώ μια ομάδα κραμάτων που περιέχουν 5% ασβέστιο και 5% ψευδάργυρο έχουν υπερελαστικές ιδιότητες.[12]



Εικόνα 1.14 (α) Εφαρμογή στην αεροδιαστημική



Εικόνα 1.14 (β) Κατασκευή Boeing από κράμα αλουμινίου-λίθιου

1.3.3.2 Κράματα χύτευσης

Η χρήση του αλουμινίου, παρά την χαμηλή θερμοκρασία τήξεως, ως κράμα χύτευσης είναι λιγότερο διαδεδομένη λόγω της τάσης για ρωγμάτωση (hot cracking) και λόγω της τάσης του να παραμορφώνεται κατά την στερεοποίηση (shrinkage). Παρ'όλα αυτά επιτυγχάνεται η δημιουργία κραμάτων χύτευσης αλουμινίου με αποδεκτές ιδιότητες με την χρήση προσθηκών. Το σύστημα σχεδιασμού και ονοματολογίας των κραμάτων χύτευσης αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminium Association περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία. Το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια κραματικά

στοιχεία. Το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δείχνουν τις διάφορες μορφές του κράματος ενώ το τέταρτο ψηφίο, αυτό που βρίσκεται μετά την υποδιαστολή, δηλώνει την μορφή του χυτού. Εάν δηλαδή είναι χυτό (casting) που συμβολίζεται με το 0 ή χελώνα (ingot) που συμβολίζεται με το 1 και το 2 (π.χ. 357.0). Οι μέθοδοι χύτευσης που εφαρμόζονται και οι αντίστοιχοι συμβολισμοί τους αναφέρονται παρακάτω:

- **S** : Χύτευση σε άμμο (sand casting)
- **P** : Χύτευση σε μεταλλικό τύπο (permanent mold casting)
- **D** : Χύτευση υπο πίεση (die casting)

Η χύτευση σε άμμο χρησιμοποιείται για παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων χυτών αντικειμένων με πολύπλοκη μορφή. Με τη χύτευση σε μεταλλικό τύπο δημιουργούνται ανθεκτικότερα κράματα με μικρότερο πορώδες, σε σύγκριση με τη χύτευση σε άμμο, τα οποία είναι μονοκρυσταλλικά. Με την μέθοδο χύτευσης υπο πίεση επιτυγχάνονται μεγάλες ταχύτητες χύτευσης, μικροκρυσταλλικές δομές, λείες επιφάνειες, μικρότερες ανοχές και δυνατότητα αυτοματοποίησης της διεργασίας.[1]



Εικόνα 1.15 (α) Χύτευση σε άμμο



Εικόνα 1.15 (β) Χύτευση σε μεταλλικό τύπο

Παρακάτω αναφέρονται εκτενώς οι σειρές των κραμάτων χύτευσης με τα χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους.

➤ 2xx.x Al-Cu

Τα κράματα της σειράς αυτής υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε κοχύλι (μεταλλικό καλούπι) και στο χώμα. Έχουν υψηλές αντοχές και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης μερικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε κάμψη. Εκτός από τα κανονικά κράματα χύτευσης, υπάρχουν ειδικά κράματα για ιδιαίτερα εξαρτήματα όπως κεφαλές μηχανής, σώματα μηχανής ή κουζινέτα. Για τέτοιες εφαρμογές το επιλεγμένο κράμα απαιτεί καλή αντοχή στη φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής, όπως επίσης κατάλληλη αντοχή σε συνθήκες λειτουργίας υψηλών θερμοκρασιών. Ένα καλό παράδειγμα είναι το κράμα 203.0/AlCu5NiCo που σήμερα είναι το κράμα χύτευσης με την μεγαλύτερη αντοχή στους 200 °C. Εφαρμογές των κραμάτων της σειράς αυτής βρίσκουμε στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής όπως κεφαλές κυλίνδρων, πιστόνια και μέρη απο συστήματα εξατμίσεων.



Εικόνα 1.16 (α) Κεφαλές κυλίνδρων



Εικόνα 1.16 (β) Μέρη εξατμίσεων

➤ 3xx.x Al-Si+Cu ή Mg

Τα κράματα αυτής της σειράς υφίστανται θερμική κατεργασία και χυτεύονται σε μεταλλικό καλούπι, στο χώμα σε χυτόπρεσσα αλλά και με πολλές ακόμα τεχνικές όπως

είναι η χύτευση squeeze και η μέθοδος του χαμένου κεριού. Το πυρίτιο βρίσκεται μέσα στο κράμα σε πολύ μεγάλο ποσοστό, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα το κράμα να είναι αρκετά ελαστικό. Το γεγονός αυτό, κάνει την σειρά αυτή μία από τις πιο διαδεδομένες. Πέρα από την πολύ καλή χυτευσιμότητα του, διακρίνεται επίσης για την υψηλή του αντοχή. Οι παραπάνω ιδιότητες το χρήζουν κατάλληλο για εφαρμογές στην αεροναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία με την κατασκευή εξαρτημάτων, ζαντών, πιστονίων, ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων, πλαισίων συμπιεστών μέχρι και την κατασκευή αντλιών.



Εικόνα 1.17 (α) Ζάντα αυτοκινήτου



Εικόνα 1.17 (β) Εξάρτημα αντλίας νερού

➤ 4xx.x Al-Si

Η σειρά αυτή περιλαμβάνει κράματα τα οποία δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται στο χώμα και σε μεταλλικό καλούπι, έχουν τις ιδανικότερες χυτευτικές ιδιότητες και καλή αντοχή στην φθορά. Ένα από τα πιο διαδεδομένα κράματα της σειράς είναι το B413.0/AlSi12 το οποίο είναι γνωστό για την καλή χυτευσιμότητα του και την καλή συγκολλησιμότητα, ιδιότητες που οφείλονται στην ευτηκτική του σύνθεση και το χαμηλό σημείο τήξης (570°C). Συνδυάζει μέτρια αντοχή με μεγάλη επιμήκυνση και καλή αντοχή σε διάβρωση. Το κράμα είναι καλό για πολύπλοκες λεπτές διατομές με καλή αντοχή σε κόπωση. Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων η σειρά αυτή χρησιμοποιείται για κατασκευές όπως κελύφη αντλιών, μαγειρικά σκεύη

οδοντιατρικούς εξοπλισμούς αλλά και σε παραθαλάσσιες εφαρμογές.

➤ 5xx.x Al-Mg

Τα κράματα της σειράς αυτής δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία. Χυτεύονται και αυτά σε μεταλλικό καλούπι και στο χώμα. Διακρίνονται τόσο για την εξαιρετική αντοχή τους στη διάβρωση όσο και για την μηχανική τους αντοχή. Υπάρχουν κράματα της σειράς αυτής (512.0, 514.0) τα οποία έχουν πολύ καλή επιμηκυνσιμότητα, και σε συνδυασμό με τα παραπάνω τα βρίσκουμε σε παραθαλάσσιες εφαρμογές. Επίσης τέτοια κράματα τα συναντάμε και στην κατασκευή κουφωμάτων για πόρτες και παράθυρα διότι υπάρχει η δυνατότητα καλαίσθητου μεταλλικού φινιρίσματος με ανοδίωση. Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων αυτή η σειρά βρίσκει εφαρμογές από τη ναυπηγία και αεροναυπηγία μέχρι και την κατασκευή μαγειρικών σκευών.



Εικόνα 1.18 (α) Κούφωμα αλουμινίου



Εικόνα 1.18 (β) Μέρη για αεροναυπηγική χρήση

➤ 7xx.x Al-Zn

Τα κράματα αυτά έχουν πάρα πολύ μικρή χυτευσιμότητα. Επιδέχονται θερμική κατεργασία, χύτευση σε άμμο και σε μεταλλικό τύπο. Όσα κράματα της σειράς αυτής περιέχουν χαλκό παρουσιάζουν και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της μεγάλης δυσκολίας στην χύτευση τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται μόνο όταν είναι αναγκαίες οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες και το εξαιρετικό φινίρισμα. Έτσι, η σειρά αυτή

χρησιμοποιείται για την κατασκευή επίπλων εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, εργαλείων γεωργικών και εξοπλισμό εξορύξεων.

➤ 8xx.x Al-Sn με άλλα στοιχεία

Τα κράματα της σειράς αυτής δέχονται θερμική κατεργασία, χύτευση σε άμμο, χύτευση σε μεταλλικό τύπο και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην φθορά. Όμως, όπως και τα κράματα της σειράς 7xx.x παρουσιάζουν πολύ μεγάλη δυσκολία στην χύτευση. Επομένως χρησιμοποιούνται μόνον όπου είναι σημαντικές και απαραίτητες οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Εφαρμογές των κραμάτων αυτής της σειράς βρίσκουμε κατα κύριο λόγο στην κατασκευή ρουλεμάν αλλά και σε μηχανές εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 1.19 (α) Ρουλεμάν



Εικόνα 1.19 (β) Μηχανή εσωτερικής καύσης

1.4 Βασικές κατεργασίες αλουμινίου

Οι κωδικοί που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κατεργασία είτε αυτή είναι θερμική, είτε μηχανική, σύμφωνα με την Aluminum Association είναι ίδιοι για τα κράματα διαμόρφωσης και χύτευσης (με εξαίρεση τα πλινθώματα). Οι κωδικοί συμβολίζονται με κεφαλαία γράμματα που χωρίζονται από τον κωδικό του κράματος με μία παύλα και είναι οι εξής:



F: Όπως παρήχθη (fabricated), δηλαδή ακατέργαστο.

H: Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία (strain hardened), που αφορά μόνο κράματα διαμόρφωσης. Συνοδεύεται από δύο ή περισσότερα ψηφία.

H1x: Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία. Ο βαθμός σκλήρυνσης δίνεται από το x (1 έως 8) και μεταβάλλεται από 1/4 σκληρό (H12) μέχρι σε πλήρη σκλήρυνση (H18), που παράγεται με 75% ελάττωση της επιφάνειας.

H2x: Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία και μερικώς ανοπτημένο. Υλικά που κυμαίνονται από το 1/4 σκληρό μέχρι το πλήρως σκληρό και που παράγονται με μερική ανόπτηση ψυχρά κατεργασμένου υλικού, το οποίο έχει αρχική αντοχή μεγαλύτερη από τη ζητούμενη. Οι κατεργασίες χαρακτηρίζονται σαν H22, H26 και H28.

H3x: Σκληρυμένο με ψυχρή κατεργασία και σταθεροποιημένο. Κατεργασίες για κράματα που μαλακώνουν με γήρανση, τα οποία σκληραίνουν με ψυχρή κατεργασία και ακολούθως θερμαίνονται σε χαμηλή θερμοκρασία για να αυξηθεί η ολκιμότητα και να σταθεροποιηθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Παραδείγματα ονομασιών είναι H32, H34, H36 και H38.

O: Ανοπτημένο (annealed) και ανακρυσταλλωμένο υλικό με τη χαμηλότερη αντοχή και υψηλότερη ολκιμότητα.

T: Θερμικά κατεργασμένο (thermally treated) για τη δημιουργία υλικού με σταθερές ιδιότητες διαφορετικές από την F και O. Συνοδεύεται πάντα από ένα ψηφίο από το 1 έως 10 το οποίο δηλώνει την διαδικασία που ακολουθήθηκε.

T1: Το προϊόν ψύχεται από την υψηλή θερμοκρασία διαμόρφωσης (βαφή) και αφήνεται για φυσική γήρανση σε μια ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T2: Το προϊόν ψύχεται από την υψηλή θερμοκρασία διαμόρφωσης, ύστερα πραγματοποιείται ψυχρή κατεργασία και αφήνεται για φυσική γήρανση σε μια ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T3: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, ψυχρή κατεργασία, φυσική

γήρανση σε μία ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T4: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, φυσική γήρανση σε ουσιαστικά σταθερή κατάσταση.

T5: Ψύξη από την υψηλή θερμοκρασία διαμόρφωσης (βαφή) και τεχνητή γήρανση.

T6: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση.

T7: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, υπεργήρανση ή σταθεροποίηση.

T8: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, βαφή, ψυχρή κατεργασία, τεχνητή γήρανση.

T9: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, τεχνητή γήρανση, ψυχρή κατεργασία

T10: Το προϊόν ψύχεται από την υψηλή θερμοκρασία της διαμόρφωσης (βαφή), ψυχρή κατεργασία, τεχνητή γήρανση

W: Θερμικά κατεργασμένο μόνο (solution-heat-treated only), που αναφέρεται στην ασταθή κατάσταση κραμάτων, των οποίων η αντοχή αυξάνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για μήνες ή και χρόνια μετά την κατεργασία.[1]

1.5 Εφαρμογές του αλουμινίου και των κραμάτων του

Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητάς του, το αλουμίνιο χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκευών μαγειρικής, ως περιτύλιγμα τροφίμων, αλλά και στην κατασκευή πιστονιών για κινητήρες εσωτερικής καύσης. Έχει το 63% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού, αλλά μόνο το μισό βάρος ενός ιδίου αγωγού. Κατά συνέπεια, ένας αγωγός αλουμινίου είναι πιο μεγάλος σε διάμετρο από έναν αντίστοιχο χαλκού, αλλά εξακολουθεί να είναι πιο ελαφρύς. Οι πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες του αλουμινίου το έκαναν μια προφανή επιλογή για τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα στη διανομή ενέργειας υπερυψηλής τάσης.



Εικόνα 1.20 Ηλεκτρικά καλώδια αλουμινίου

Η πρώτη γραμμή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από αλουμίνιο κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ στην Καλιφόρνια το 1898 και ήταν μια γραμμή 46 μιλίων. Πλέον, αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχης των 700.000V ή και περισσότερο. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (εξαιτίας του γεγονότος ότι απορροφά σχετικά λίγα νετρόνια) και σε κρυογονικές θερμοκρασίες, επειδή διατηρεί την αντοχή του και αυξάνει τη σκληρότητά του όσο μειώνεται η θερμοκρασία. Επίσης, επειδή είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, δεν μαγνητίζεται και δεν καίγεται, θεωρείται κατάλληλο για ειδικές εφαρμογές όπως κατασκευές θαλάσσης (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου).

1.6 Σύγχρονες εφαρμογές του αλουμινίου και των κραμάτων του

Ερευνητές από το Κέντρο Διαστημικών Πτήσεων Marshall της NASA (Marshall Space Flight Center) έχουν αναπτύξει ένα νέο, ισχυρότερο κράμα αλουμινίου ιδανικό για τα προϊόντα κραμάτων αλουμινίου χύτευσης που έχουν υποστεί ενίσχυση με μεταλλικά σωματίδια ή έχουν βαμμένες/θερμικά επεξεργασμένες επενδύσεις. Με προηγμένες μηχανικές ιδιότητες, το κράμα NASA-427 εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, αυξημένη ολκιμότητα και είναι εξαιρετικά ανθεκτικό. Επιπλέον, αυτό το

κράμα βελτιώνει τη θερμική διαδικασία επίστρωσης με μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη θερμική επεξεργασία. Με βελτιώσεις τόσο την δύναμη όσο και το χρόνο επεξεργασίας, η χρήση του κράματος παρέχει μειωμένο κόστος υλικών, μειωμένο κόστος παραγωγής, χαμηλότερο βάρος του προϊόντος και καλύτερη απόδοση του προϊόντος. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του κράματος είναι ότι επιτυγχάνει αντιδιαβρωτικές ιδιότητες ίσες ή και υψηλότερες από άλλα κράματα αλλά σε χαμηλότερα κόστη. Οι ανώτερες ιδιότητες του NASA-427 κράματος μπορούν να επωφελήσουν πολλές βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογή σε ζάντες αλουμινίου, δισκόπλακες, κέλυφος διαφορικού και ψαλίδια.[9]

Μία άλλη σπουδαία ανακάλυψη πραγματοποιήθηκε από μια ομάδα νεαρών ερευνητών στο Πανεπιστήμιο του Stanford όπου επινόησαν μια καινούργιου είδους μπαταρία, η οποία αποτελείται από αλουμίνιο και γραφίτη. Μάλιστα, είναι τεχνολογικά πιο μπροστά ακόμα και από τις υπάρχουσες μπαταρίες λιθίου. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μπαταρίας αλουμινίου είναι η γρήγορη φόρτιση, μόλις σε 1 λεπτό, χωρίς να φθείρεται η μπαταρία όπως γίνεται με τις συνηθισμένες λιθίου. Επιπλέον, οι μπαταρίες αλουμινίου ιόντων δεν ήταν δυνατό να παράγουν τα ίδια volt μετά από πολλές φορτίσεις. Σε αντίθεση όμως, αυτή η καινούργια μπαταρία που είναι κατασκευασμένη από ανόδους και καθόδους ιόντων αλουμινίου φτιαγμένα από γραφίτη δεν έχουν σχεδόν καμία φθορά μετά από ακόμα και χιλιάδες φορτίσεις. Τα πλεονεκτήματα δε σταματούν εδώ αφού η μπαταρία θα είναι ελαστική γεγονός που συνεπάγεται με χαμηλό κόστος παραγωγής από αυτό των κλασικών μπαταριών που έχουμε δει μέχρι τώρα αφού το αλουμίνιο είναι πιο οικονομικό υλικό από το λίθιο. Η μπαταρία αλουμινίου είναι πιο ασφαλής και δεν μπορεί να εκραγεί, ακόμα και κάτω από πίεση σε αντίθεση με τις υπάρχουσες.[33]

Κεφάλαιο 2

Γραφένιο (Graphene)

2.1 Ο άνθρακας και οι αλλοτροπικές μορφές του

Ο άνθρακας είναι μέσα στα τέσσερα αφθονότερα στοιχεία του πλανήτη. Συμβολίζεται με C (Carbon), είναι το πρώτο χημικό στοιχείο της 14ης ομάδας του περιοδικού πίνακα και έχει ατομικό αριθμό $Z=6$. Πρόκειται για ένα τετρασθενές στοιχείο που συνήθως δρά σχηματίζοντας ομοιοπολικούς χημικούς δεσμούς με άλλα άτομα. Υπάρχουν αρκετές αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα, των οποίων οι ιδιότητες διαφέρουν κατά πολύ.



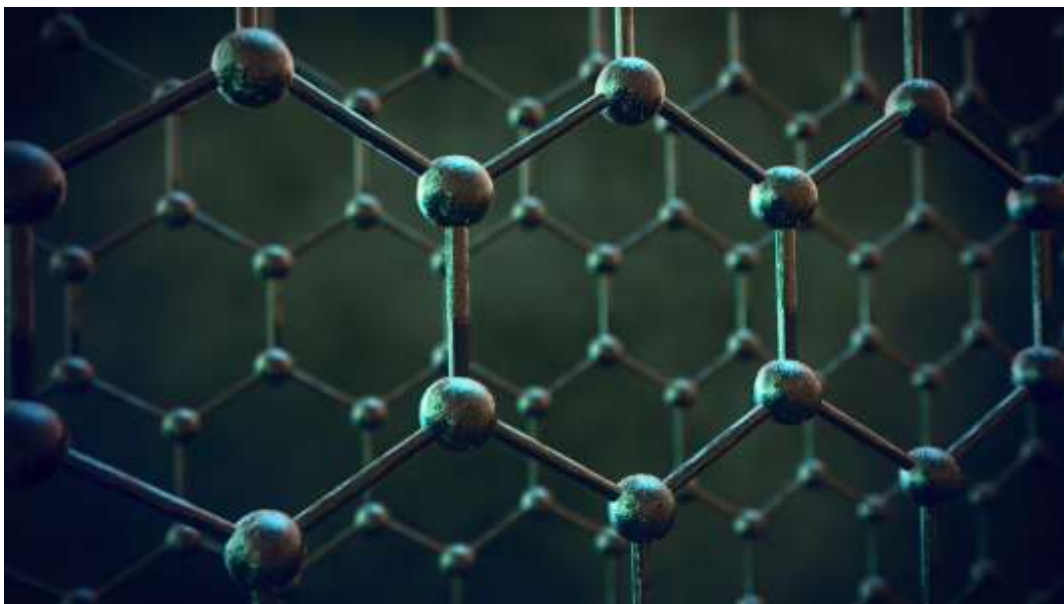
Εικόνα 2.1 Άνθρακας

Οι αλλότροπες μορφές του άνθρακα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Φυσικές μορφές άνθρακα: γραφίτης, διαμάντι και άμορφος άνθρακας
- Τεχνητές μορφές άνθρακα: φουλερένια, νανοσωλήνες άνθρακα, ίνες άνθρακα και το γραφένιο

Στην παρούσα εργασία όπως αναφέρθηκε παραπάνω δίνεται βάση στο γραφένιο, το οποίο θα το χρησιμοποιήσουμε σε μορφή νανοδομών (Graphene nanoplatelets) για την ενίσχυση κράματος αλουμινίου υψηλής καθαρότητας.

2.2 Ιδιότητες και εφαρμογές του γραφενίου



Εικόνα 2.2 Η μορφή του γραφενίου

Το γραφένιο αποτελεί μία τεχνητή μορφή άνθρακα. Ανακαλύφθηκε το 2004 από τους A.Geim και K.Novoselov μετά από μηχανική απολέπιση του γραφίτη με χρήση ταινίας (scotch tape), γεγονός που τους απέφερε το Νόμπελ Φυσικής το 2010. Το γραφένιο είναι βασικά ένα ενιαίο δισδιάστατο ατομικό στρώμα του γραφίτη και αποτελείται από πολύ στενά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα που οργανώνονται σε ένα

εξαγωνικό δικτυωτό πλέγμα. Αυτό που κάνει το γραφένιο τόσο μοναδικό είναι οι δεσμοί του και το πολύ λεπτό ατομικό πάχος του (0.345nm). Αυτές οι ιδιότητες είναι που επιτρέπουν στο γραφένιο να σπάει τόσα ρεκόρ από την άποψη της μηχανικής δύναμης του σαν υλικό, αλλά και της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητάς του. Αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υλικό σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας. Είναι ένα από τα ακριβότερα υλικά στον κόσμο. Παράγεται σήμερα από περισσότερες από 1000 επιχειρήσεις παγκοσμίως. Το 2010 κατοχυρώθηκαν πάνω από 400 ευρεσιτεχνίες και δημοσιεύθηκαν περισσότερες από 3.000 ερευνητικές εργασίες. Η Ευρωπαϊκή Ένωση υποστηρίζει μία 10ετή συντονισμένη ερευνητική δράση για το γραφένιο με 1 τρις ευρώ, ενώ η Νότιος Κορέα έχει αφιερώσει περίπου 350 εκατομύρια δολάρια στην εμπορευματοποίηση του.

2.2.1 Ιδιότητες του γραφενίου

Μηχανικές ιδιότητες

Για να υπολογίσουν τη δύναμη του γραφενίου, οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν μια τεχνική αποκαλούμενη μικροσκοπία ατομικής δύναμης (Atomic Force Microscopy-AFM). Με άσκηση πίεσης σε φύλλα γραφενίου τοποθετημένα σε κοιλότητες διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2), κατέστη δυνατή η μέτρηση της σταθεράς ελαστικότητας (1-5N/m). Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι είναι σκληρότερο από το διαμάντι και περίπου 300 φορές σκληρότερο από το χάλυβα. Το μέτρο ελαστικότητας του Young υπολογίζεται στο 0,5 TPa επομένως το γραφένιο είναι επίσης πολύ ελαστικό. Έχει τη δυνατότητα επιμηκυνθεί μέχρι και 20% του αρχικού μήκους του. Απο τα πρώτα χρόνια εφαρμογών του γραφενίου, κατέστη σαφές το γεγονός ότι λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του, θα πρωταγωνιστήσει στην παραγωγή μιας νέας γενιάς ισχυρών σύνθετων υλικών.[17]

Οπτικές ιδιότητες

Το γραφένιο, αν και είναι το λεπτότερο υλικό που έχει υπάρξει, είναι ορατό στο γυμνό μάτι. Οι μοναδικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου παράγουν μια απροσδόκητα μεγάλη διαφάνεια για ένα ατομικό μονό στρώμα, με εκπληκτικά απλή

τιμή. Απορροφά δηλαδή $\alpha \approx 2,3\%$ του λευκού φωτός, όπου α είναι η σταθερά της τέλει δομής και π η γνωστή σταθερά. Αυτή είναι μία από τις σπάνιες περιπτώσεις όπου οι ιδιότητες ενός συστήματος συμπυκνωμένης ύλης είναι ανεξάρτητες των παραμέτρων του υλικού και μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει μονάχα θεμελιωδών σταθερών.

Χημικές ιδιότητες

Το γραφένιο είναι χημικά πιο αντιδραστικό από τις υπόλοιπες μορφές άνθρακα λόγω της πλευρικής διαθεσιμότητας των ατόμων άνθρακα. Τροποποιείται συνήθως με λειτουργικές ομάδες οξυγόνου και αζώτου και αναλύεται από την υπέρυθρη φασματοσκοπία και τη φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων. Η δισδιάστατη δομή του γραφενίου, μαζί με το ασυνήθιστο άμαζο φάσμα Dirac των ηλεκτρονικών διεγέρσεων χαμηλής ενέργειας, του προσδίδουν μια πολύ ιδιαίτερη χημική ευαισθησία. Αυτή η ευαισθησία για ένα μόνο μόριο, που αποδίδεται στο εξαιρετικά χαμηλό ηλεκτρονικό θόρυβο του γραφενίου και στην γραμμική ηλεκτρονική της πυκνότητας καταστάσεων (DOS), το καθιστά ένα πολλά υποσχόμενο ανιχνευτή, ιδιαίτερα ευαίσθητο σε εξωτερικά φορτία, μαγνητικό πεδίο ή μηχανική ένταση.[14]

Θερμικές ιδιότητες

Το γραφένιο διακρίνεται για την εξαιρετικά υψηλή θερμική του αγωγιμότητα. Αυτό οφείλεται στους ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων άνθρακα. Η θερμική αγωγιμότητα για το απομονωμένο γραφένιο φτάνει σε τιμές της τάξεως των $\sim 5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ σε θερμοκρασία δωματίου. Η αγωγιμότητα αυτή είναι 2,5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του διαμαντιού. Όσον αφορά το πεδίο εφαρμογών στη βιομηχανία, το πιθανότερο είναι εκεί να συναντήσουμε γραφένιο που στηρίζεται σε κάποιο υπόστρωμα, όπου εκεί η θερμική αγωγιμότητα (κοντά στη θερμοκρασία δωματίου) διαμορφώνεται περίπου στα $600 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, τιμή η οποία είναι περίπου διπλάσια από αυτή του χαλκού και 50 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του πυρίτιου. [14],[19]

Ηλεκτρονικές ιδιότητες

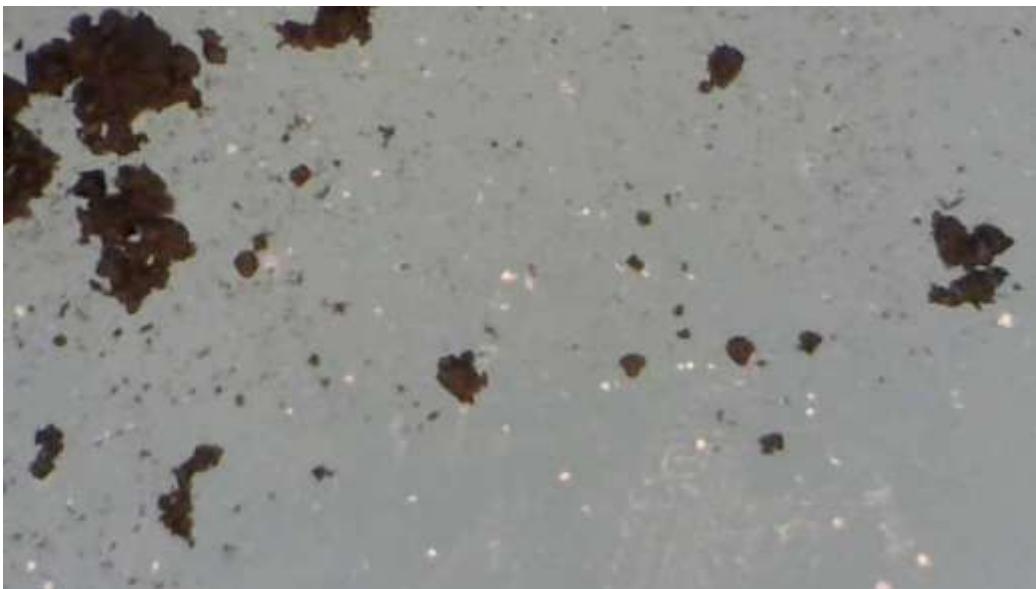
Τα συστατικά στοιχεία που συμμετέχουν στην παραγωγή των τόσο ασυνήθιστων αλλά εξαιρετικών ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του γραφενίου είναι: το κυψελωτό πλέγμα του, η διδιάστατη δομή του και το γεγονός ότι όλες οι πλευρές στο κρυσταλλικό πλέγμα καταλαμβάνονται από τα ίδια άτομα, γεγονός το οποίο του προσδίδει αναστροφή συμμετρίας. Τα κβαντικά άλματα των ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο υποπλεγμάτων οδηγούν σε σχηματισμό ενεργειακών ζωνών και η τομή τους στα άκρα της ζώνης Brillouin προάγει τη δημιουργία των κωνικών δομών στο ενεργειακό φάσμα. Σαν αποτέλεσμα τα quasi-σωματίδια του γραφενίου συμπεριφέρονται σαν να ήταν σχετικιστικά σωματίδια χωρίς μάζα (όπως τα φωτόνια), ενώ το ρόλο της ταχύτητας του φωτός διαδραματίζει σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα Fermi με $v^*F = c/300$. Πιο συγκεκριμένα, οι φορείς φορτίου στο εξαγωνικό πλέγμα μπορούν να ρυθμίζονται (tuned) συνεχώς μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών σε συγκεντρώσεις της τάξεως του $n=10^{13}\text{cm}^{-2}$ και να εμφανίζουν κινητικότητα της τάξεως των $\sim 15000\text{cm}^2/\text{Vs}$ σε συνθήκες περιβάλλοντος. Οι παρατηρούμενες τιμές κινητικότητας εξαρτώνται ασθενώς από την θερμοκρασία, κάτι που σημαίνει ότι η κινητικότητα σε θερμοκρασίες 300K περιορίζεται από σκεδάσεις λόγω των ατελειών και για αυτό μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά φθάνοντας και σε τιμές της τάξεως των $\approx 100000\text{cm}^2/\text{Vs}$. [15],[18]

2.2.2 Εφαρμογές του γραφενίου

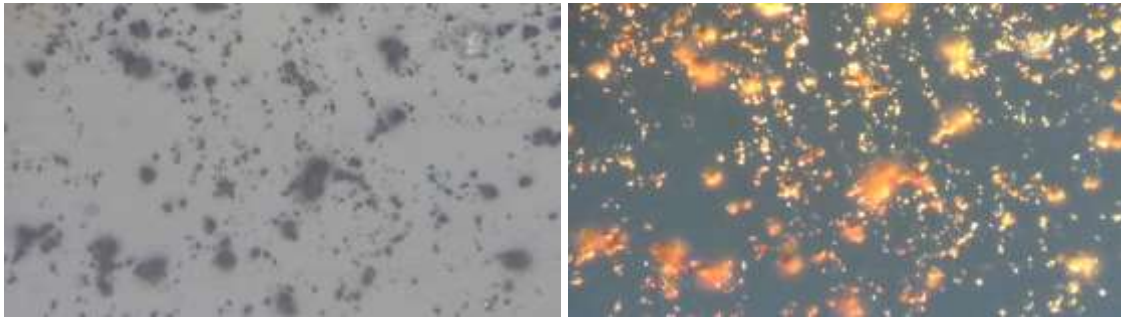
Ύστερα από το πρωτοποριακό πείραμα του Andre Geim και Kostya Novoselov [16], το γραφένιο έχει ξυπνήσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον στον τομέα της επιστήμης υλικών και της μηχανικής κοινότητας. Ένας τρόπος για την αξιοποίηση των εξαιρετικών μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρονικών ιδιοτήτων αυτών του γραφενίου είναι η ενσωμάτωσή του σε διάφορα υλικά όπως πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά. Η πιο άμεση εφαρμογή του γραφενίου είναι πιθανότατα η χρήση του στον τομέα των νανοςύνθετων υλικών. Παρατηρήθηκε ότι η σκόνη γραφενίου με κρυσταλλίτες μικρομετρικών διαστάσεων μπορεί να παραχθεί και να είναι κατάλληλη για μαζική παραγωγή. Αυτό επέτρεψε τη σύνθεση αγωγίμων πλαστικών, πράγμα το οποίο σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος καθιστά τα νανοςύνθετα υλικά με βάση το γραφένιο

ελκυστικά για ένα μεγάλο εύρος χρήσεων. Έτσι, το γραφένιο έχει πλέον διαδεδομένες εφαρμογές στον τομέα των ηλεκτρονικών και στην ενίσχυση πολυμερών. Ωστόσο, υπάρχουν μόνο λίγες αναφορές όσον αφορά την ενίσχυση μετάλλων. Στον τομέα των θερμικών υλικών διεπαφής (Thermal Interface Materials) το γραφένιο έχει χρησιμοποιηθεί ως εξαιρετικό πληρωτικό. Η ισχυρή σύζευξη του γραφενίου με τα μεταλλικά σωματίδια προκάλεσε αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα του προκύπτοντος σύνθετου έως και 2.300% [20-22]. Κατά την τελευταία δεκαετία, έχουν χρησιμοποιηθεί νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nano Tubes) εκτενώς για την ενίσχυση μετάλλων, όμως είναι μια μεγάλη πρόκληση για τους ερευνητές διότι απαγορεύει τη χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές.[23] Οι νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets) που έχουν διδιάστατη δομή, μπορούν και αυτές να διασπείρονται σε όλα τα είδη των διαλυτών και μητρών εύκολα όπως συμβαίνει και με τους νανοσωλήνες άνθρακα. Ως εκ τούτου υπάρχει βεβαιότητα για την αντικατάσταση των σύνθετων νανοσωλήνων άνθρακα με σύνθετα nanoplatelets γραφίνης στο μέλλον, με τη χρήση διαφόρων τεχνικών.[24]

2.3 Νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets)



Εικόνα 2.3 Μικροσκοπική απεικόνιση νανοδομών γραφενίου (φακός x5)



(α)

(β)

Εικόνες 2.4 Μικροσκοπική απεικόνιση νανοδομών γραφενίου (φακός x50), (α) Μικροσκοπική απεικόνιση νανοδομών γραφενίου με χρωματικό φίλτρο (φακός x50) (β)

2.3.1 Μέθοδοι παρασκευής νανοδομών γραφενίου

Η αποφολίδωση σε υγρή φάση (liquid phase exfoliation) του γραφενίου είναι μια ευέλικτη μέθοδος για την μαζική παραγωγή μονοστρωματικής γραφίνης. Μέχρι στιγμής η πιο συνηθισμένη μορφή της παραπάνω μεθόδου πραγματοποιείται με οξείδωση του γραφενίου και μετά με αποφολίδωση του οξειδίου του γραφενίου. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οξειδωμένο γραφένιο μαστίζεται με δομικά ελαττώματα. Αυτές οι ατέλειες, οι οποίες βρίσκονται συνήθως με τη χρήση φασματοσκοπίας Raman, επηρεάζουν αρνητικά και την κρυσταλλογραφική δομή του γραφενίου. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τις ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου οι οποίες είναι και οι πιο σημαντικές. Σημαντική βελτίωση σε αυτό το πρόβλημα σημειώθηκε με την προσθήκη διαφόρων διαλυτών κατά την διαδικασία αποφολίδωσης. Με βάση τη βιβλιογραφία, η παραγωγή των νανοδομών γραφενίου μέσω της παραπάνω διαδικασίας περιλαμβάνει τρεις γενικές μορφές του γραφίτη:

1. Φυσικές νιφάδες γραφίτη
2. Ενδοϋποστηλωμένο γραφίτη
3. Αποφολιδωμένο γραφίτη

2.3.2 Ιδιότητες των νανοδομών γραφενίου

Οι νανοδομές γραφενίου (GNPs) με μέσο πάχος 5-10 νανομέτρων, προσφέρονται σε διάφορα μεγέθη. Αυτά τα ενδιαφέροντα νανοσωματίδια αποτελούνται από μικρές στοίβες των platelets σε σχήμα φύλλων γραφενίου που είναι ταυτόσημα με εκείνα που βρέθηκαν στα τοιχώματα των νανοσωλήνων άνθρακα, αλλά σε μία επίπεδη μορφή. Λόγω της μοναδικού μεγέθους νανοκλίμακα τους, το σχήμα και την υλική σύνθεση τους, οι νανοδομές γραφενίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των ιδιοτήτων σε ευρύ φάσμα των πολυμερών υλικών, συμπεριλαμβανομένων των θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών, φυσικών ή συνθετικών καουτσούκ, θερμοπλαστικών ελαστομερών, αλλά και χρωμάτων και επικαλύψεων. Το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του και να αντικαταστήσει τα συμβατικά σε νανοκλίμακα πρόσθετα, επεκτείνοντας το φάσμα των ιδιοτήτων υλικών ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνδυασμό με άλλα πρόσθετα συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του κόστους και στην επέκταση των ιδιοτήτων τροποποίησης.

Με τις νανοδομές γραφενίου επιτυγχάνεται:

-  Αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και σταθερότητα
-  Αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας
-  Βελτίωση των ιδιοτήτων φραγμού
-  Μείωση της μάζας του σύνθετου υλικού με παράλληλα διατήρηση ή και βελτίωση των ιδιοτήτων
-  Αύξηση της αντοχής (αντοχή σε κρούση)
-  Βελτίωση στην εμφάνιση
-  Μείωση ευφλεκτικότητας

Όπως και οι υπόλοιπες τεχνολογίες που βασίζονται στον άνθρακα, τα φύλλα γραφενίου που σχηματίζουν οι νανοδομές γραφενίου είναι τόσο θερμικά, όσο και ηλεκτρικά αγωγικά. Σε αντίθεση με τους νανοσωλήνες και τις ίνες άνθρακα, η μορφολογία των platelets παρέχει χαμηλότερη θερμική αντίσταση επαφής σε χαμηλότερα επίπεδα φόρτωσης, με αποτέλεσμα υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα

έναντι άλλων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και την αύξηση των τιμών της απόλυτης θερμοκρασίας χρήσης στα πολυμερή υλικά. Επίσης, ο συνδυασμός τους με ένα φιλμ ή στερεό μέρος πολυμερούς έχει σαν αποτέλεσμα στην μείωση των συντελεστών διαπερατότητας και διάχυσης του υλικού της μήτρας. Το γεγονός ότι είναι σημαντικά μεγαλύτερα σε φάρδος από ότι σε πάχος, τα καθιστά πολύ αποτελεσματικά σε χαμηλά επίπεδα πλήρωσης (φόρτωσης) που συνεπάγεται με σημαντική μείωση του κόστους. Εργαστηριακές δοκιμές σε νάιλον και άλλες θερμοπλαστικές ρητίνες παρουσιάζουν βελτιώσεις στη διαπερατότητα όταν συνδυάζονται με νανοδομές γραφενίου. Η διαπερατότητα επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος των σωματιδίων του πρόσθετου και σε γενικές γραμμές τα σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου παρέχουν μεγαλύτερες μειώσεις στην διαπερατότητα. Οι πολυλειτουργικές ιδιότητες που προσφέρονται από τις νανοδομές γραφενίου τα καθιστούν ιδανικά πρόσθετα για εφαρμογές όπου απαιτούνται αρκετές βελτιώσεις. Σημαντική επεξεργασία υλικού ή εξοικονόμηση κόστους μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση ή την εξάλειψη της ανάγκης για πολλαπλά φιλμ ή δαπανηρές διαδικασίες ελασματοποίησης. [25]

2.4 Επίδραση του γραφενίου στο αλουμίνιο

Σε πρόσφατο πείραμα που διεξήχθη [26], διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη 2% κ.β. γραφίνης σε μορφή φύλλων (graphene nanosheets) σε μήτρα οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3 οδήγησε στην αύξηση της δυσθραυστότητας κατά 53%. Επίσης, σε άλλο πείραμα παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε θραύση του μονολιθικού Si_3N_4 μπορεί να ενισχυθεί κατά 136% με την προσθήκη 1,5% κατ'όγκο γραφίνης σε μορφή platelets (GPLs) [27]. Παρόμοια αποτελέσματα, δηλαδή ενίσχυση της δυσθραυστότητας, υπήρξαν και με την προσθήκη GPLs σε Si_3N_4 και ZTA (zirconia toughened alumina) σε άλλες εκθέσεις [28,29]. Σύμφωνα με τις μέχρι τώρα έρευνες, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για την κατασκευή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας ενισχυμένης με φύλλα γραφενίου, όπως μαγνήσιο με GNPs και χαλκός με GNPs μέσω συμβατικών μεθόδων κονιομεταλλουργίας και χύτευσης. Ωστόσο, οι μέχρι τώρα δημοσιευμένες μελέτες στην ενίσχυση καθαρού αλουμινίου με γραφίνη είναι περιορισμένες. Σε πείραμα που

δημοσιεύτηκε πρόσφατα, καθαρό αλουμίνιο ενισχύθηκε με 0.25, 0.50 και 1.0 % κατά βάρος GNPs με τη μέθοδο της κονιομεταλλουργίας και μελετήθηκαν οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών πριν και μετά απο διέλαση. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι στην περίπτωση της ενίσχυσης με 0.25% κ.β. GNPs το σύνθετο είχε σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις αλλά και με το μονολιθικό αλουμίνιο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ομοιόμορφη διασπορά των GNPs στο χαμηλό επίπεδο πλήρωσης στην μήτρα του μονολιθικού αλουμινίου. Αναλυτικότερα, πριν απο την διέλαση, το Al-0.25%κ.β.GNPs παρουσίασε αύξηση 13.5% στην αντοχή σε εφελκυσμό και 50% στην επιμήκυνση θραύσης, συγκριτικά με το μονολιθικό αλουμίνιο. Από την άλλη πλευρά, τα σύνθετα Al-0,50%κ.β.GNPs και Al-0.10%κ.β.GNPs παρουσίασαν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό ακόμα και απο το μονολιθικό αλουμίνιο. Καμία σημαντική αλλαγή δεν παρατηρήθηκε στο όριο διαρροής (YS) των σύνθετων. Αντίθετα με τα παραπάνω, τα διελασμένα υλικά παρουσίασαν εντελώς διαφορετικές τάσεις. Το όριο διαρροής των σύνθετων αυξανόταν μαζί με την αύξηση της ενίσχυσης των GNPs. Προς μεγάλη έκπληξη η αντοχή σε εφελκυσμό των 0.25% και 0.50%GNPs ήταν μεγαλύτερη απο αυτή της μονολιθικής μήτρας. Η επιμήκυνση θραύσης αυξήθηκε κατά 46% με την προσθήκη 0.25% κ.β. GNPs. Τα αποτελέσματα του πειράματος δείχνουν οτι η αυξημένη αντοχή του προκύπτοντος σύνθετου υλικού αποδίδεται κατά κύριο λόγο στους βασικούς μηχανισμούς ενίσχυσης συμπεριλαμβανομένων των Orowan looping, μεταφοράς φορτίου αλλά και των διαφορών της κρυσταλλογραφικής υφής μεταξύ του καθαρού AI και των σύνθετων υλικών. Όσον αφορά τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία των nanoplatelets γραφενίου μειώνει σημαντικά την αντοχή στη διάβρωση. Μάλιστα όσο πιο μεγάλη είναι η % κατά βάρος ενίσχυση τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση της αντοχής στην διάβρωση του σύνθετου υλικού, γεγονός που έχει αποδειχτεί και σε προηγούμενες μελέτες.[30] Σύμφωνα με πειραματική έρευνα [31], το υψηλότερο ποσοστό διάβρωσης του Al-GNPs από το ίδιο το αλουμίνιο είναι πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός οτι τα σωματίδια γραφενίου είναι καθοδικά σε σχέση με τη μήτρα, οδηγώντας έτσι σε γαλβανική διάβρωση υπό την παρουσία ενός ηλεκτρολύτη [32].



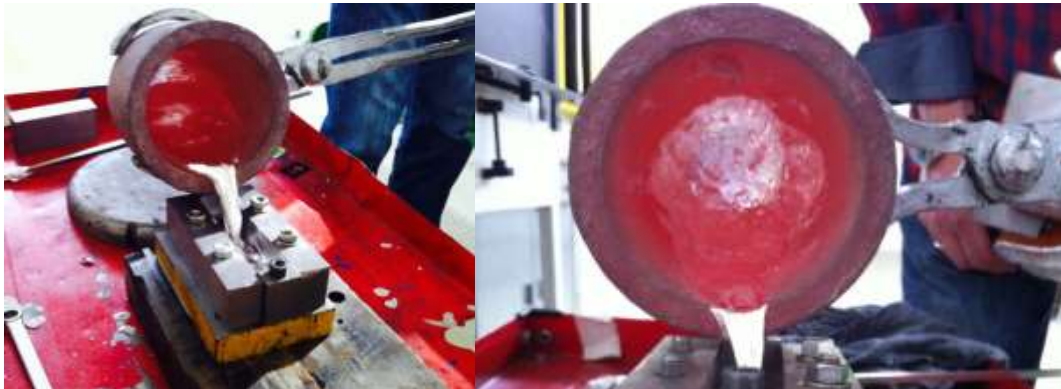
2ο ΜΕΡΟΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 3

Πειραματικό Μέρος

3.1 Χύτευση



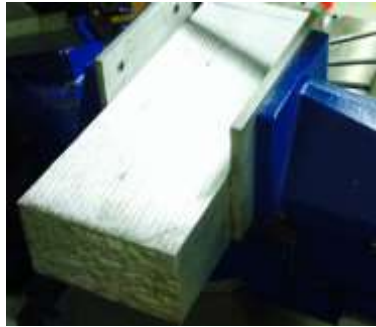
Εικόνα 3.1 Χύτευση αλουμινίου σε μεταλλικό καλούπι

3.1.1 Υλικά και εξοπλισμός

Η χύτευση, καθώς και όλες οι απαραίτητες διαδικασίες για την προετοιμασία της, πραγματοποιήθηκαν στο κτίριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας 96.66% και νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets-GNPs). Το αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρχικά σε μορφή ορθογωνικής μπιγιάτας. Με χρήση αυτόματου πριονιού κόπηκαν μικρά κομμάτια ορθογωνικής διατομής, που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σαν υλικό μήτρας για τα χυτά δοκίμια της παρούσας εργασίας. Αναλυτικότερα τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για την όλη διαδικασία του πειράματος πριν και μετά την χύτευση παρατίθενται παρακάτω:



- Μπιγιέτα κράματος αλουμινίου 96.66%
- Νανοδομές γραφενίου (GNPs)
- Αυτόματο πριόνι
- Κεραμικό δοχείο
- Διαιρετό καλούπι βαμμένου χάλυβα
- Εργαστηριακός κλίβανος τύπου TGH38L
- Ηλεκτρονικό θερμόμετρο
- Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας
- Γυάλινο δοχείο



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)



(ζ)



(η)

Εικόνα 3.2 Υλικά και εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα: (α) Ορθογωνική μιγέτα κράματος αλουμινίου 96.66%, (β) Νανοδομές γραφενίου (GNPs), (γ) Μεταλλικό καλούπι, (δ) Κεραμικό δοχείο, (ε) Ηλεκτρονικό θερμόμετρο, (στ) Γυάλινο δοχείο και ζυγαριά, (ζ) Αυτόματο πριόνι, (η) Εργαστηριακός κλίβανος

3.1.2 Μέτρα Προστασίας

Η χύτευση είναι μία επικίνδυνη διαδικασία, κατά την οποία είναι απαραίτητο να λαμβάνονται αυστηρά τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Σε περίπτωση ταυτόχρονης χρήσης νανοδομών γραφενίου, τα μέτρα προστασίας επιβάλλεται να είναι ακόμα αυστηρότερα. Τα Nanoplatelets γραφενίου μπορεί να προκαλέσουν σοβαρό οφθαλμικό ερεθισμό αν έρθουν σε επαφή με τα μάτια ή και ερεθισμό της αναπνευστικής οδού εάν αυτά εισπνευστούν. Πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά η εισπνοή σκόνης, αναθυμιάσεων, αερίων, σταγονιδίων, ατμών και εκνεφωμάτων που περιέχουν γραφένιο. Είναι απαραίτητο οι συμμετέχοντες σε τέτοιου είδους πειράματα να φορούν μη διαπερατά από νανοσωματίδια γάντια, προστατευτικά ενδύματα ιδίου τύπου και μέσα προστασίας για τα μάτια και το πρόσωπο. Εάν για οποιοδήποτε λόγο το υλικό έρθει σε επαφή με τα μάτια συστήνεται άμεσο ξέπλυμα προσεκτικά με νερό, ενώ σε περίπτωση εισπνοής κρίνεται απαραίτητη η μεταφορά του παθόντος στον καθαρό αέρα και η ξεκούραση του σε στάση που διευκολύνει την αναπνοή. Τα μέτρα προστασίας που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ήταν πιστοποιημένα κατά CE και αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω:

- Δερμάτινη ποδιά
- Πυρίμαχα γάντια
- Γάντια latex μη διαπερατά απο νανοσωματίδια
- Μάσκα για σκόνη επιπέδου προστασίας FFP3 (προστασία απο micro και nano σωματίδια)
- Πλαστικά γυαλιά ασφαλείας
- Μεταλλική λαβίδα



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 3.3 Μέτρα προστασίας που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων: (α) Γυαλιά ασφαλείας και μάσκα προστασίας, (β)Γάντια Latex, (γ)Πυρίμαχο γάντι, (δ)Μεταλλική λαβίδα

3.1.3 Διαδικασία χύτευσης

Η χύτευση είχε σαν σκοπό την δημιουργία τριών σειρών δοκιμίων. Μία σειρά δοκιμίων απο αλουμινό καθαρότητας 96.66%, μία σειρά δοκιμίων αλουμινίου με περιεκτικότητα 0.10% w.t. σε νανοδομές γραφενίου και μία σειρά δοκιμίων αλουμινίου με περιεκτικότητα 0.20% w.t. σε νανοδομές γραφενίου. Η διαδικασία της χύτευσης ξεκίνησε με την προθέρμανση του εργαστηριακού κλίβανου στους 750 °C καθώς και με την προθέρμανση του κεραμικού δοχείου. Για την πρώτη σειρά δοκιμίων, τα κομμάτια ορθογωνικής διατομής του κράματος αλουμινίου, αφού πλύθηκαν και καθαρίστηκαν μετά την κοπή στο αυτόματο πριόνι, τοποθετήθηκαν στο προθερμασμένο κεραμικό δοχείο και αυτό με την σειρά του στον κλίβανο. Το κεραμικό δοχείο παρέμεινε στον κλίβανο για 50 λεπτά μέχρι την πλήρη ρευστοποίηση του αλουμινίου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η έγχυση του ρευστοποιημένου πλέον υλικού μήτρας στο μεταλλικό

καλούπι βάθους 34 mm και θερμοκρασίας 100 °C. Αμέσως μετά, τοποθετήθηκε στην πάνω πλευρά το άνω τμήμα του μεταλλικού καλουπιού, ίδιου υλικού και βάρους 1031,9 gr. Το άνω τμήμα τοποθετείται για την εξασφάλιση της ομοιόμορφης ψύξης του χυτού. Το υλικό παρέμεινε στο καλούπι για 2 λεπτά, στη συνέχεια αφαιρέθηκε και αφέθηκε να ψυχθεί ελεύθερο σε αέρα θερμοκρασίας δωματίου. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε έξι ακόμα φορές. Τα βήματα της διαδικασίας της χύτευσης παρουσιάζονται προοδευτικά σε μορφή φωτογραφιών στις Εικόνες 3.4 – 3.9.



3.4 Εισαγωγή πλακών αλουμινίου στο καλούπι



3.5 Εισαγωγή δοχείου στον κλίβανο



3.6 Χύτευση στο θερμό μεταλλικό καλούπι



3.7 Άμεση τοποθέτηση άνω τμήματος



3.8 Δίλεπτη παραμονή υλικού στο καλούπι



3.9 Ελεύθερη ψύξη δοκιμίου στον αέρα

Για τις υπόλοιπες σειρές δοκιμών πραγματοποιήθηκε ελεύθερη χύτευση με ανάδευση με σκοπό τη βέλτιστη ενσωμάτωση και την ομοιόμορφη διασπορά των νανοδομών γραφενίου στο αλουμίνιο. Για τη σειρά Al-0.10%w.t.GNPs τοποθετήθηκαν οι υψηλής καθαρότητας πλάκες αλουμινίου στο προθερμασμένο κεραμικό δοχείο αφού πρώτα ζυγίστηκαν. Ύστερα τοποθετήθηκαν τα GNPs σε γυάλινο δοχείο, σε ποσότητα 0.10% w.t. Αφού τοποθετήθηκε το κεραμικό δοχείο στον κλίβανο στους 750 °C, παρέμεινε για 50-55 λεπτά μέχρι να ρευστοποιηθεί πλήρως και ακολούθησε ταυτόχρονη αναδευση του μείγματος. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η χύτευση στο προθερμασμένο στους 100°C μεταλλικό καλούπι, σύμφωνα με την προαναφερθείσα διαδικασία. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την τρίτη σειρά δοκιμών (Al-0.20%w.t.GNPs). Για την εισαγωγή και εξαγωγή του κεραμικού δοχείου από τον κλίβανο χρησιμοποιήθηκε η μεταλλική λαβίδα.

3.1.4 Παραχθέντα δοκίμια



Εικόνα 3.10 Δοκίμια κράματος αλουμινίου καθαρότητας 96.66%

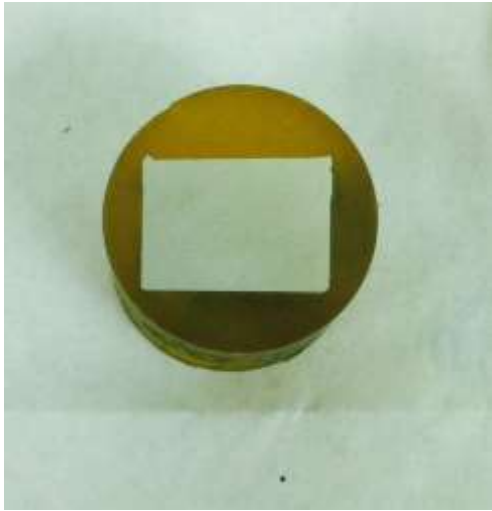
Σκοπός της χύτευσης ήταν η παραγωγή επτά δοκιμίων για κάθε σειρά. Έτσι, ακολουθώντας τις προαναφερθείσες διαδικασίες, δημιουργήθηκαν:

- 7 δοκίμια αλουμινίου καθαρότητας 96.66%
- 7 δοκίμια αλουμινίου καθαρότητας 96.66% με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNP's
- 7 δοκίμια αλουμινίου καθαρότητας 96.66% με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNP's

Από κάθε σειρά δοκιμίων, τρία υποβλήθησαν σε δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό (Tensile Strength Test), τρία σε δοκιμή αντοχής σε κάμψη τριών σημείων (Three Point Bending) και ένα χρησιμοποιήθηκε για μεταλλογραφική μελέτη και σκληρομέτρηση.

3.2 Μεταλλογραφία

Για τη μελέτη της επιφάνειας των δοκιμίων, τα δοκίμια κόπηκαν σε κατάλληλο μέγεθος με χρήση δισκοτόμου, εγκιβωτίστηκαν, λειάνθηκαν, στιλβώθηκαν και υπέστησαν χημική προσβολή με αντιδραστήριο Keller's. Η μεταλλογραφική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε οπτικό μικροσκόπιο LEICA DMR και σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope) JEOL JSM 6380-LN, ώστε να μελετηθεί η μικροδομή των δοκιμίων.



Εικόνα 3.11 Εγκιβωτισμένο δοκίμιο σε ρητίνη



Εικόνα 3.12 Περιστρεφόμενος λειαντικός δίσκος

3.2.1 Προετοιμασία δοκιμίων

Η λείανση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε αυτόματο περιστρεφόμενο λειαντικό δίσκο, όπου χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά από καρβίδιο πυριτίου (Silicon Carbide) με μειούμενο βαθμό τραχύτητας (αυξανόμενο grid): 180, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400, 4000. Καθ'όλη την διάρκεια της λείανσης, στον περιστρεφόμενο δίσκο υπήρχε κατάλληλη τροφοδοσία νερού, τόσο για την αποφυγή των φαινομένων αύξησης της θερμοκρασίας λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής, όσο και για την απομάκρυνση υπολειμμάτων του υλικού.

Την ολοκλήρωση της λείανσης ακολούθησε χημική προσβολή της επιφάνειας των δοκιμίων με αντιδραστήριο Keller's του οποίου η σύσταση είναι: 190 ml H₂O, 3 ml HCl, 2ml HF, 5ml HNO₃. Ο χρόνος προσβολής (χρόνος εμβάπτισης) των δοκιμίων ήταν 15 δευτερόλεπτα, ενώ εν συνεχεία τα δοκίμια πλύθηκαν με απεσταγμένο νερό και αιθανόλη. Σκοπός της χημικής προσβολής είναι η διάβρωση των ορίων των κόκκων και η εμφάνιση της μικροδομής του εξεταζόμενου υλικού.

3.2.2 Αποτελέσματα Μεταλλογραφικής Μελέτης

Με το πέρας της παραπάνω διαδικασίας, τα δοκίμια παρατηρήθηκαν σε οπτικό μικροσκόπιο και σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope), όπου ελήφθησαν αντιπροσωπευτικές εικόνες για κάθε ένα. Επίσης, με τη βοήθεια του προγράμματος ImageJ, υπολογίστηκε το μέσο μήκος και το εμβαδό των διαδενδριτικών περιοχών. Στη συνέχεια παρατίθενται οι μικροσκοπικές απεικονίσεις των δοκιμίων, ο σχολιασμός τους, καθώς και οι ποσοστιαίες απεικονίσεις των εμβαδών των δενδριτικών και διαδενδριτικών περιοχών.

➤ Αλουμινίο καθαρότητας 96.66%

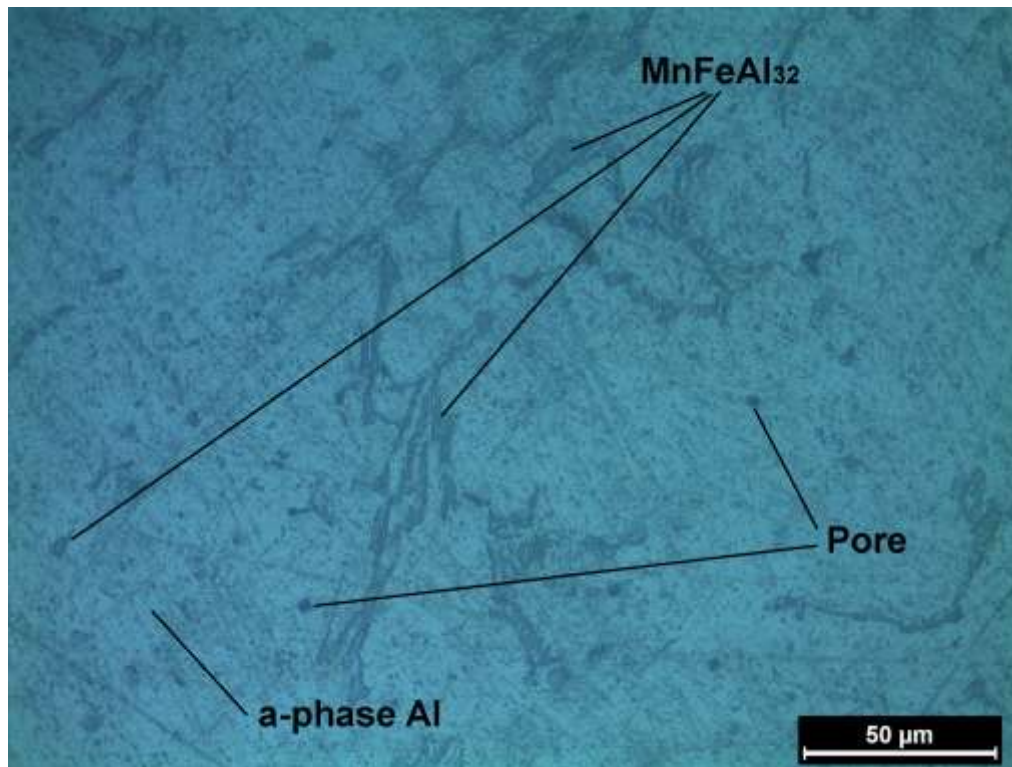
Απο τον πλήρη φασματογραφικό χαρακτηρισμό (Πιν.3.1), είναι προφανές πως το αρχικό κράμα αλουμινίου περιέχει πολλούς εκλεπτυντές κόκκων (Zr, Sr, κ.ά.). Τα κύρια κραματικά στοιχεία του αρχικού κράματος έχουν ως εξής:

- Al : 96.663%
- Mn : 1.080%
- Mg : 0.976%
- Fe : 0.594%
- Si : 0,214%.



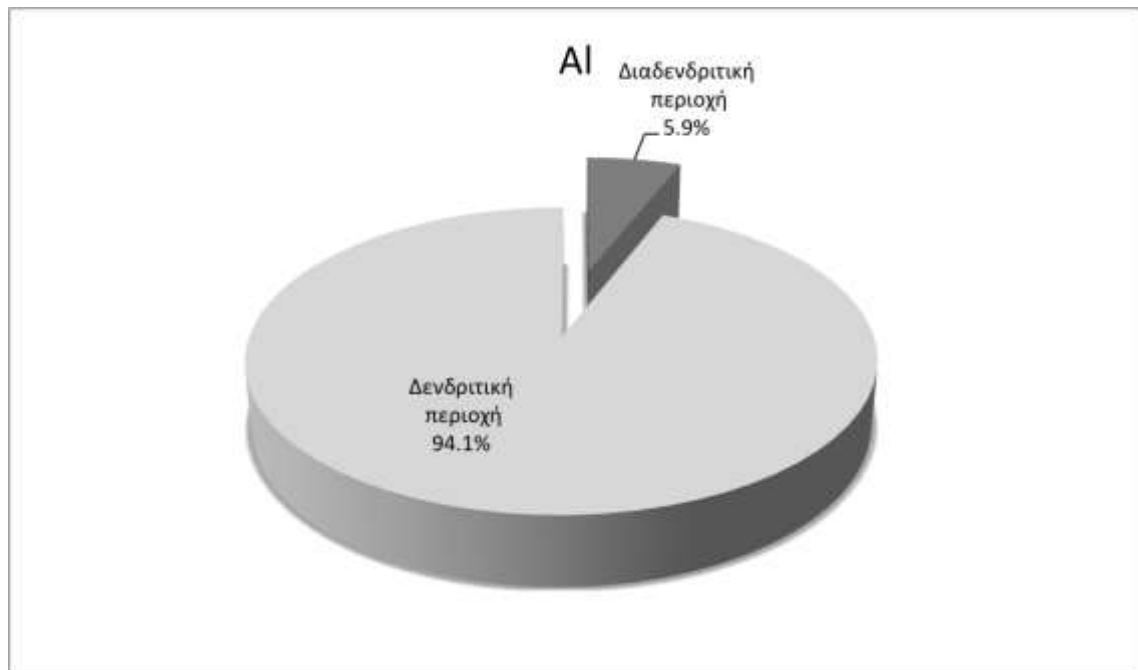
Πίνακας 3.1 Φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αλουμινίου μήτρας

Φασματογραφικός χαρακτηρισμός του αλουμινίου μήτρας			
Si (%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)
0.2138	0.5938	0.3001	1.0801
Ni(%)	Pb(%)	Sn(%)	Na(%)
0.0053	0.0032	0.0013	0.0180
V(%)	Be(%)	Sr(%)	Co(%)
0.0094	0.0000	0.0002	0.0032
Li(%)	As(%)	Hg(%)	Al(%)
0.0001	0.0012	0.0007	96.6631
Mg(%)	Zn(%)	Ti(%)	Cr(%)
0.9760	0.4119	0.0244	0.0250
Ca(%)	B(%)	Bi(%)	Zr(%)
0.2133	0.0001	0.0000	0.0013
Cd(%)	Sb(%)	Ga(%)	P(%)
0.0004	0.0033	0.0163	0.0023
FeMn(%)	HeavyMet(%)	FeSi(%)	MgMn(%)
1.6740	0.0043	0.8080	2.0560

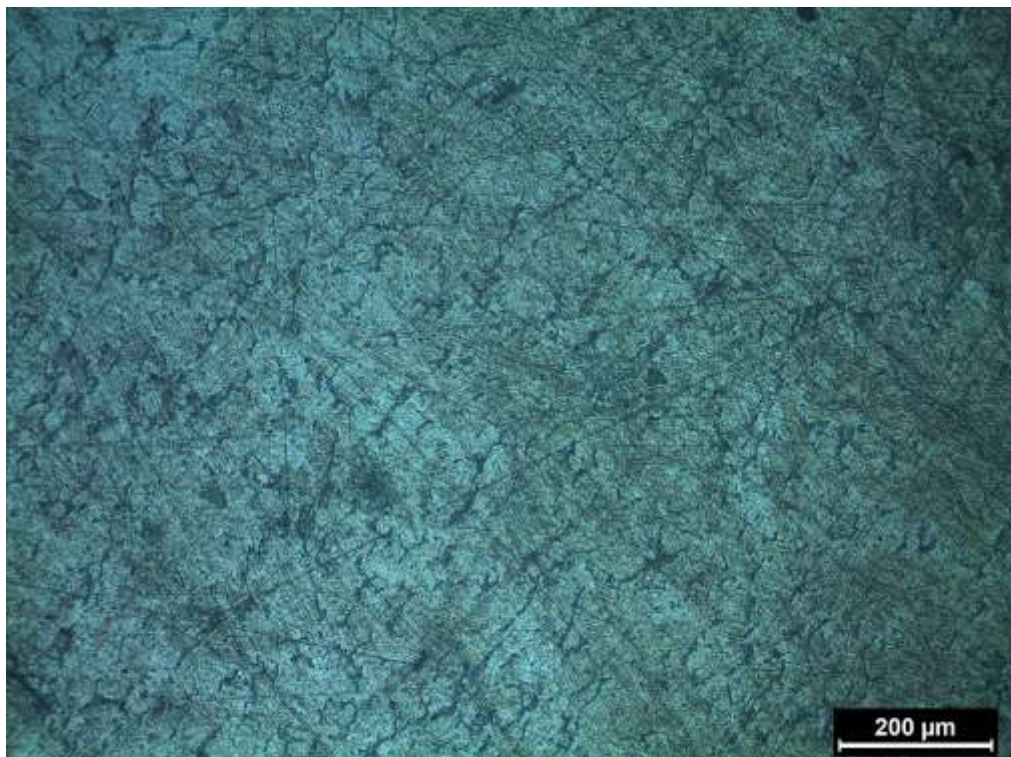


Εικόνα 3.13 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)

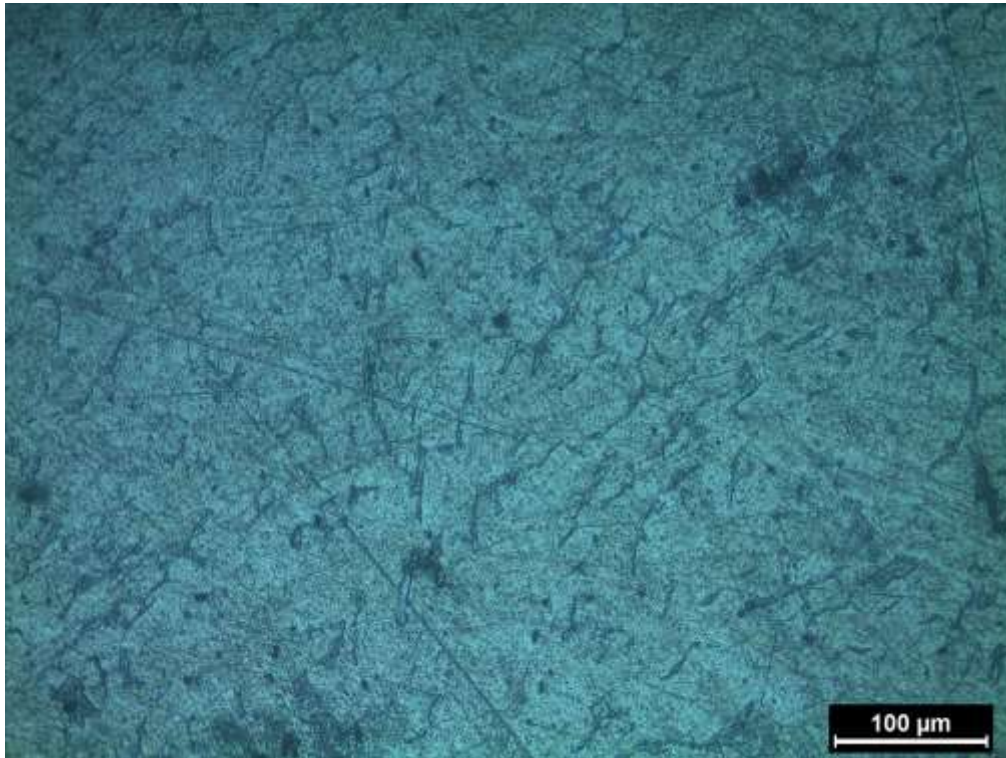
Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται σε μικροσκοπική απεικόνιση (φακός x50) το δοκίμιο καθαρού αλουμινίου. Παρουσιάζονται μεγάλες δενδριτικές δομές α-φάσης, αφήνοντας έτσι μικρές διαδενδριτικές περιοχές βελονοειδούς μορφής και μικρού μήκους. Στις διαδενδριτικές περιοχές παρατηρείται κατακρήμνιση φάσης MnFeAl₃₂, ενώ οι μαύρες κηλίδες που παρατηρούνται είναι πόροι. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το εμβαδό της διαδενδριτικής περιοχής ως ποσοστό του συνολικού εμβαδού της εξεταζόμενης επιφάνειας.



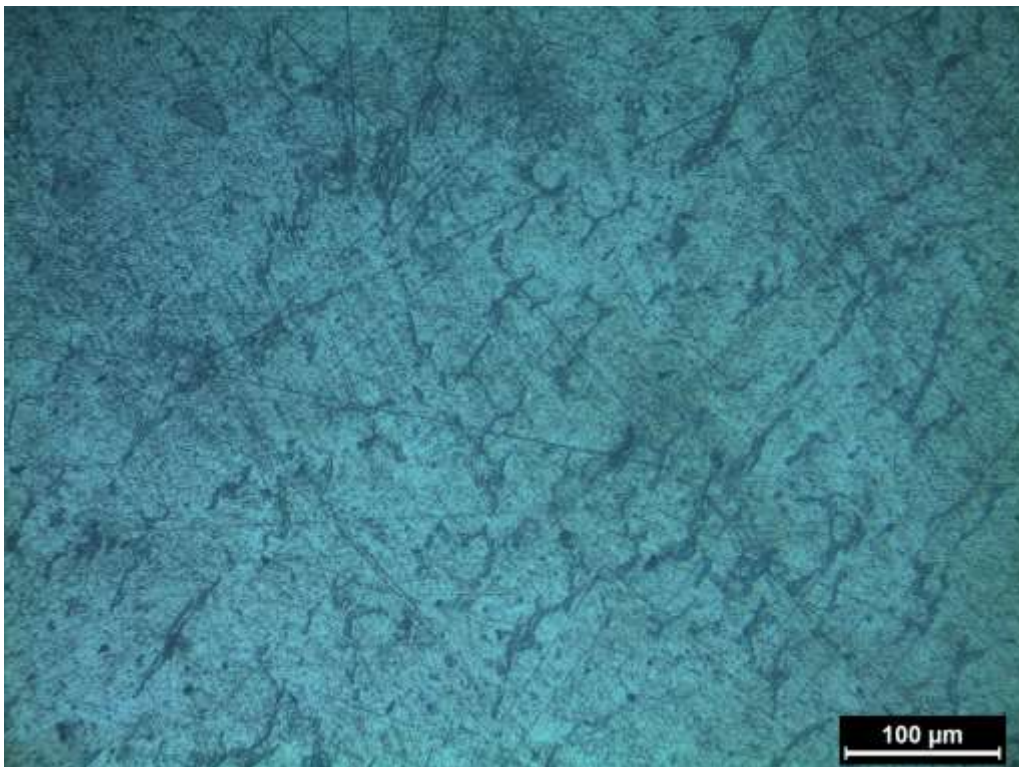
Σχήμα 3.1 Ποσοστιαία απεικόνιση δενδριτικών-διαδενδριτικών περιοχών σε δοκίμιο αλουμινίου μήτρας



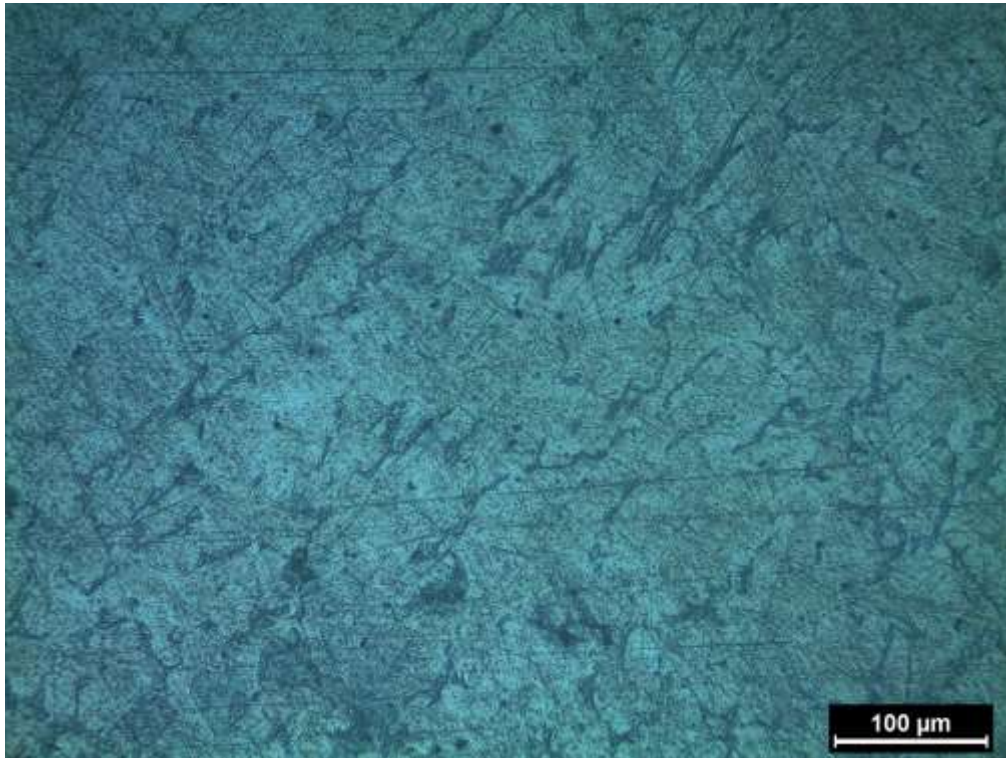
Εικόνα 3.14 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)



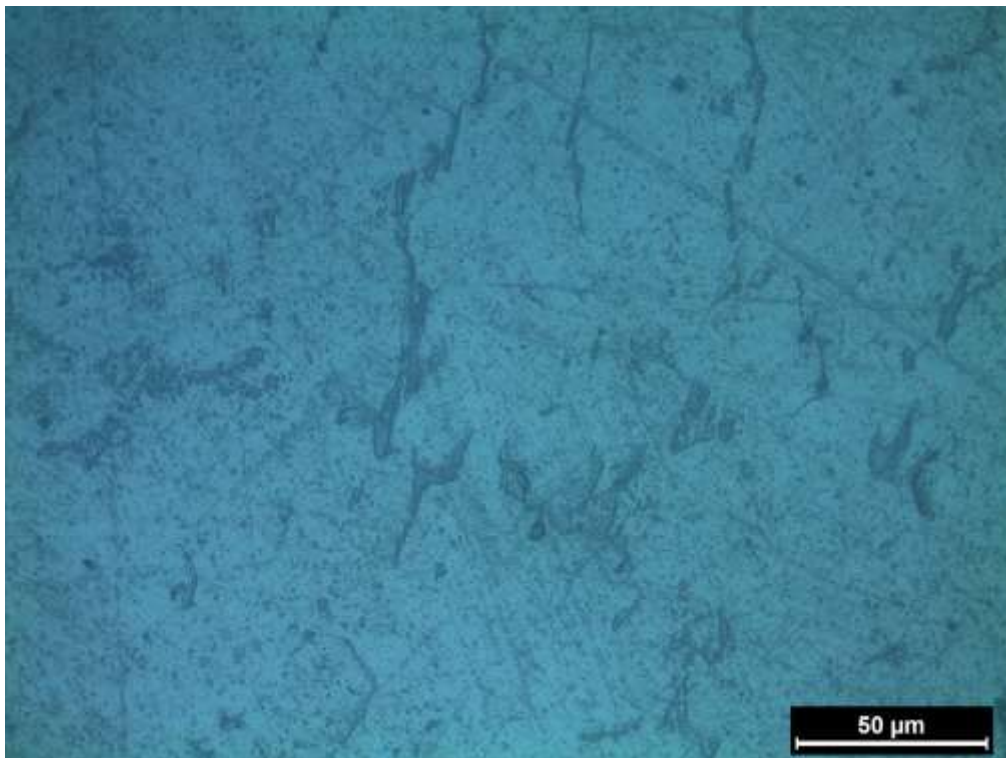
Εικόνα 3.15 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



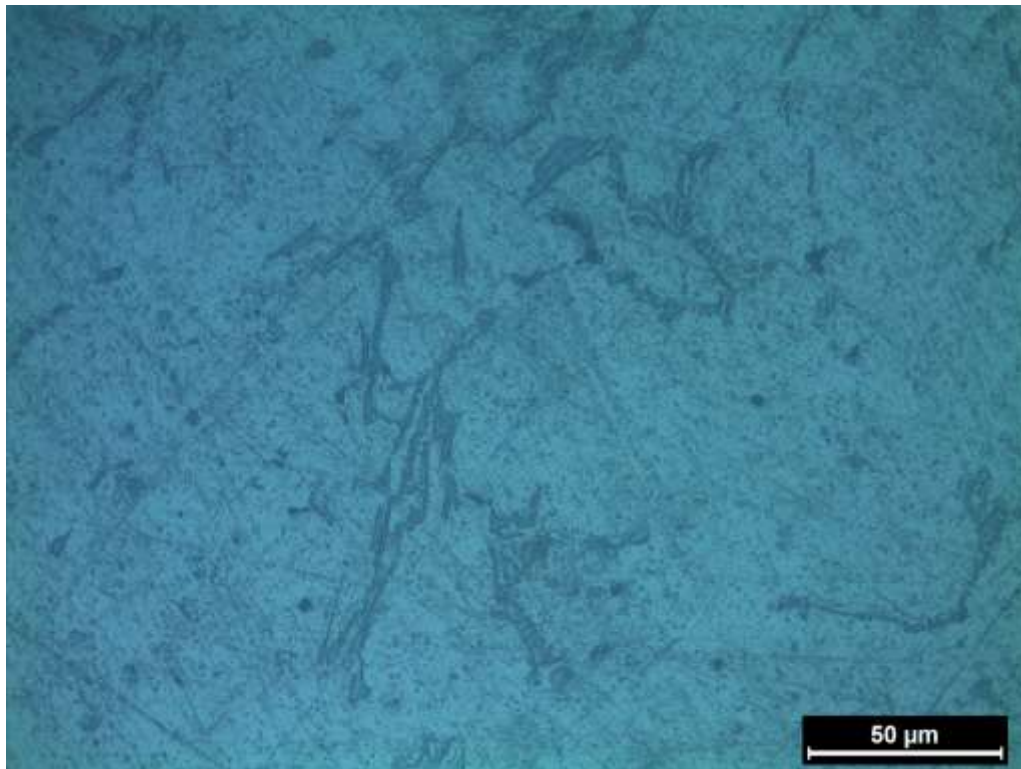
Εικόνα 3.16 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



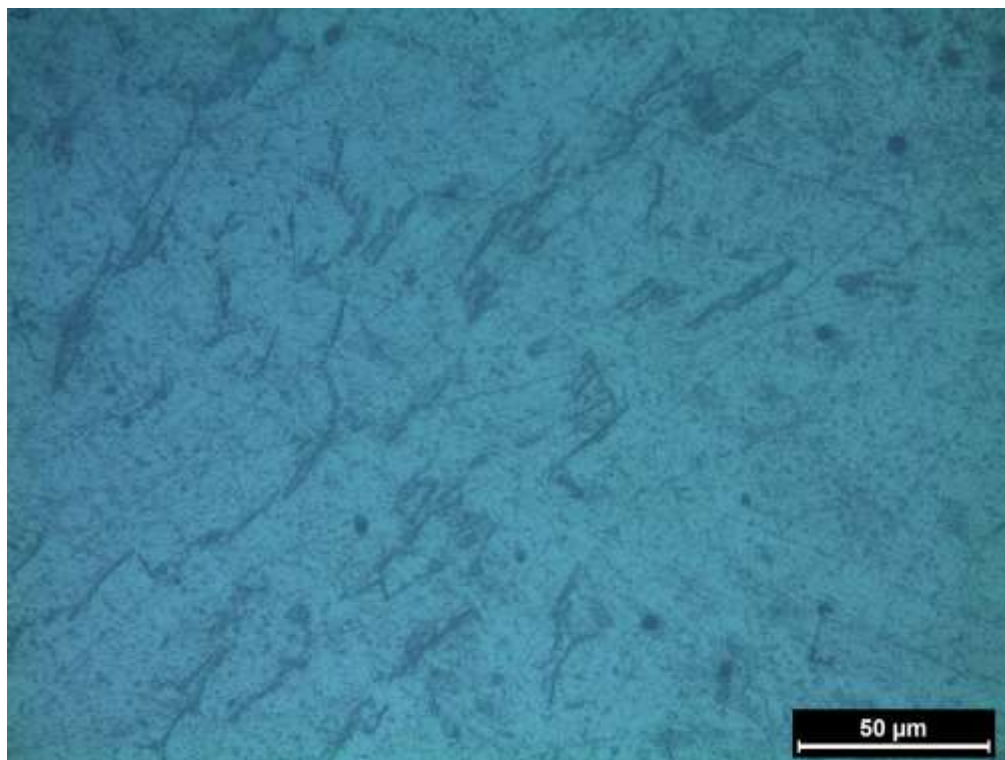
Εικόνα 3.17 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χτυπημένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



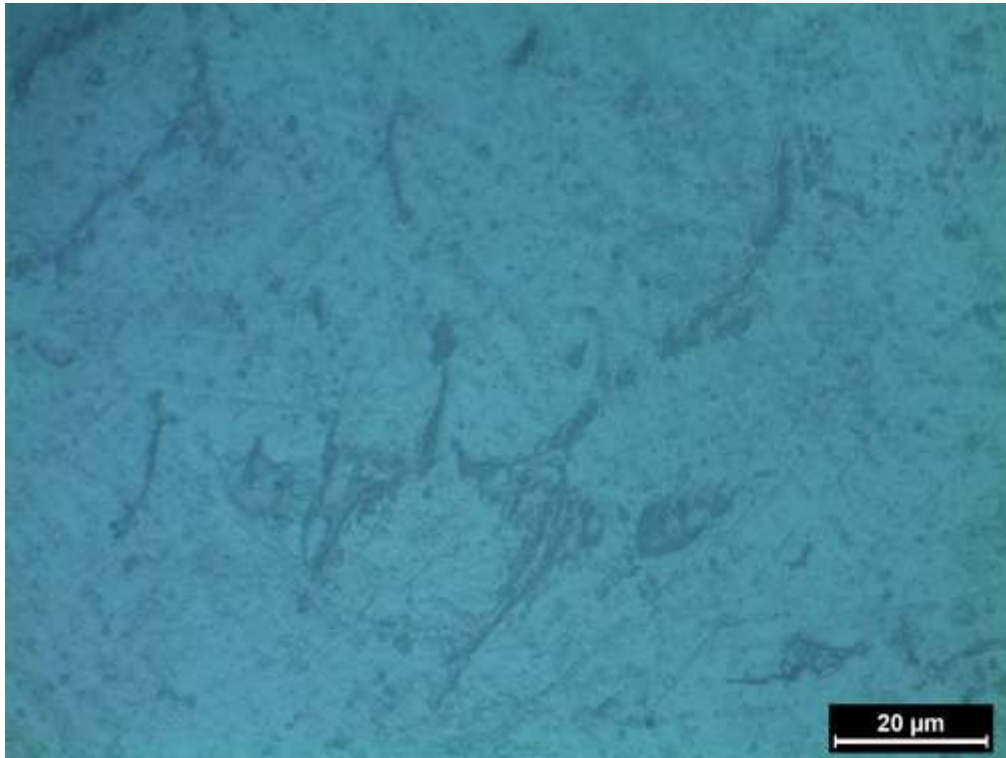
Εικόνα 3.18 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χτυπημένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



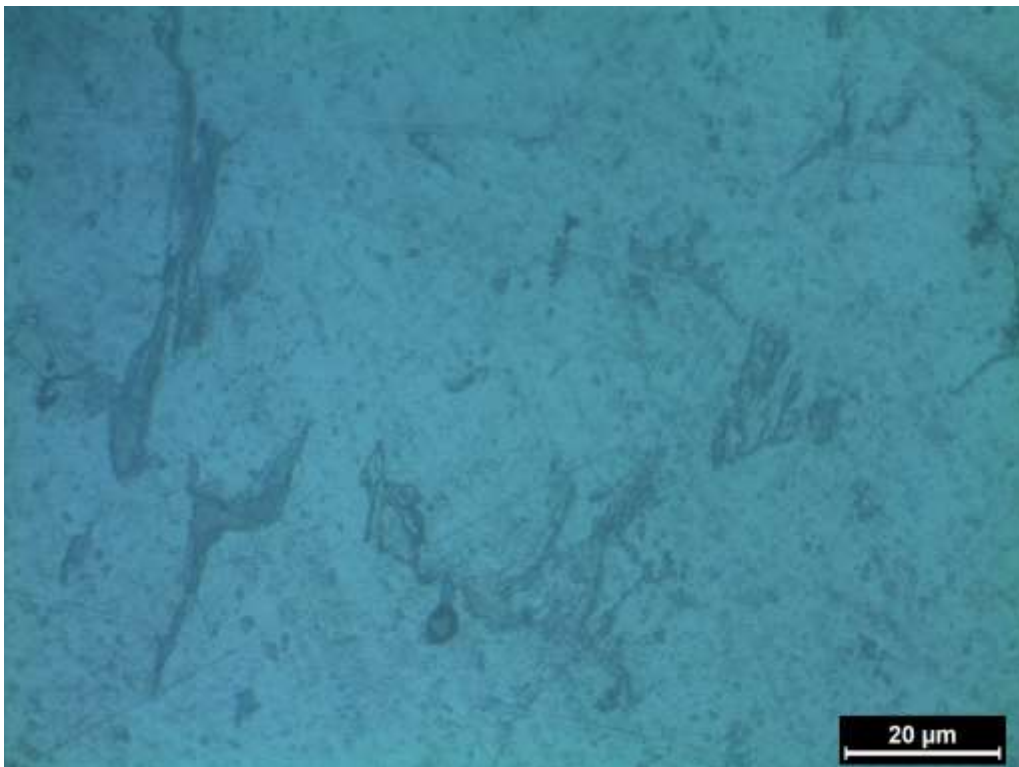
Εικόνα 3.19 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



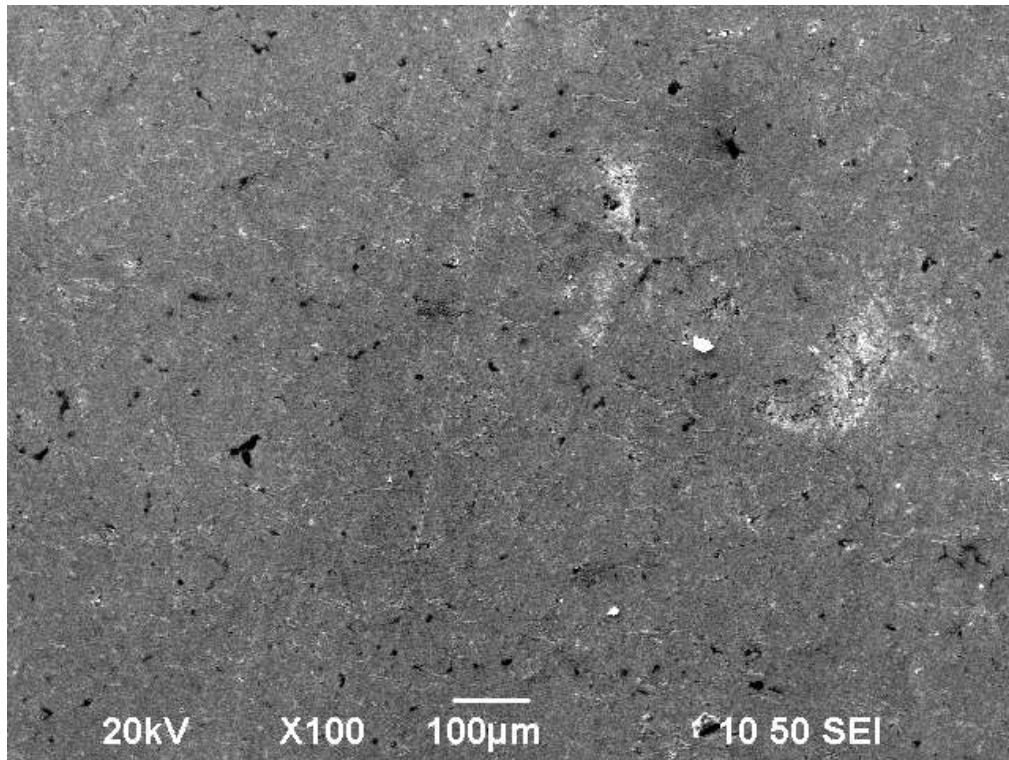
Εικόνα 3.20 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



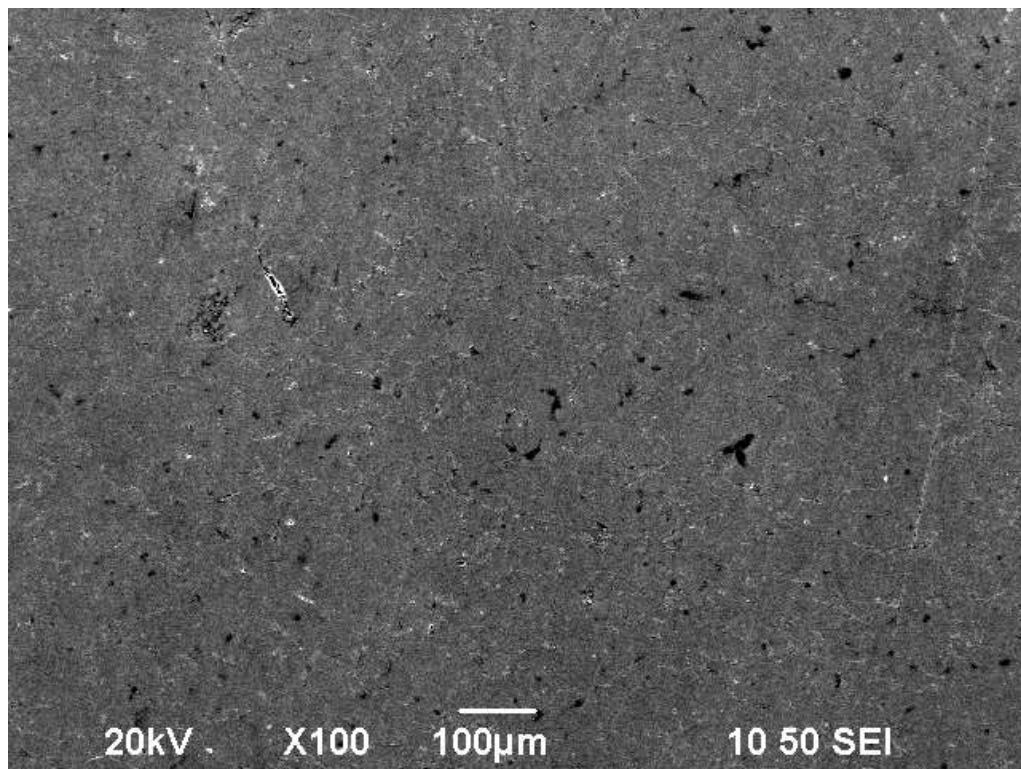
Εικόνα 3.21 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



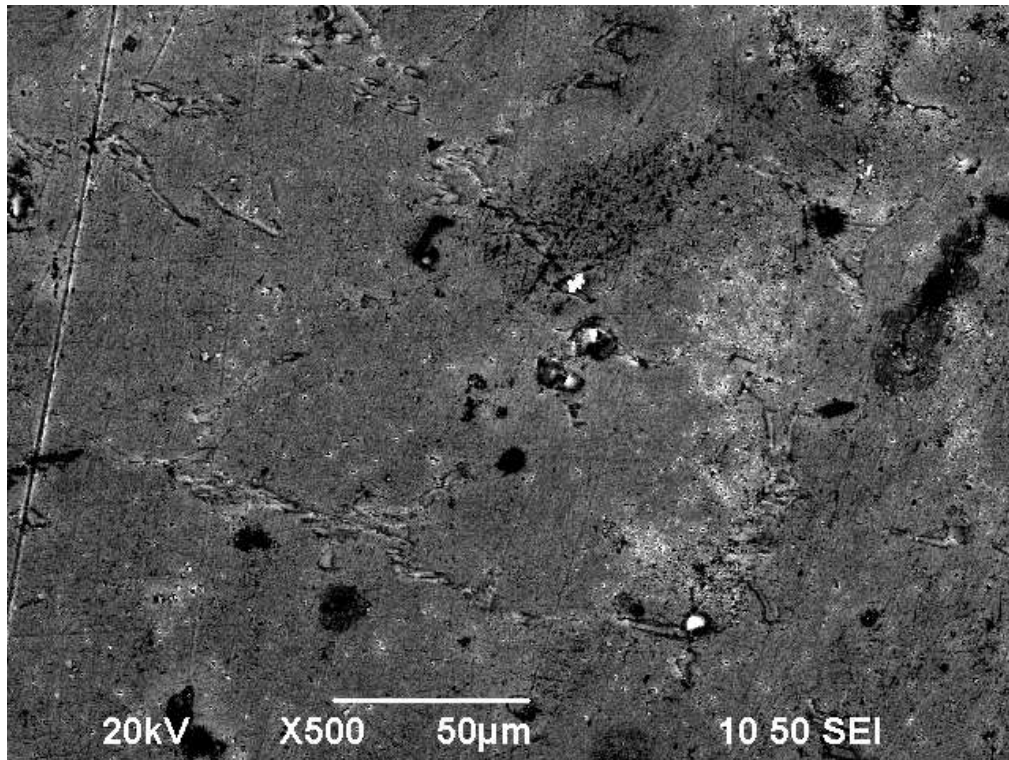
Εικόνα 3.22 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



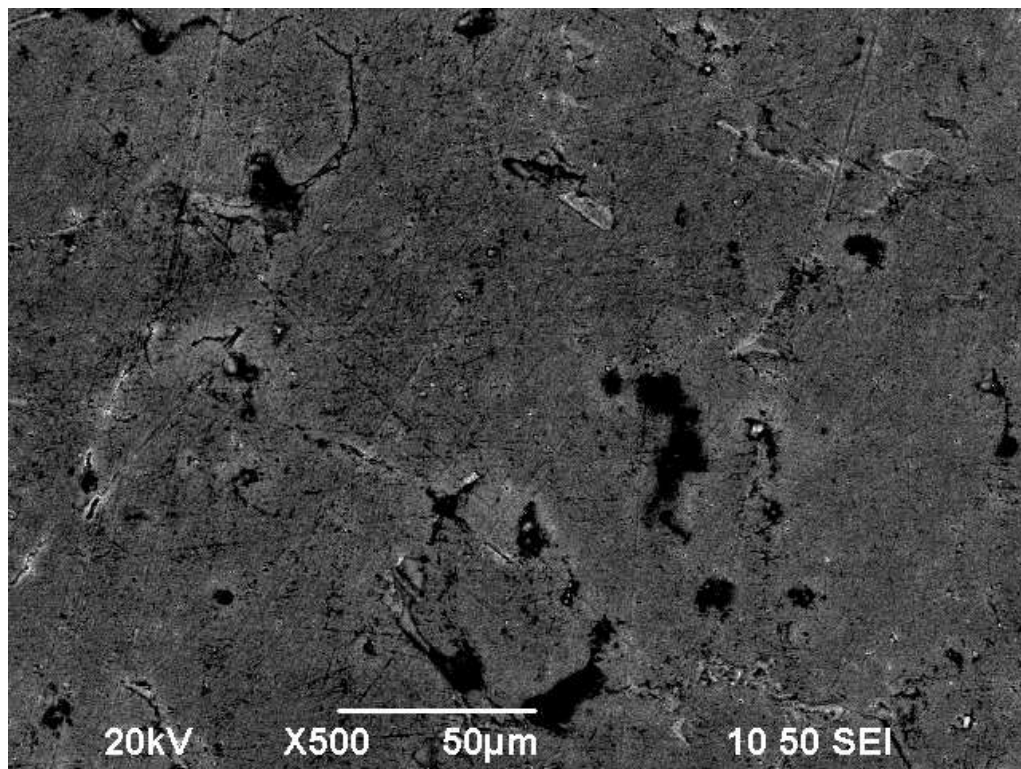
Εικόνα 3.23 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χτυπημένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100)



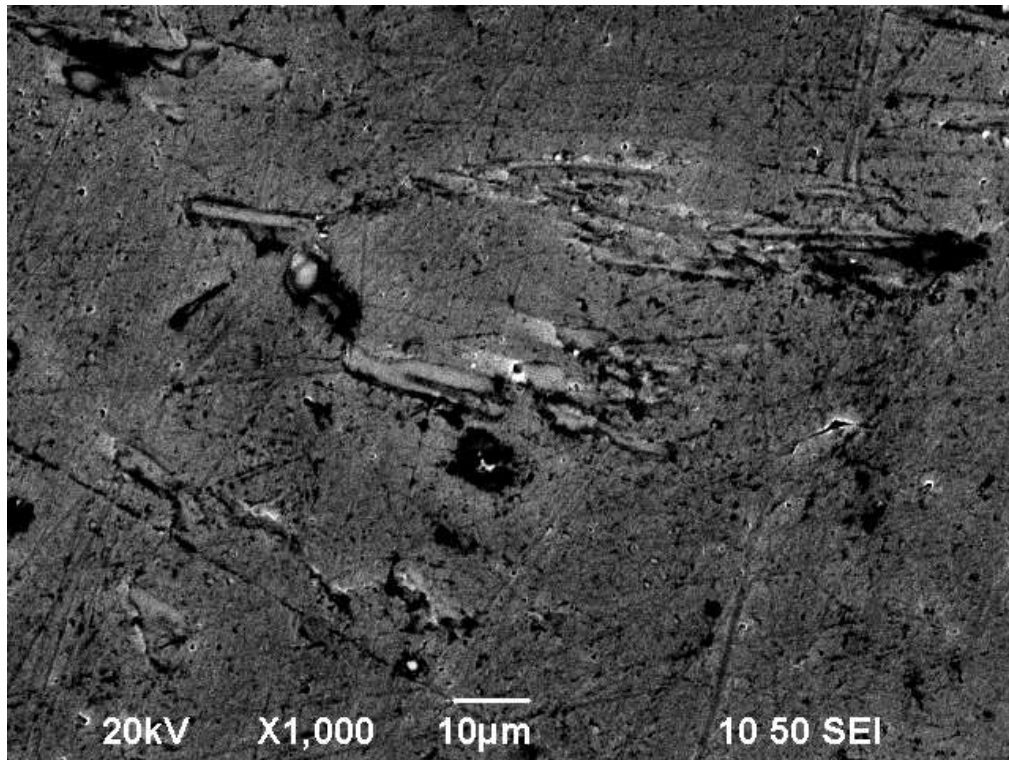
Εικόνα 3.24 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χτυπημένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100)



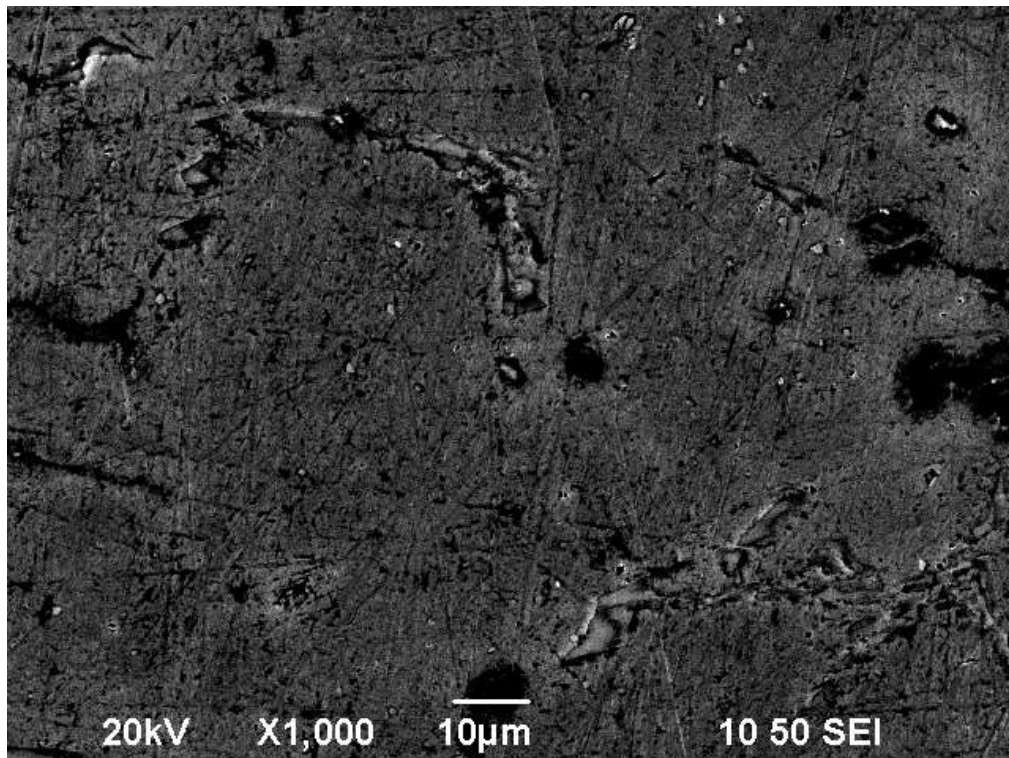
Εικόνα 3.25 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)



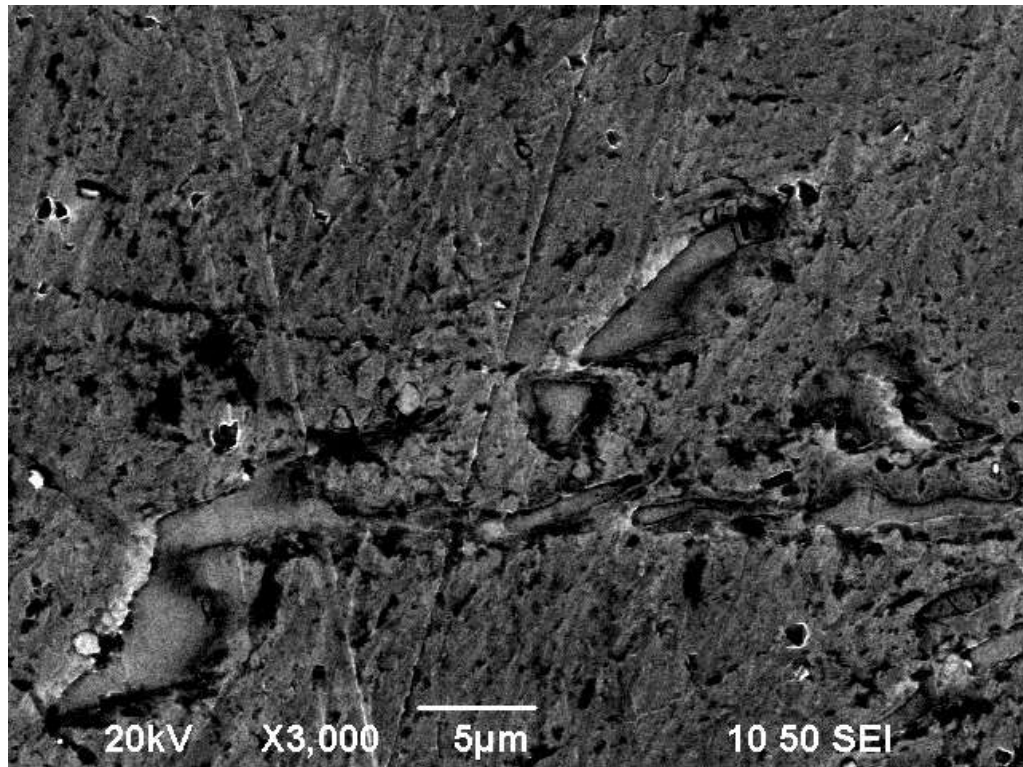
Εικόνα 3.26 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)



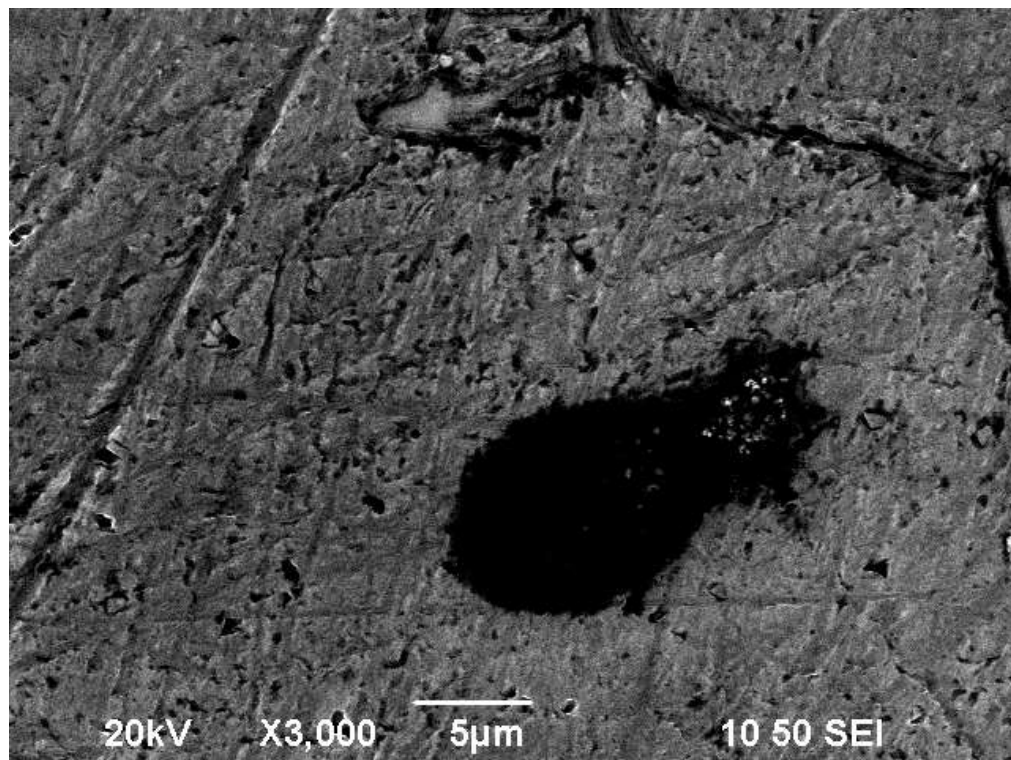
Εικόνα 3.27 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x1000)



Εικόνα 3.28 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x1000)

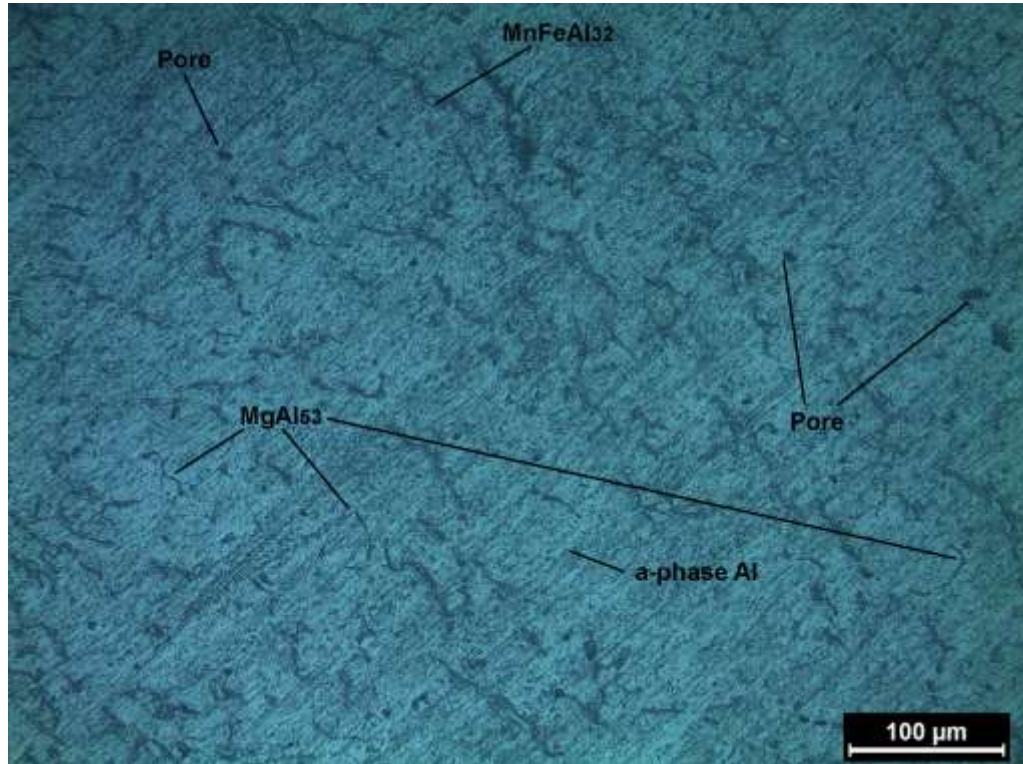


Εικόνα 3.29 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)



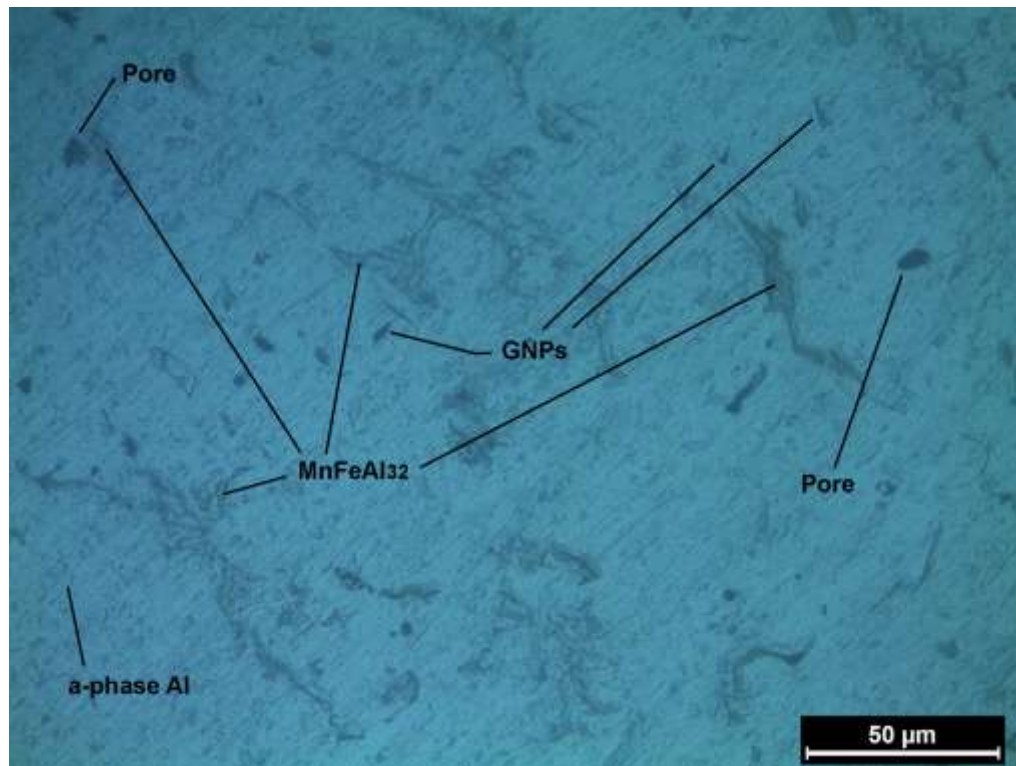
Εικόνα 3.30 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al (αρχικό κράμα αλουμινίου, χυτευμένο σε μεταλλικό καλούπι θερμοκρασίας 100°C) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)

- Αλουμίνιο 96.66% με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs

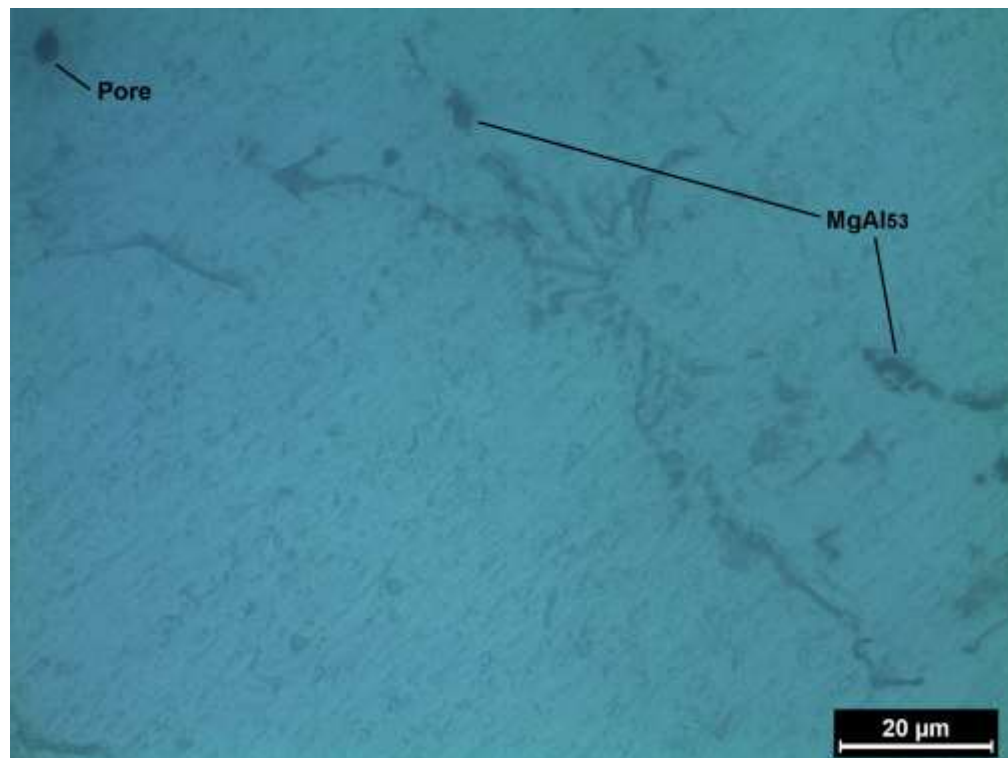


Εικόνα 3.31 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)

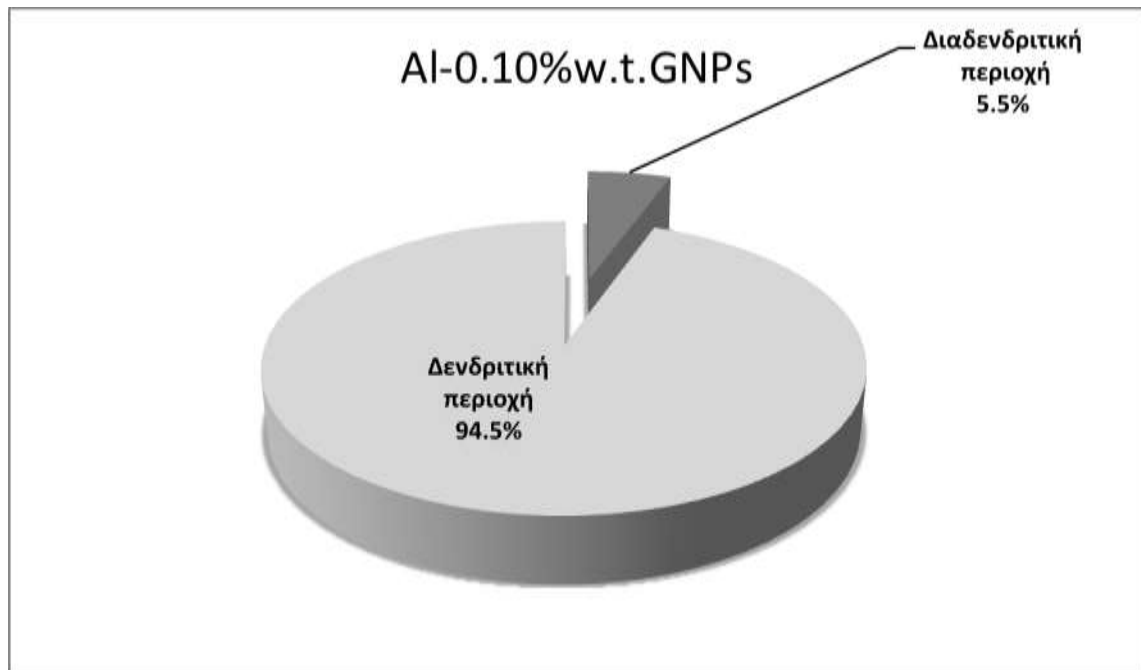
Απο τη μικροσκοπική απεικόνιση, φαίνεται η προσθήκη 0.10% w.t. GNPs να μην επηρεάζει τη μορφή των δενδριτικών και διαδενδριτικών περιοχών, αλλά να αυξάνει αρκετά την πυκνότητα των τελευταίων. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα δεν υπάρχει κάποια διαφορά όσον αφορά το εμβαδό των διαδενδριτικών περιοχών ενώ αντίθετα υπολογίστηκε το μέσο μήκος τους να έχει μειωθεί κατα 8%. Στη διαδενδριτική περιοχή, όπως και στην περίπτωση του αλουμινίου, παρατηρείται κατακρήμνιση φάσης MnFeAl_{32} , η γκρίζα περιοχή είναι αλουμίνιο α -φάσης και η μαύρες στρογγυλές κηλίδες είναι πόροι. Η προσθήκη αυτή φαίνεται επίσης να δημιουργεί εγκλείσματα GNPs, τα οποία δεν λειτουργούν ως πυρήνες ανάπτυξης δενδριτών, ενώ οι λεπτές μαύρες γραμμές που σχηματίζονται είναι αραιές καθιζήσεις φάσης MgAl_{53} , οι οποίες, όπως θα δούμε παρακάτω, σχηματίζουν τις διαδενδριτικές περιοχές στην προσθήκη των 0.20% w.t. GNPs.



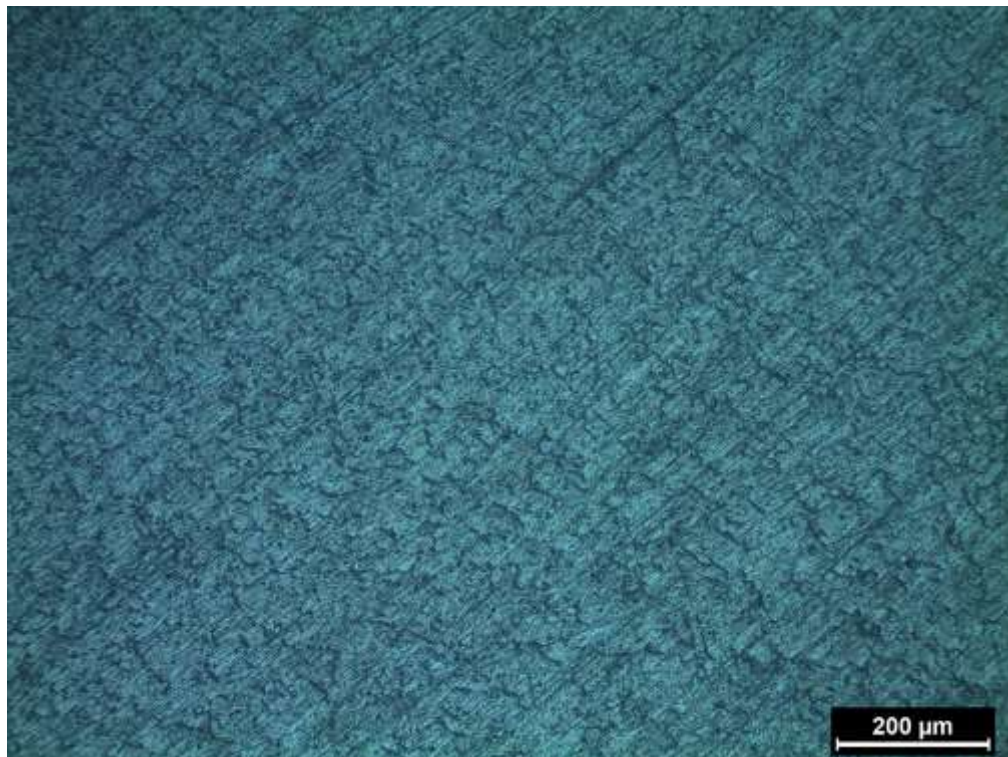
Εικόνα 3.32 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



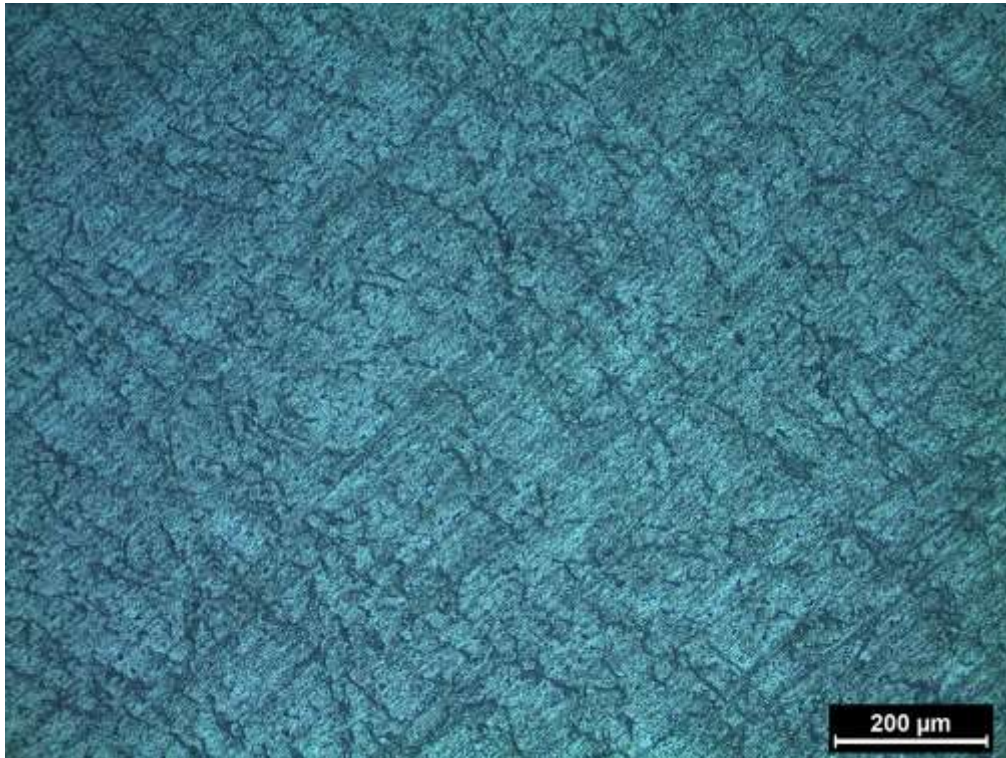
Εικόνα 3.33 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



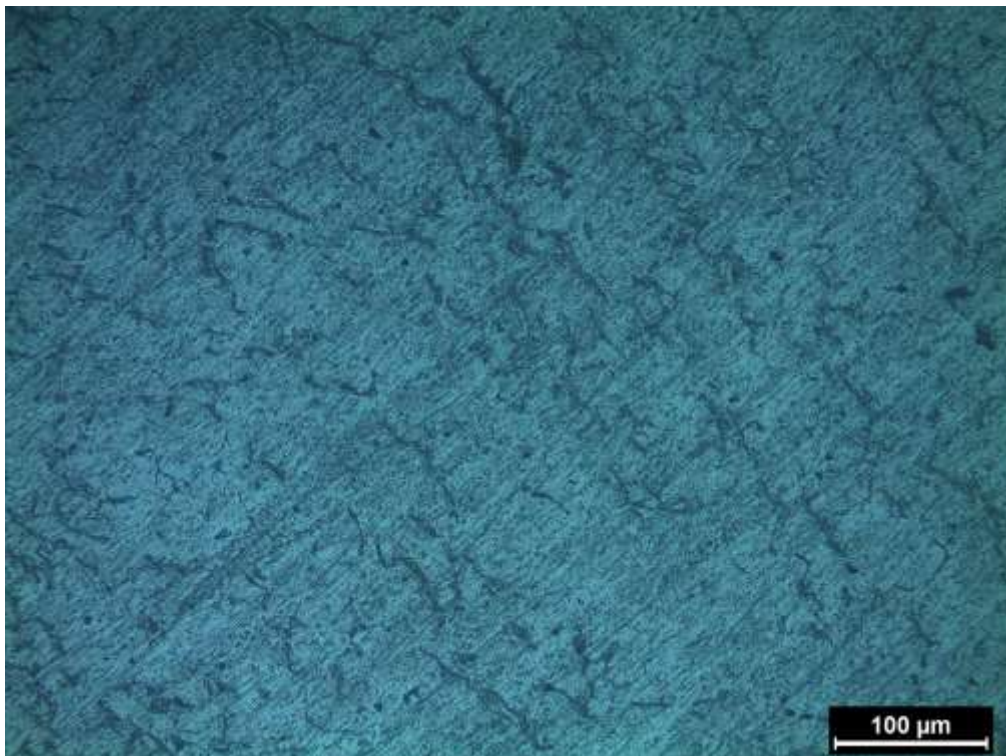
Σχήμα 3.2 Ποσοστιαία απεικόνιση δενδριτικών-διαδενδριτικών περιοχών σε δοκίμιο Al-0.10% w.t. GNP



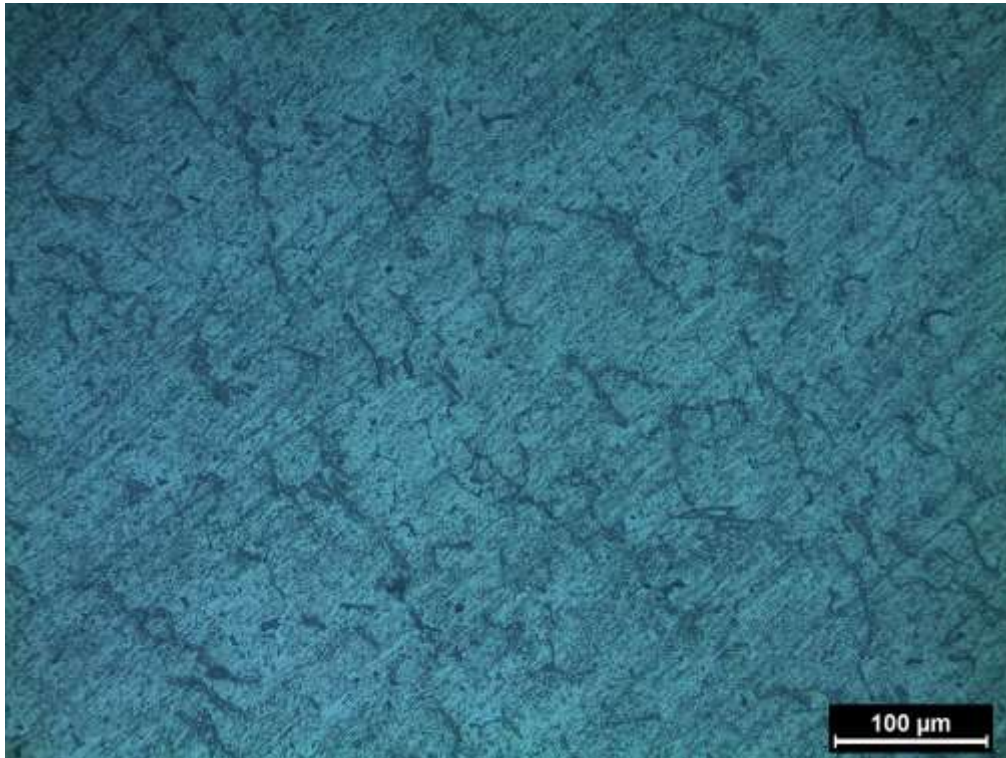
Εικόνα 3.34 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNP από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)



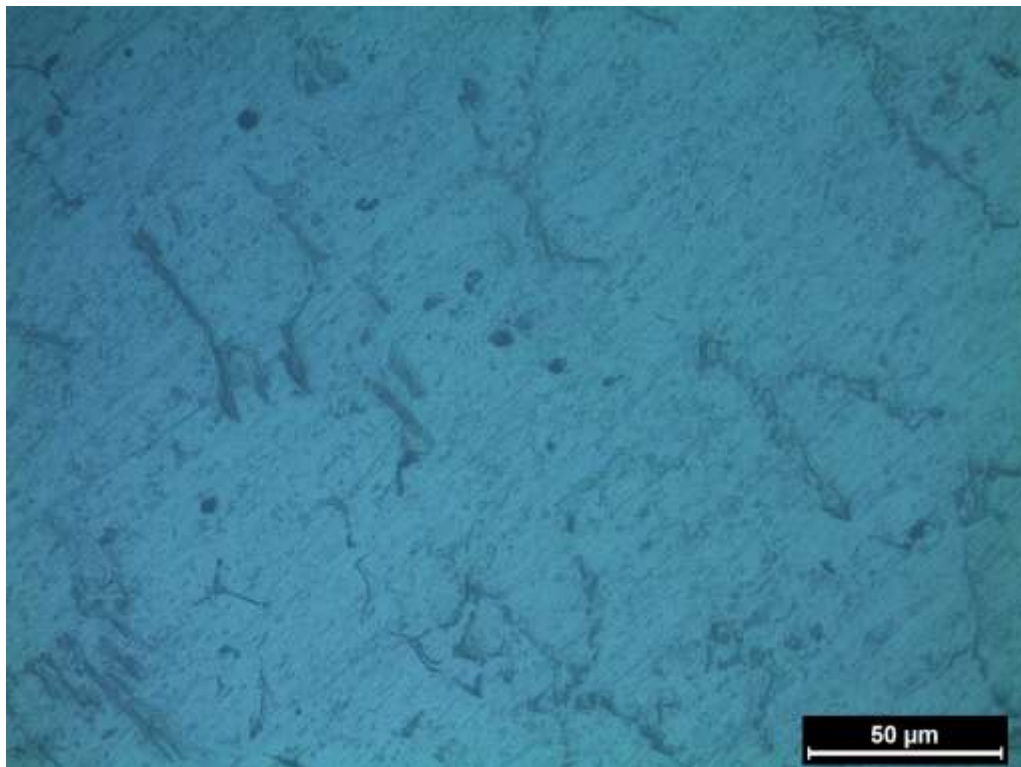
Εικόνα 3.35 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)



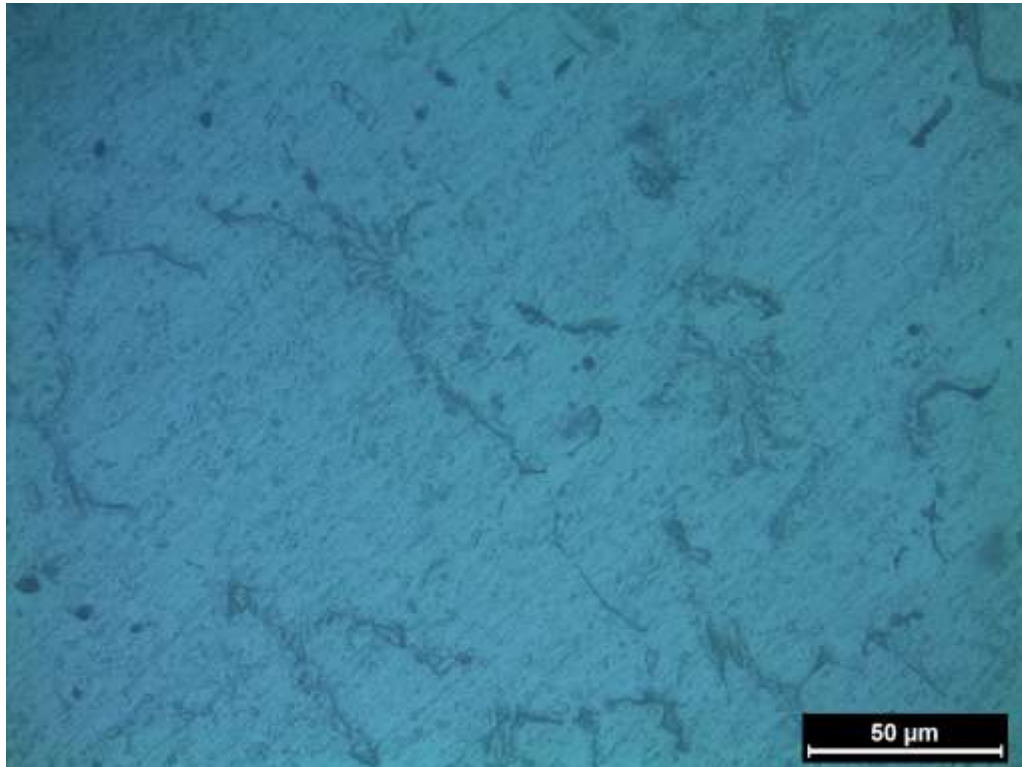
Εικόνα 3.36 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



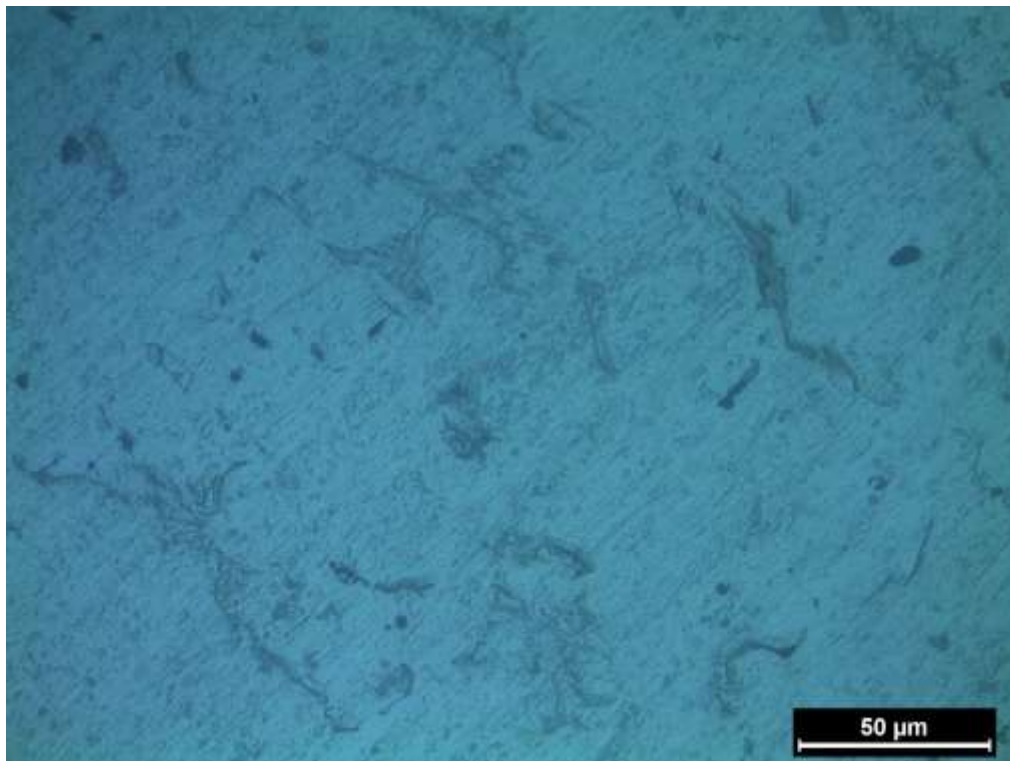
Εικόνα 3.37 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου ΑΙ με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



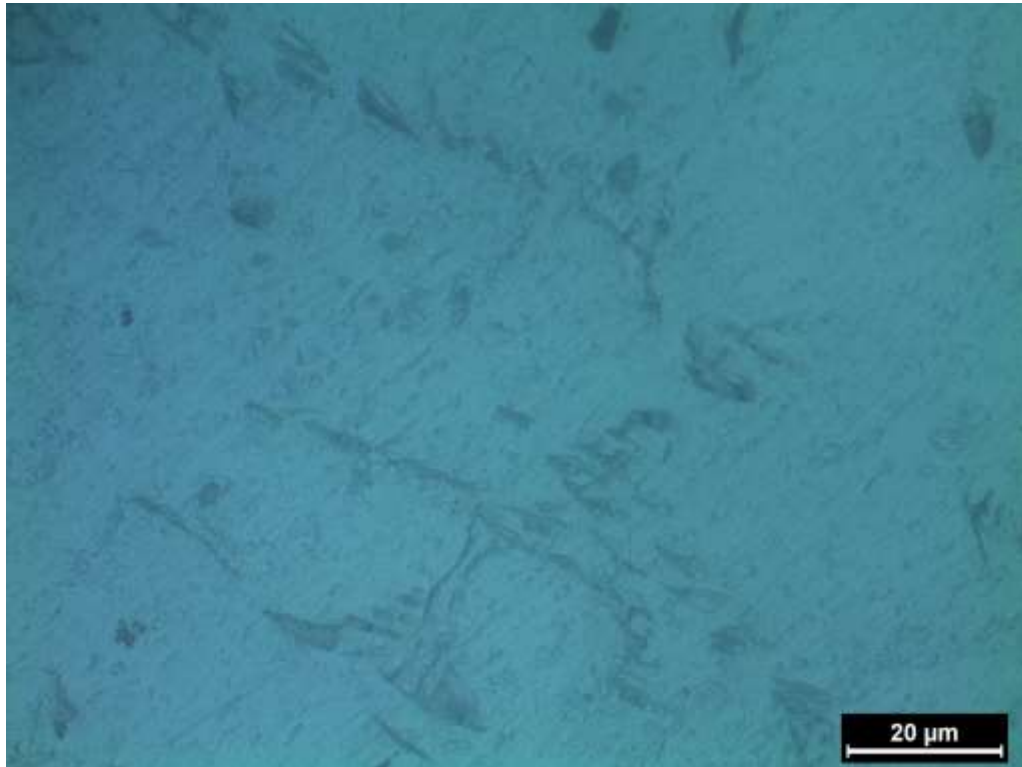
Εικόνα 3.38 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου ΑΙ με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



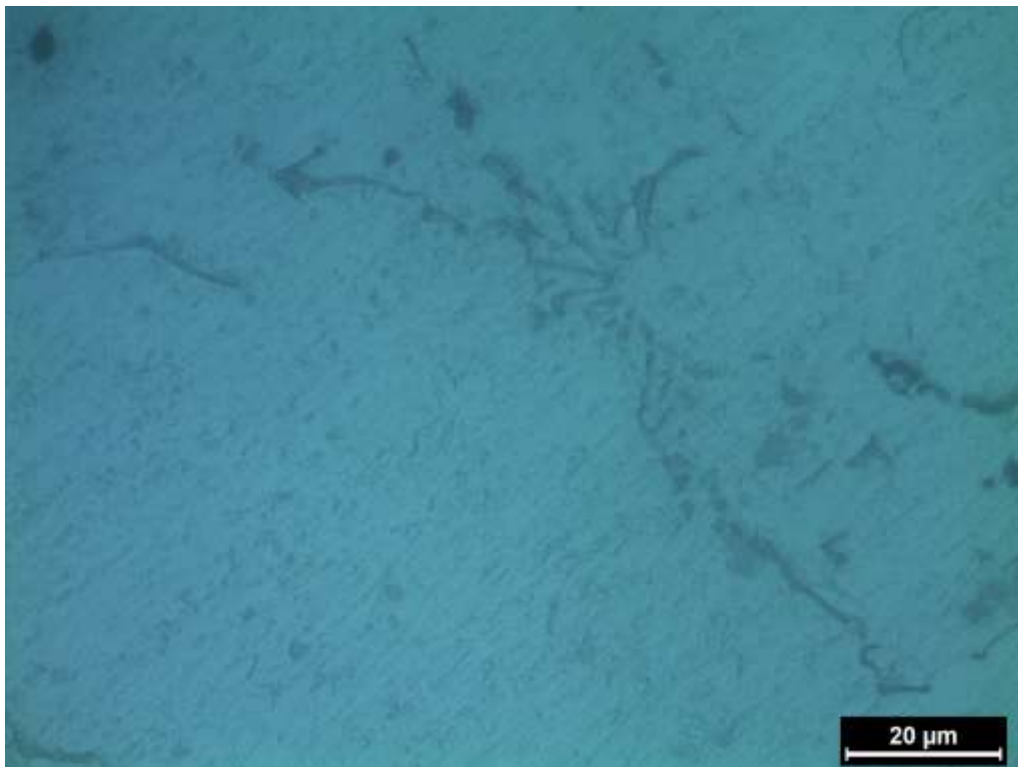
Εικόνα 3.39 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου ΑΙ με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



Εικόνα 3.40 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου ΑΙ με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)

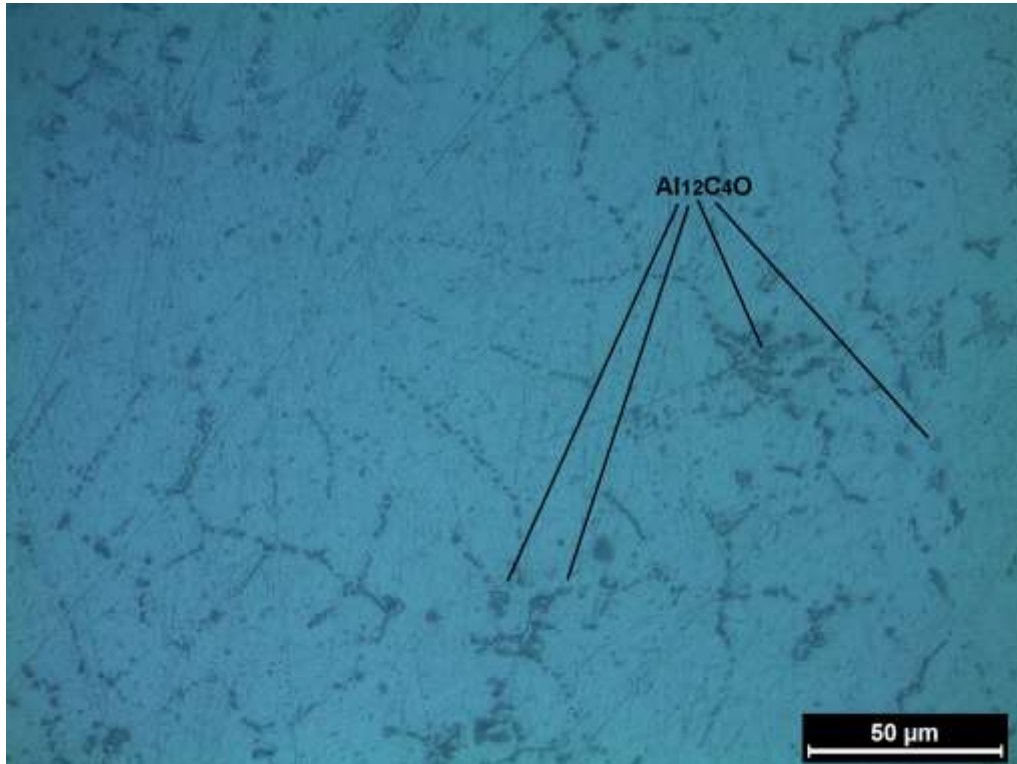


Εικόνα 3.41 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



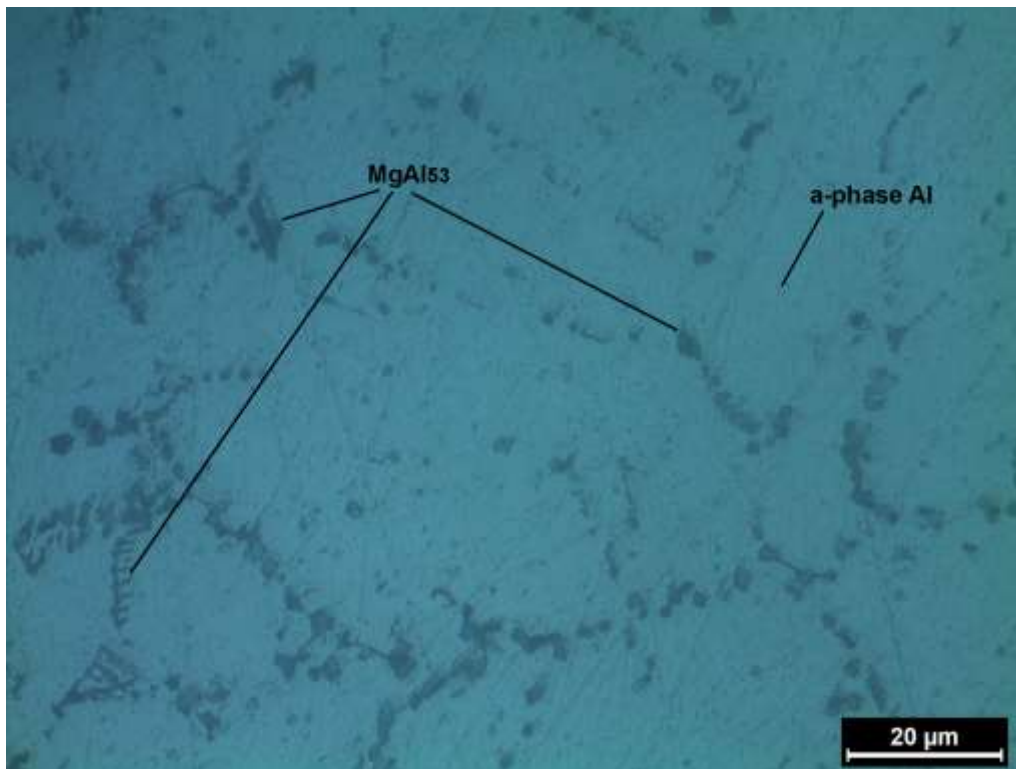
Εικόνα 3.42 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)

- Αλουμίνιο 96.66% με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs

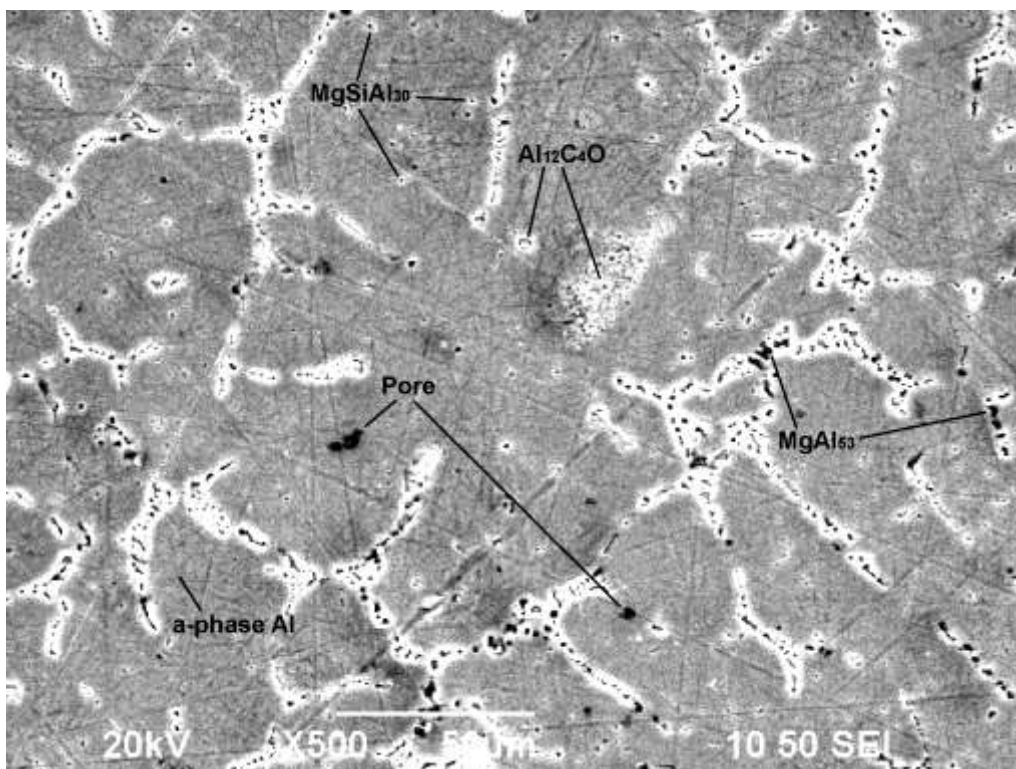


Εικόνα 3.43 Αποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)

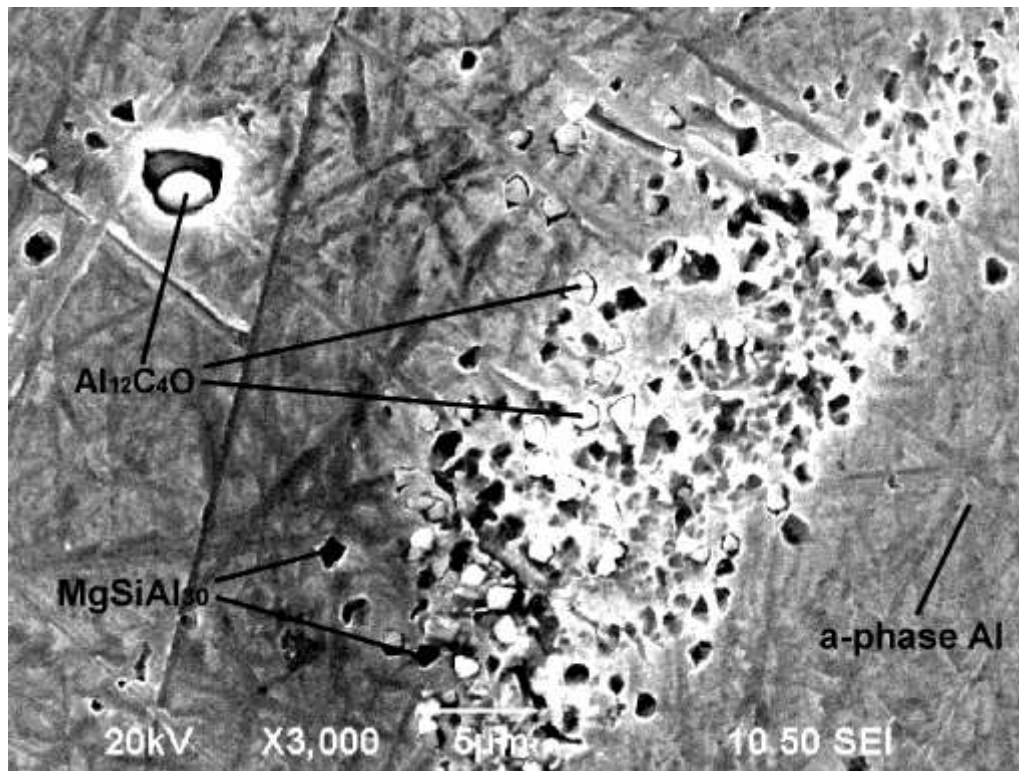
Η προσθήκη 0,20% w.t. GNPs δεν επηρεάζει το εμβαδό των δενδριτικών τμημάτων όμως δημιουργεί μια σημαντική αύξηση στο μέσο μήκος των διαδενδριτικών περιοχών της τάξεως του 19%. Οι βελονοειδείς δομές των διαδενδριτικών περιοχών έχουν μειωθεί σημαντικά όσον αφορά το μήκος τους, έχοντας πάρει πλέον τη μορφή συνεχών κουκίδων και λεπτών γραμμικών τμημάτων. Όπως και στην προσθήκη των 0,10% w.t. GNPs, τα μαύρα αιχμηρά στίγματα που δημιουργούνται είναι περιοχές εγκλεισμάτων GNPs, οι οποίες πάλι δεν φαίνεται να λειτουργούν σαν πυρήνες ανάπτυξης δενδριτών. Σε αυτή την προσθήκη επίσης φαίνεται να σχηματίζονται και κάποιοι κρύσταλλοι $Al_{12}C_4O$ συσσωρευμένοι σε άκρα διαδενδριτικών περιοχών, ενώ σχηματίζονται και κάποιες καθιζήσεις φάσης $MgSiAl_{30}$. Η διαδενδριτικές περιοχές είναι κατακρμνήσεις φάσης $MgAl_{53}$.



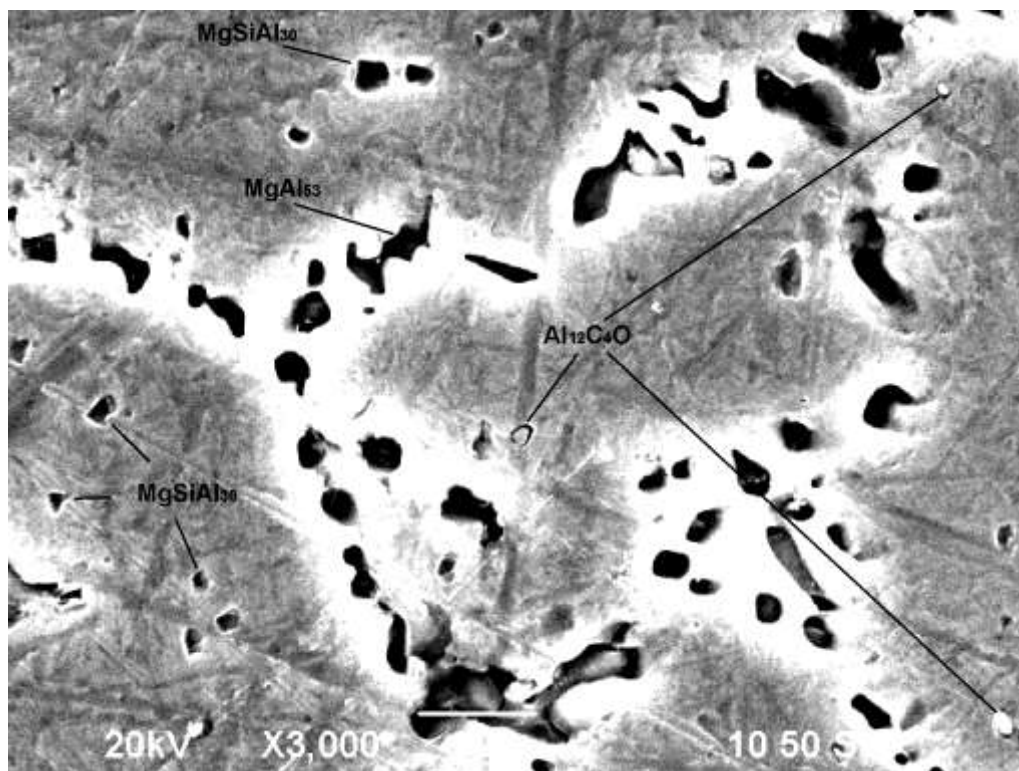
Εικόνα 3.44 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



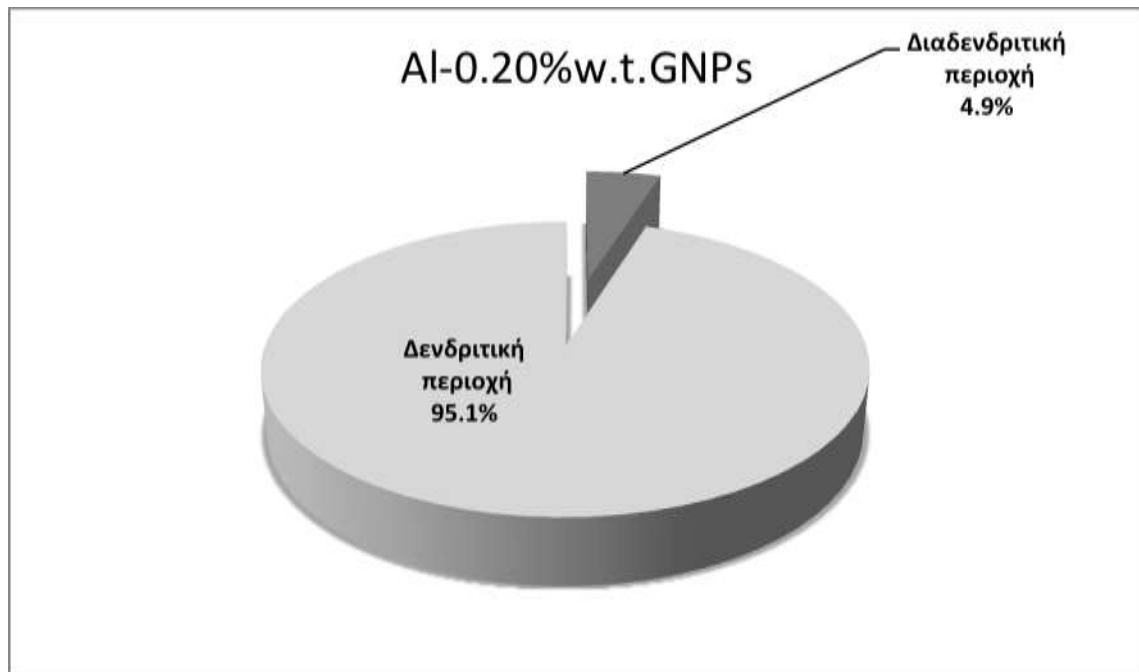
Εικόνα 3.45 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)



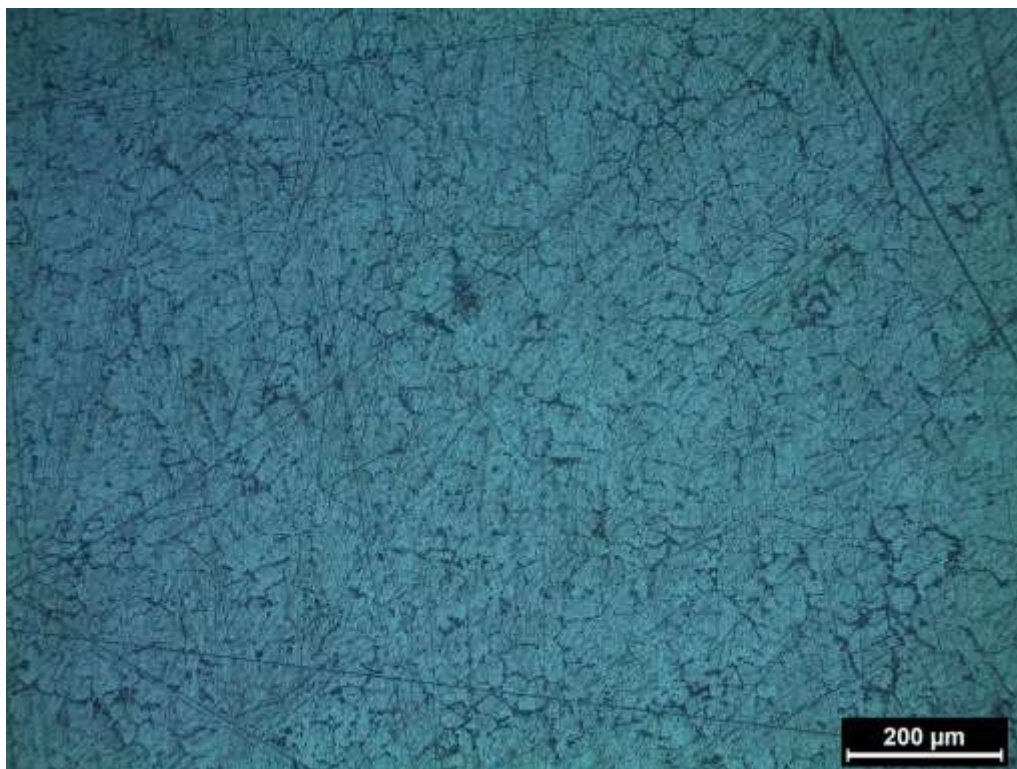
Εικόνα 3.46 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)



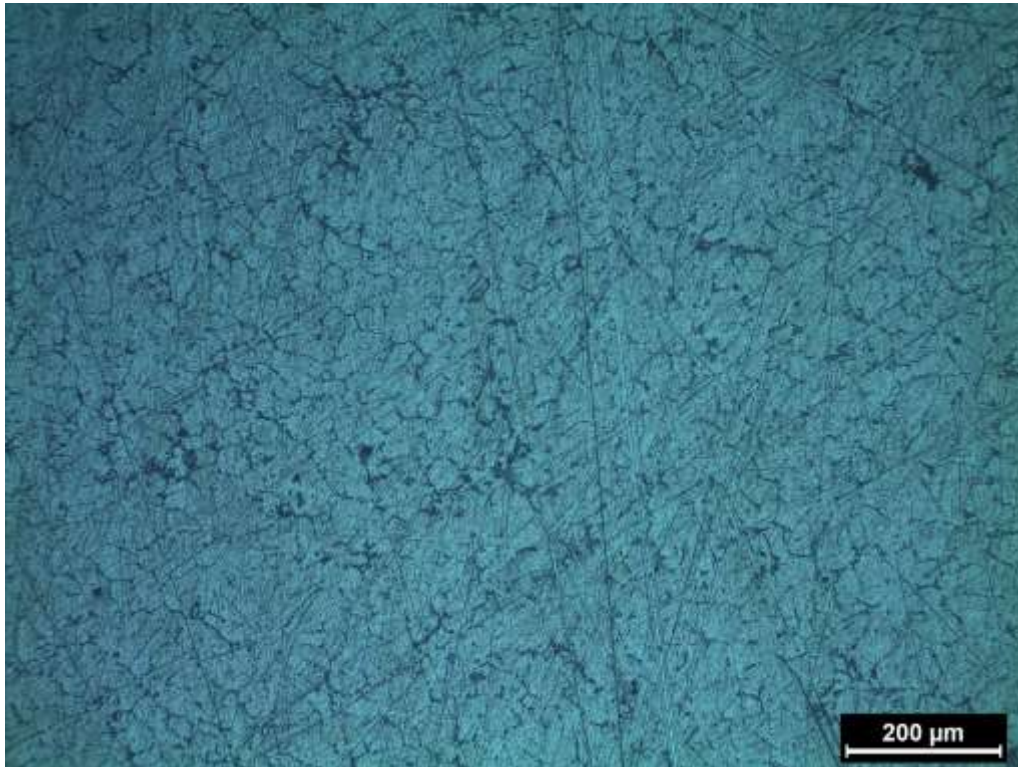
Εικόνα 3.47 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)



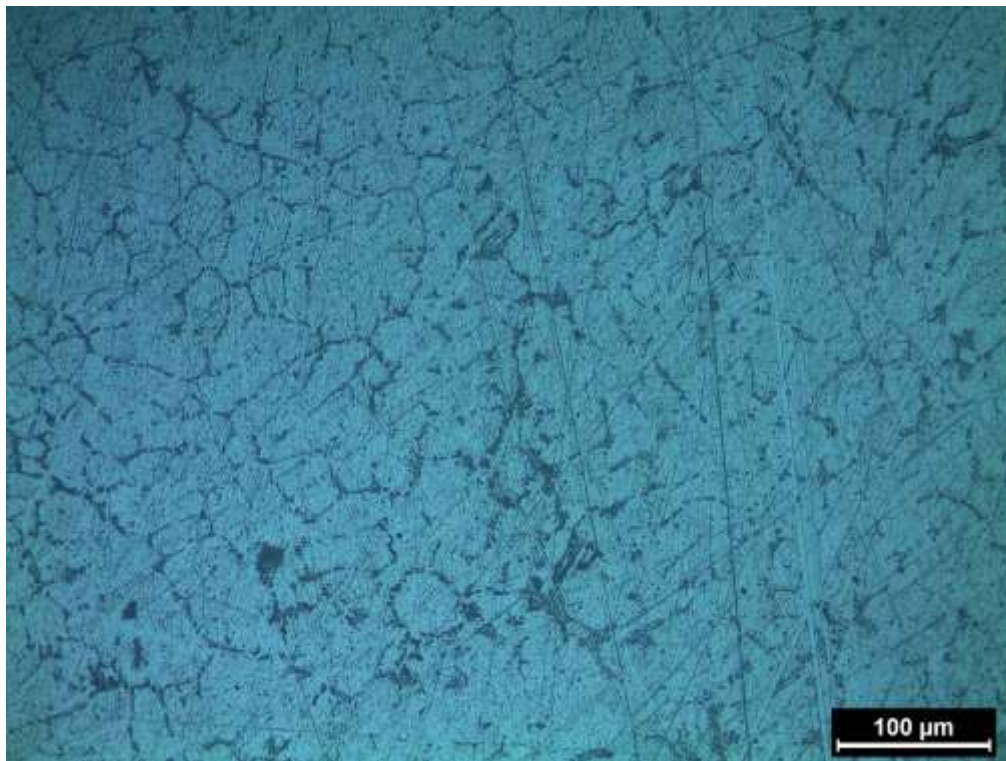
Σχήμα 3.3 Ποσοστιαία απεικόνιση δενδριτικών-διαδενδριτικών περιοχών σε δοκίμιο Al-0.20% w.t. GNPs



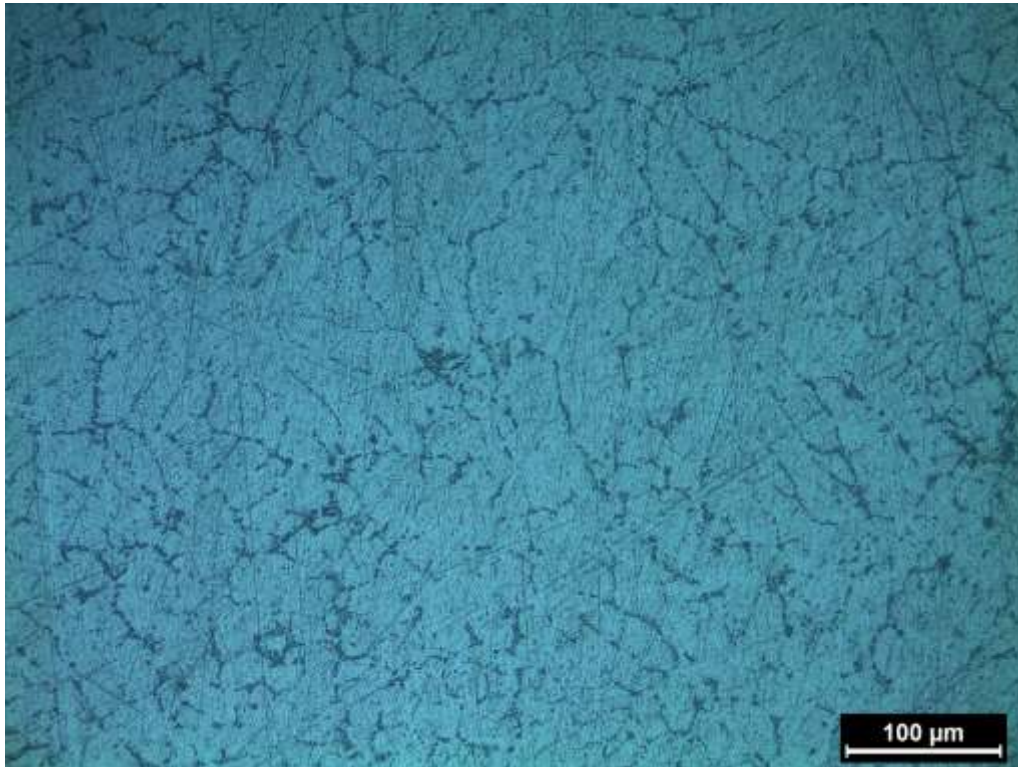
Εικόνα 3.48 Άποψη μικροδομής του δοκίμιου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)



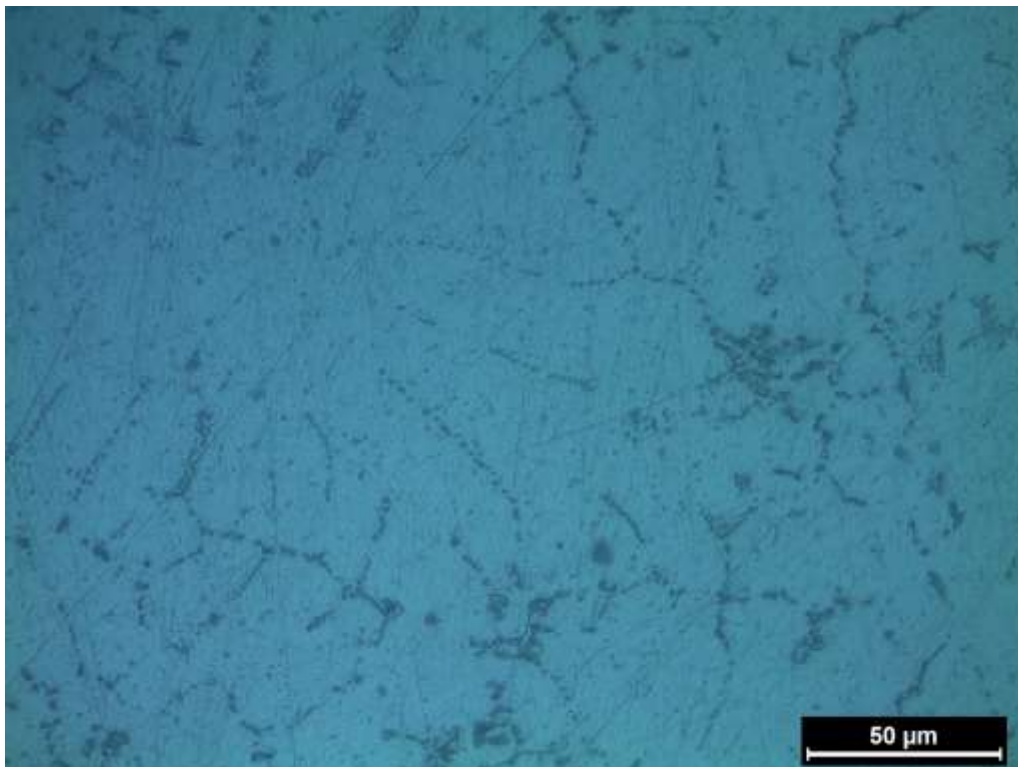
Εικόνα 3.49 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου ΑΙ με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x10)



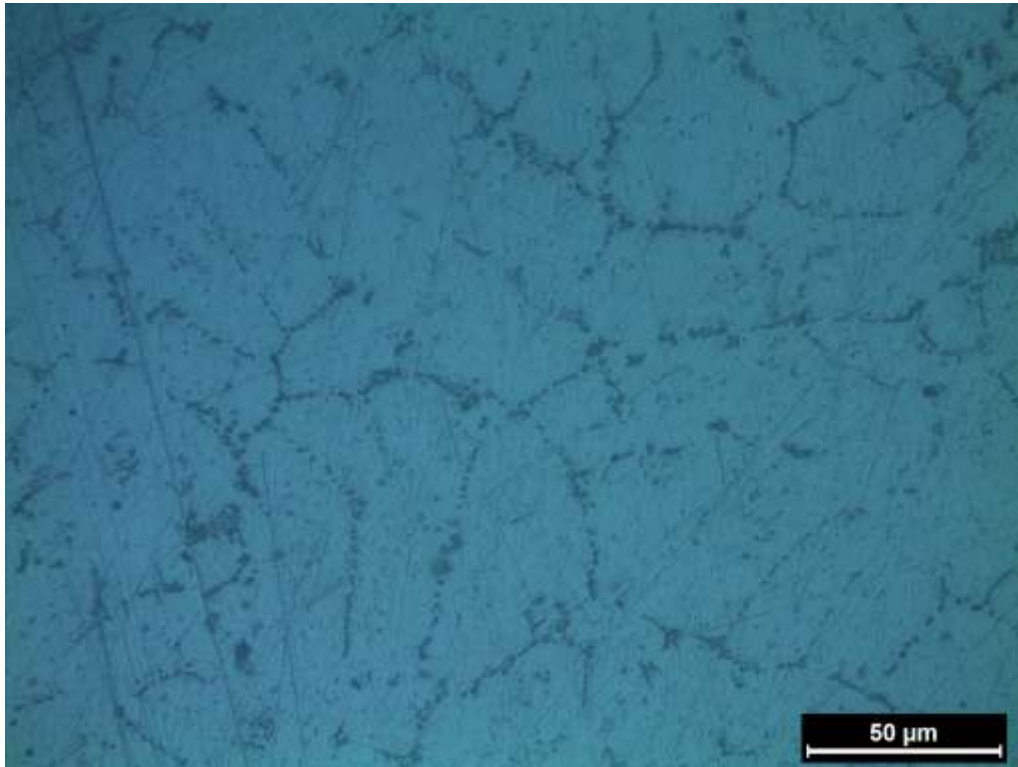
Εικόνα 3.50 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου ΑΙ με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



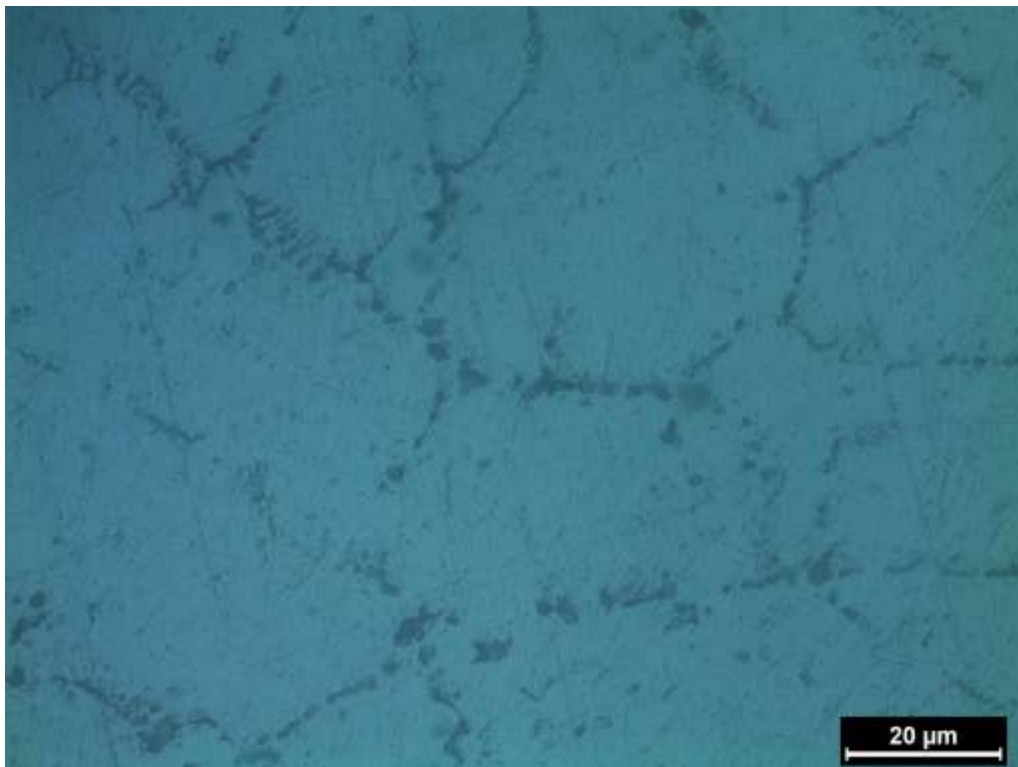
Εικόνα 3.51 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x20)



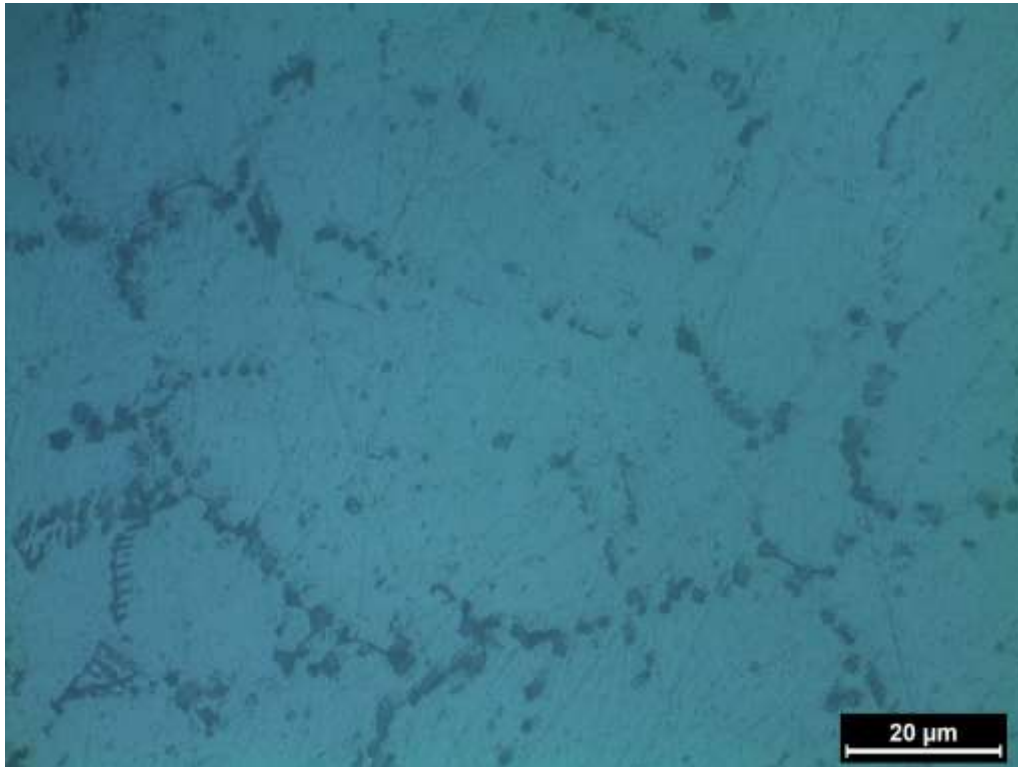
Εικόνα 3.52 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



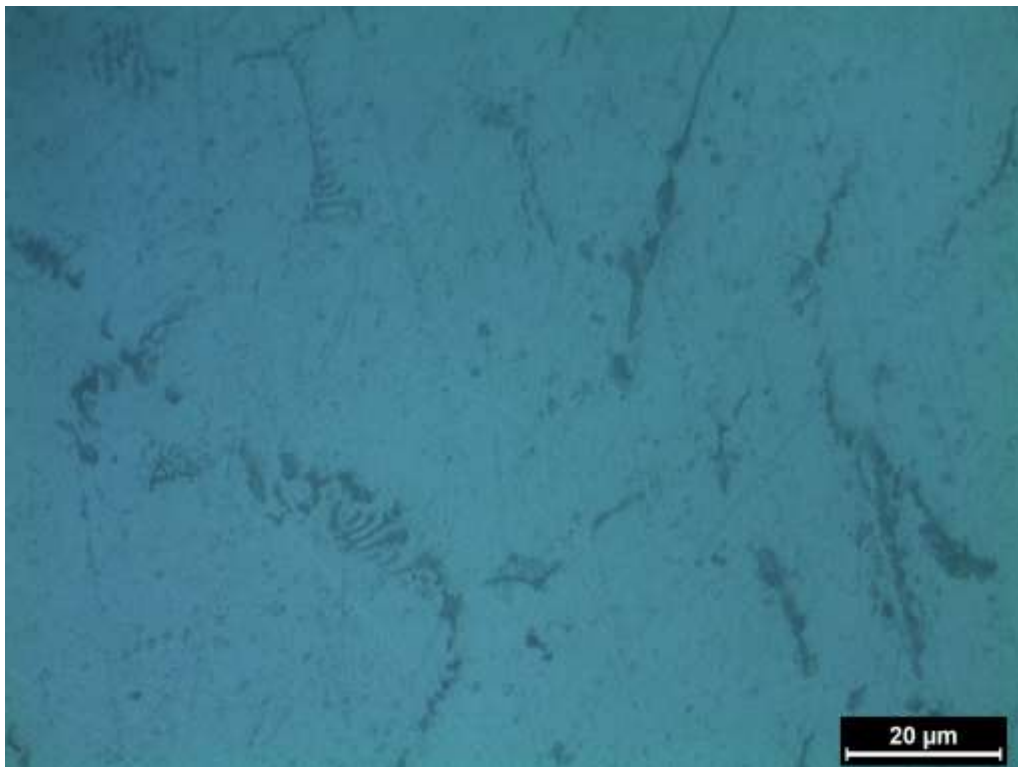
Εικόνα 3.53 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x50)



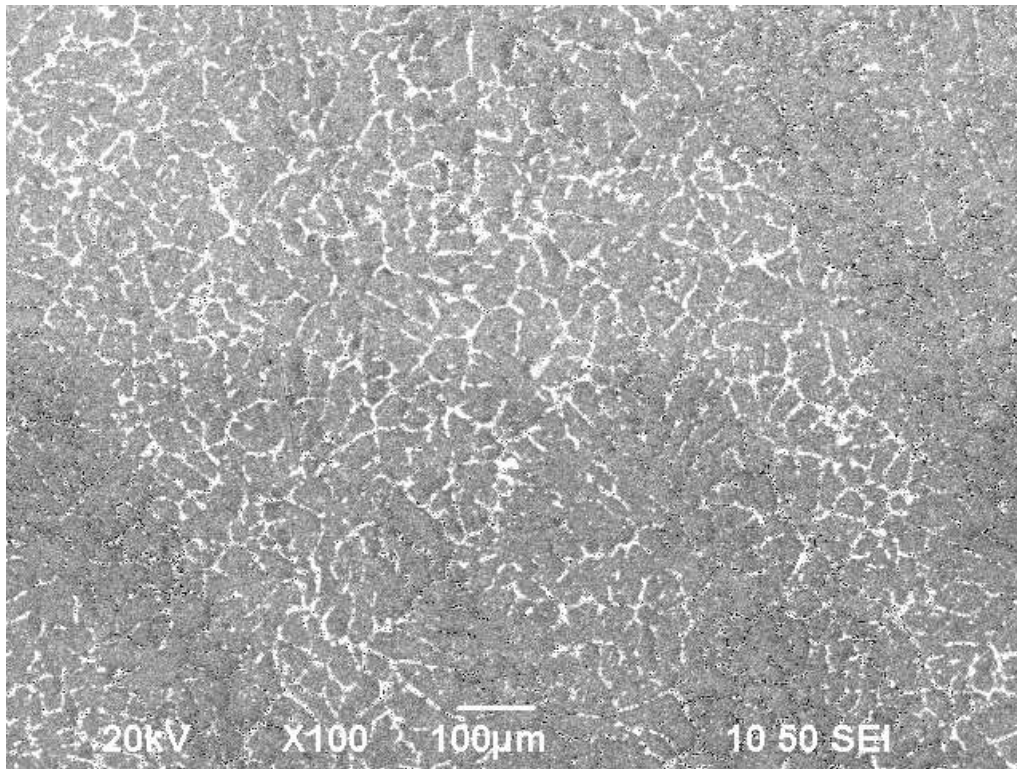
Εικόνα 3.54 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



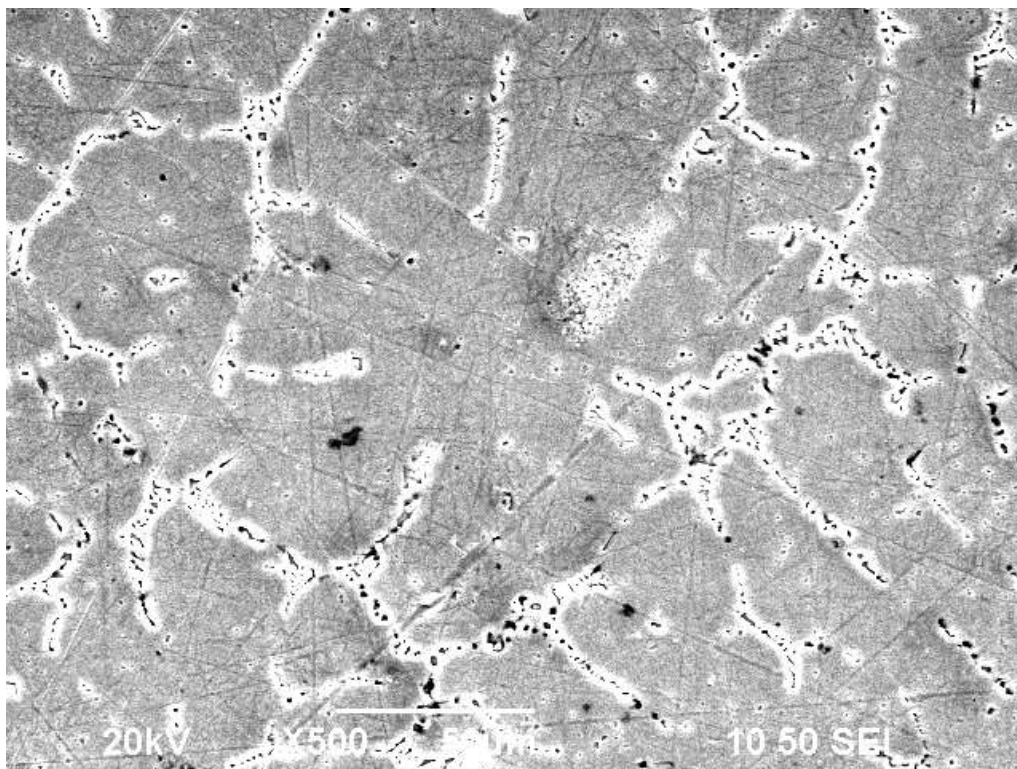
Εικόνα 3.55 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



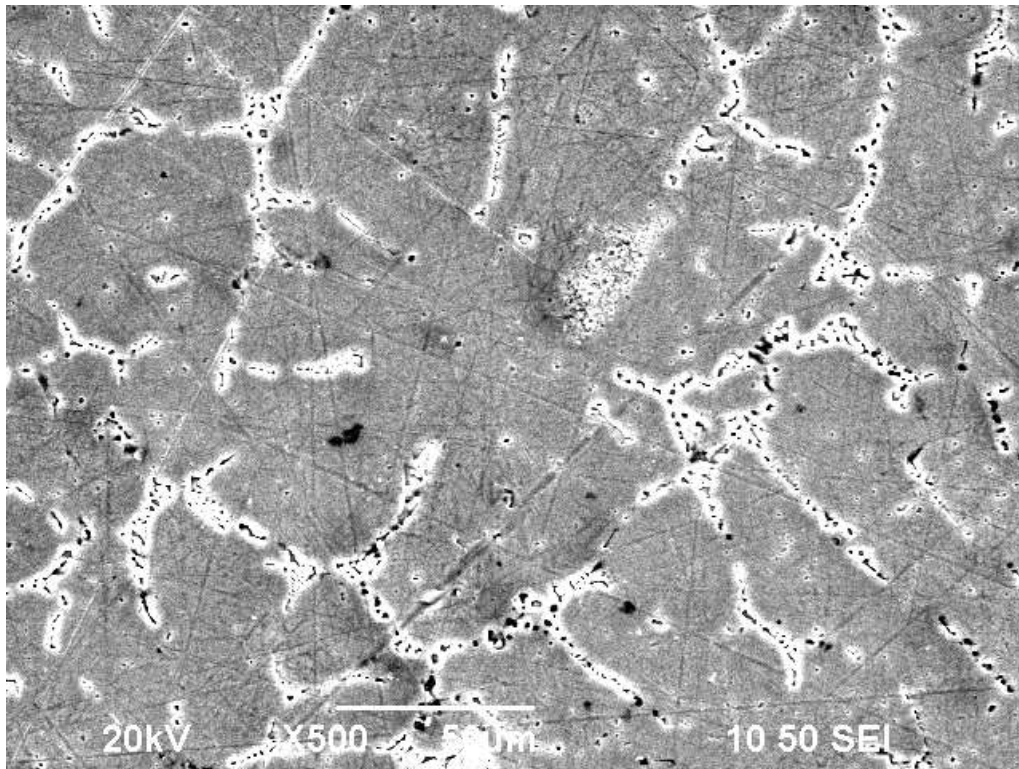
Εικόνα 3.56 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από οπτικό μικροσκόπιο (φακός x100)



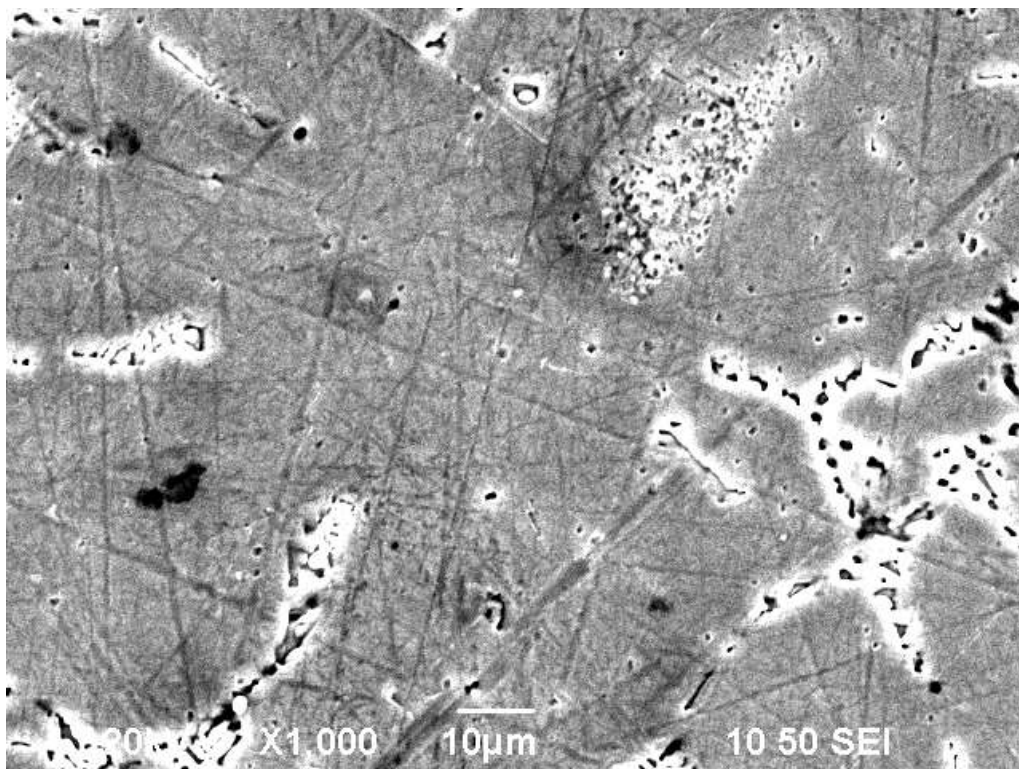
Εικόνα 3.57 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x100)



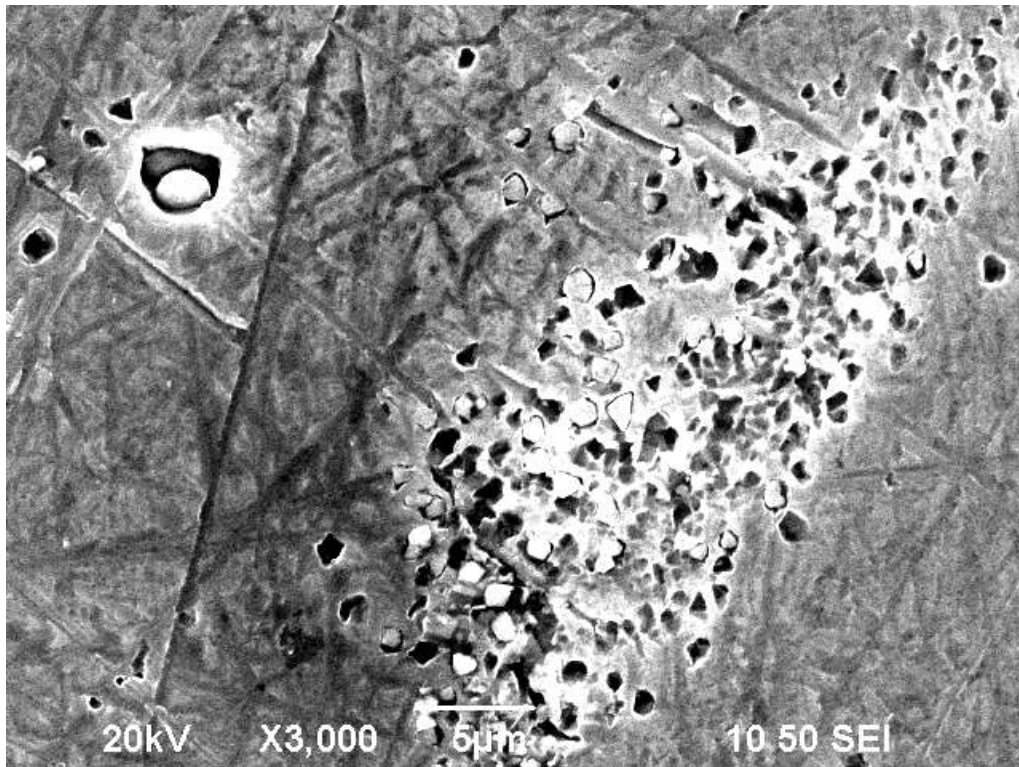
Εικόνα 3.58 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)



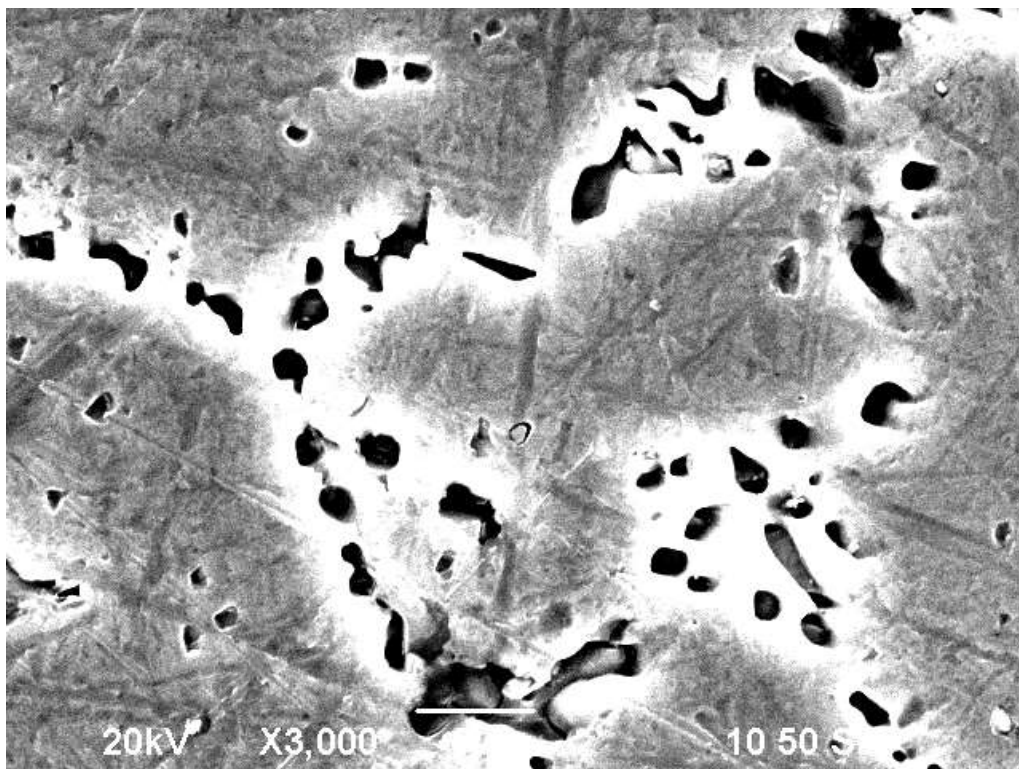
Εικόνα 3.59 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNP's από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x500)



Εικόνα 3.60 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNP's από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x1000)



Εικόνα 3.61 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)



Εικόνα 3.62 Άποψη μικροδομής του δοκιμίου Al με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, φακός x3000)

3.3 Σκληρομέτρηση

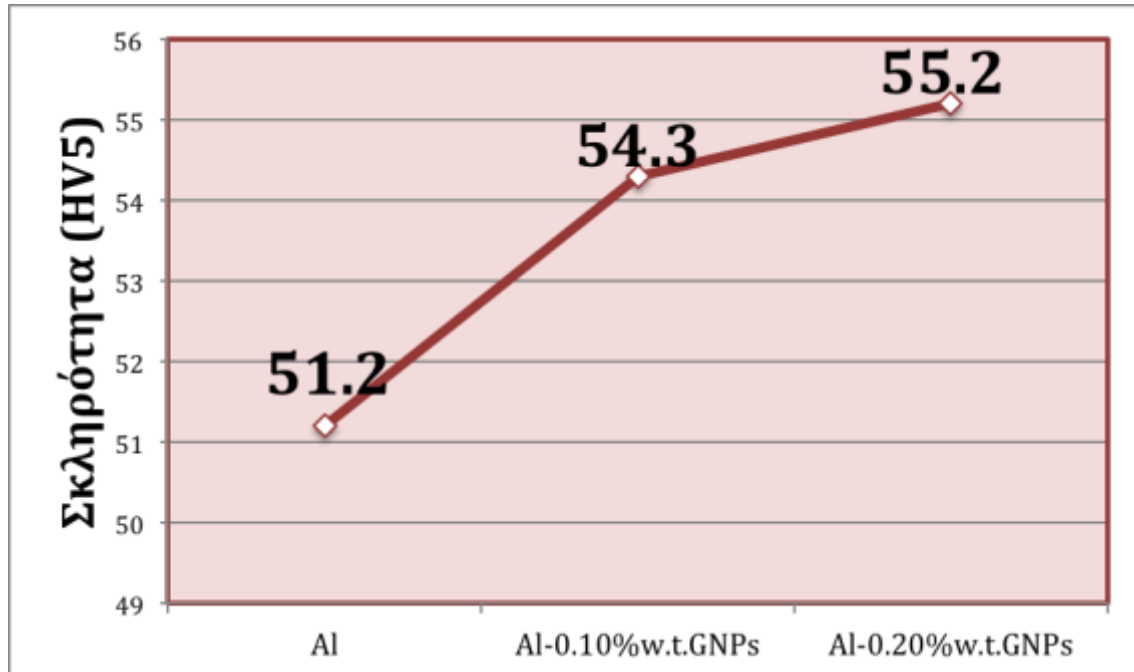
Για τον υπολογισμό της σκληρότητας του κάθε δοκιμίου πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια σκληρομέτρηση κατά Vickers. Με βάρος διείδυσης στα 5kP, και χρόνο διείδυσης 15 δευτερόλεπτα, πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις σε τρία διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια του κάθε δοκιμίου, μετρήθηκε η μέση διάμετρος του αποτυπώματος του διείδυτή, και από τυποποιημένο πρότυπο πίνακα υπολογίστηκε η σκληρότητα κατά Vickers για το κάθε υλικό. Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης κατά Vickers συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά vickers

Υλικό	Μέτρηση	Διάμετροι		Μέση Διάμετρος	Σκληρότητα	Μέση Σκληρότητα
		d1	d2			
Al	1	0.435	0.432	0.434	49.2	51.2
	2	0.424	0.421	0.423	51.8	
	3	0.424	0.415	0.42	52.6	
0.10% w.t. GNPs	1	0.424	0.413	0.419	52.8	54.3
	2	0.408	0.415	0.412	54.6	
	3	0.412	0.405	0.409	55.4	
0.20% w.t. GNPs	1	0.414	0.408	0.411	54.9	55.2
	2	0.411	0.413	0.412	54.6	
	3	0.412	0.402	0.407	56	

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων σχηματίζουν τη μορφή του παρακάτω γραφήματος, όπου δείχνει ότι η προσθήκη των νανοδομών γραφενίου στο αλουμίνιο, προκαλεί αύξηση στη σκληρότητα του υλικού. Συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα 0.10%

w.t. GNPs προκαλεί αύξηση της σκληρότητας κατά 6%, ενώ η περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs, προκαλεί αύξηση κατά 8%.



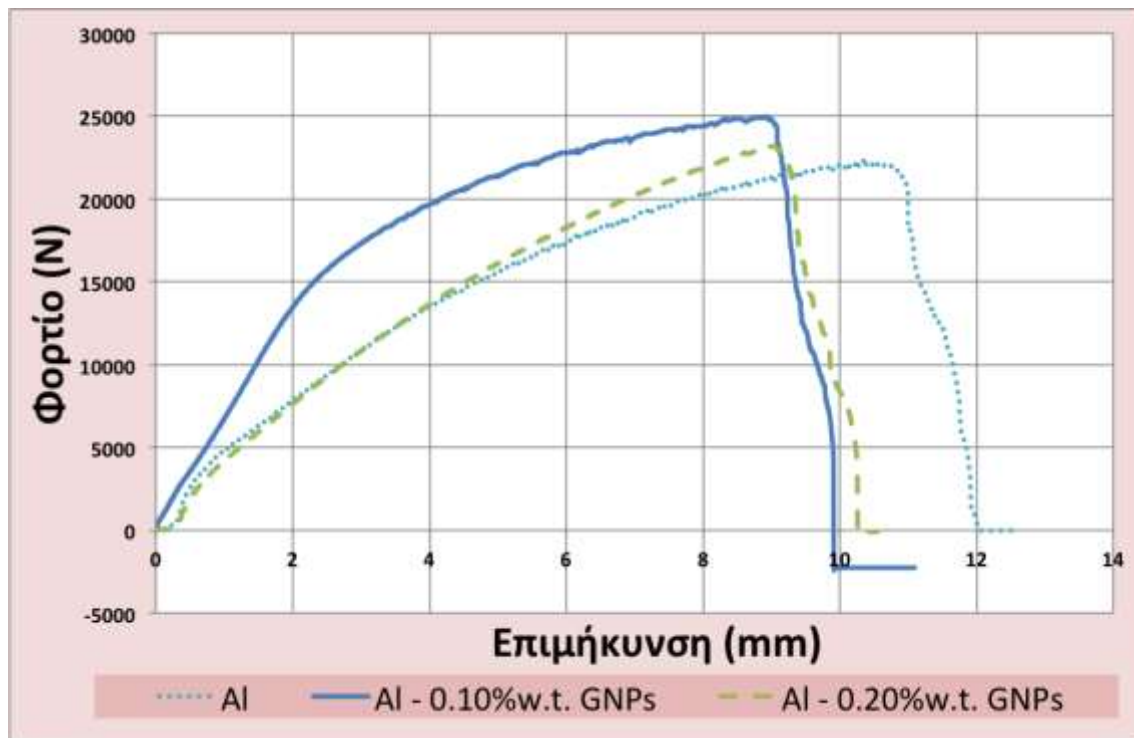
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα μέσης σκληρότητας κατά Vickers των εξετασθέντων δοκιμίων

3.4 Δοκιμές εφελκυσμού



Εικόνα 3.63 Προοδευτικές απόψεις δοκιμής εφελκυσμού σε δοκίμιο αλουμινίου καθαρότητας 96,66%

Για τη δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια απο κάθε υλικό. Αφού τα δοκίμια κόπηκαν σε διαστάσεις $100\text{mm} \times 26.5\text{mm} \times 5\text{mm}$, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές στην πρέσσα INSTRON 4482 του εργαστηρίου, δυναμικότητας 100 kN και με τη βοήθεια συνδεδεμένου ηλεκτρονικού υπολογιστή πραγματοποιήθηκε η αυτόματη καταγραφή των αποτελεσμάτων. Οι περιοχές συγκράτησης στις δαγκάνες ήταν μήκους 25 mm και η περιοχή ελέγχου είχε μήκος 50 mm. Λόγω πολύ καλής επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστεί ένα αντιπροσωπευτικό δοκίμιο για κάθε υλικό. Στο παρακάτω διάγραμμα φορτίου/επιμήκυνσης παρουσιάζεται η συμπεριφορά κάθε δοκιμίου σε εφελκυσμό.



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα φορτίου/επιμήκυνσης για κάθε δοκίμιο

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι η προσθήκη των νανοδομών γραφενίου σε ποσοστό 0.10% w.t. προκαλεί μια σημαντική αύξηση στο φορτίο θραύσης, που συνοδεύεται όμως από σημαντική μείωση της επιμήκυνσης θραύσης. Όσον αφορά την περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs, προκαλεί μία μικρότερη αύξηση του φορτίου θραύσης όμως με μία εξίσου σημαντική μείωση της επιμήκυνσης θραύσης. Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη νανοδομών γραφενίου

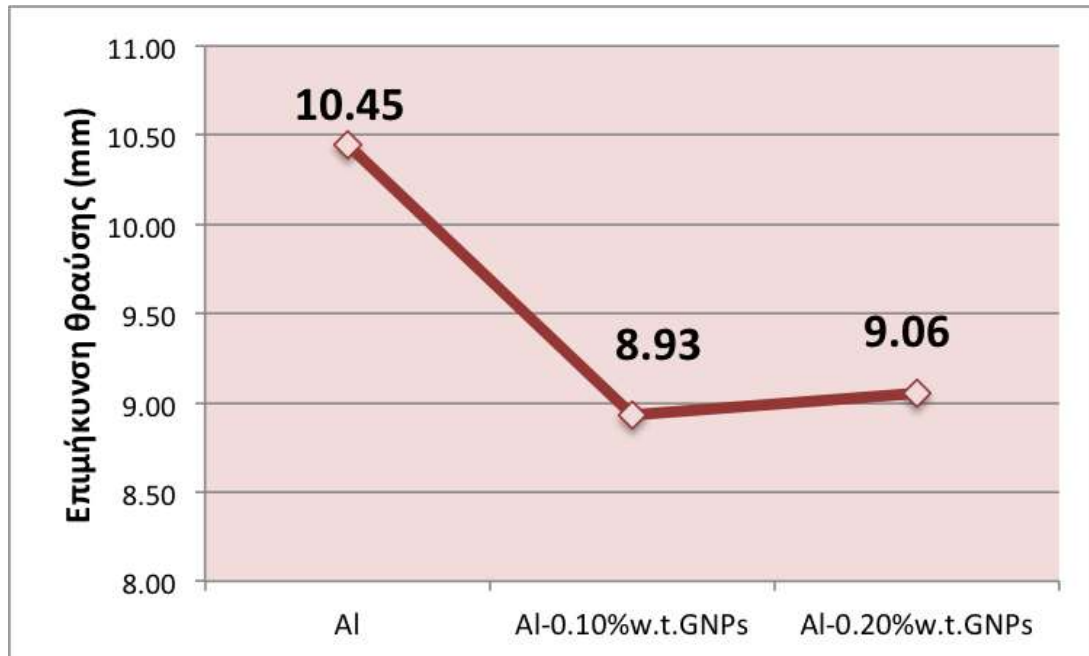
ενισχύει το υλικό σε αντοχή σε εφελκυσμό, ιδίως στην προσθήκη 0.10% w.t., ταυτόχρονα όμως το κάνει λιγότερο ελαστικό. Από το εμβαδό κάθε καμπύλης υπολογίστηκε η ενέργεια που απορροφήθηκε από κάθε δοκίμιο μέχρι την θραύση του (Energy at break). Επίσης υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο το φορτίο θραύσης (Ultimate Tensile Strength) και η επιμήκυνση θραύσης (Extension at break). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι ακριβείς τιμές, από τις οποίες προέκυψαν τα παραπάνω γενικά συμπεράσματα.

Πίνακας 3.3 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

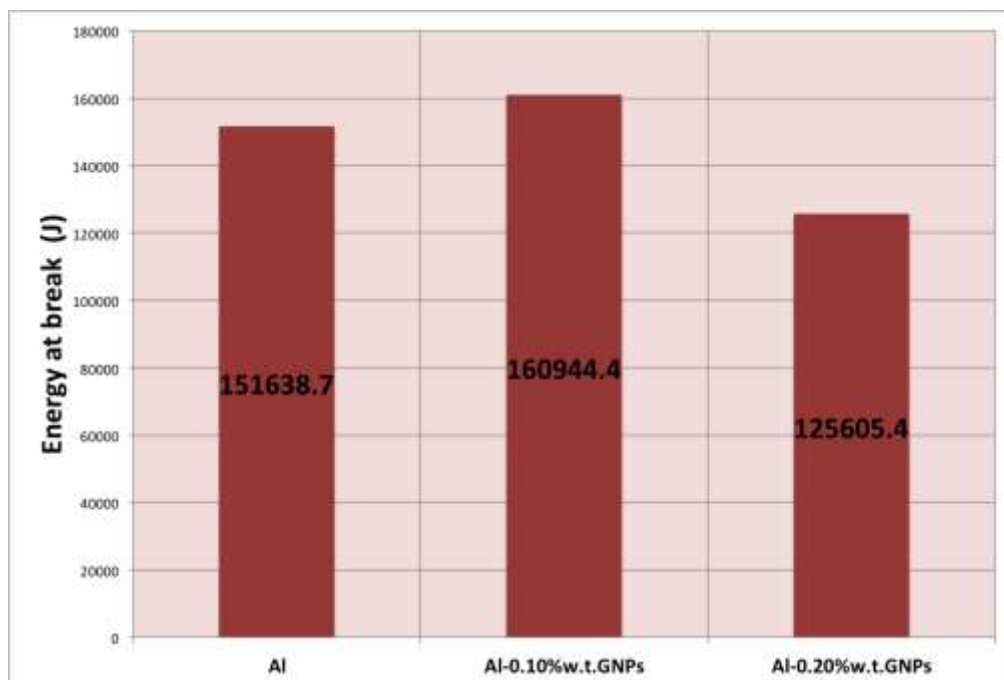
	Φορτίο θραύσης (Ultimate Tensile Strength) (N)	Επιμήκυνση θραύσης (Extension at break) (mm)	Ενέργεια θραύσης (Energy at break) (N)
Al	22201.05	10.44	151638.7
Al-0.10%w.t. GNPs	24952.7	8.93	160944.4
Al-0.20%w.t. GNPs	23167.48	9.05	125605.4



Σχήμα 3.6 Φορτίο θραύσης εφελκυσμού για κάθε υλικό



Σχήμα 3.7 Επιμήκυνση θραύσης εφελκυσμού για κάθε υλικό



Σχήμα 3.8 Ενέργεια θραύσης εφελκυσμού κάθε υλικού

Η περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNP's φαίνεται να αυξάνει το φορτίο θραύσης (UTS) κατά 12%, να μειώνει την επιμήκυνση θραύσης κατά 14% και να αυξάνει την ενέργεια θραύσης κατά 6%. Στην περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNP's προκαλείται μια μικρή αύξηση του φορτίου θραύσης, της τάξεως του 4%, ενώ μειώνονται η επιμήκυνση θραύσης κατά 13% και η ενέργεια θραύσης κατά 17%. Τα παραπάνω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.4 Ποσοστιαίες μεταβολές τιμών εφελκυσμού

	μεταβολή φορτίου θραύσης (%)	μεταβολή επιμήκυνσης θραύσης (%)	μεταβολή ενέργειας εφελκυσμού (%)
Al-0.10%w.t. GNPs	+12.4	-14.5	+6.1
Al-0.20%w.t. GNPs	+4.4	-13.3	-17.2

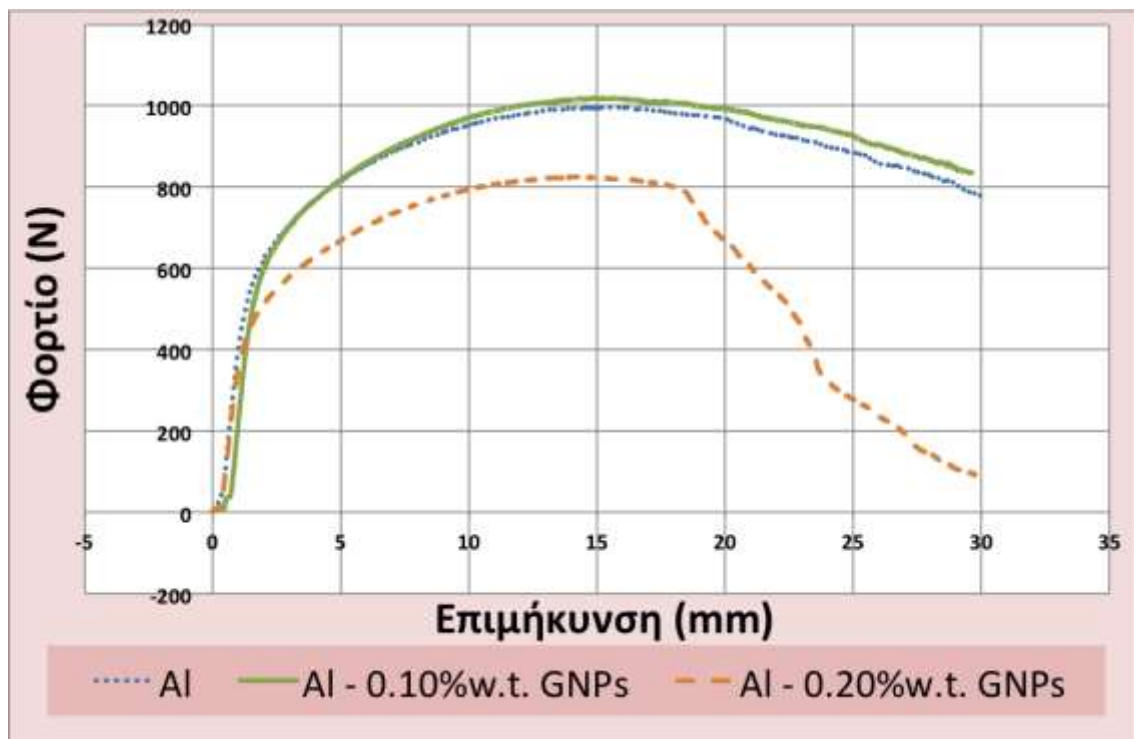
3.5 Δοκιμές κάμψης



Εικόνα 3.64 Προοδευτικές απόψεις δοκιμής κάμψης 3-σημείων σε δοκίμιο αλουμινίου καθαρότητας 96,66%

Αφού κόπηκαν σε διαστάσεις 100mm × 12mm × 5mm, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην πρέσσα για την κάμψη τριών σημείων(three point bending). Η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης της βάσης ήταν 80 mm, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα που

αφορούν τις εν λόγω δοκιμές σε σύνθετα υλικά. Συνολικά, υποβλήθηκαν σε κάμψη: 3 δοκίμια Al, 3 δοκίμια Al-0.10%w.t.GNPs και 3 δοκίμια Al-0.20%w.t.GNPs. Όπως και στον εφελκυσμό, λόγω καλής επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό δοκίμιο από κάθε υλικό. Στο παρακάτω διάγραμμα φορτίου/επιμήκυνσης παρουσιάζεται η συμπεριφορά κάθε δοκιμίου κατά τη δοκιμή της κάμψης.

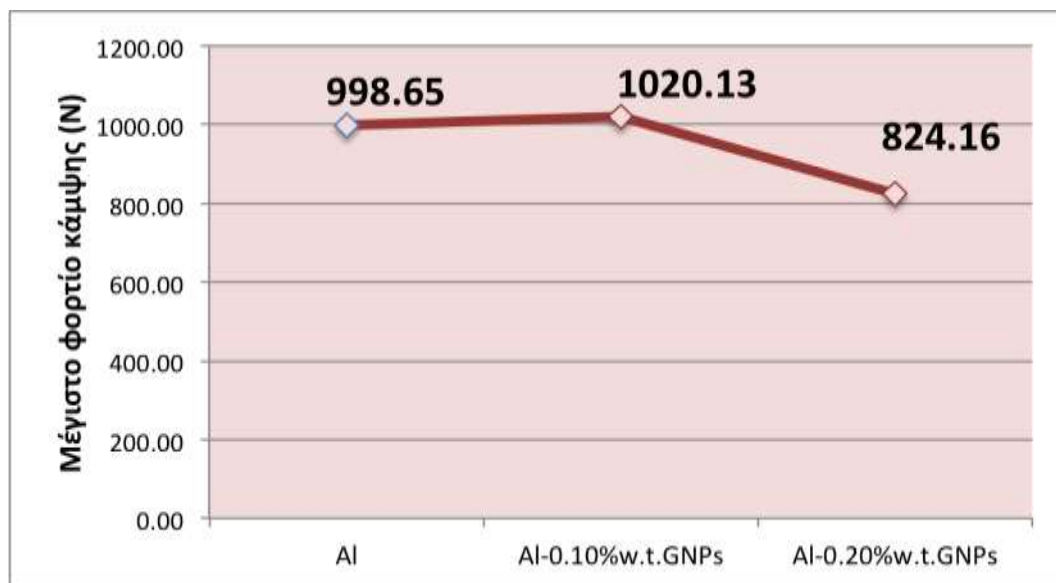


Σχήμα 3.9 Διάγραμμα κάμψης φορτίου/επιμήκυνσης

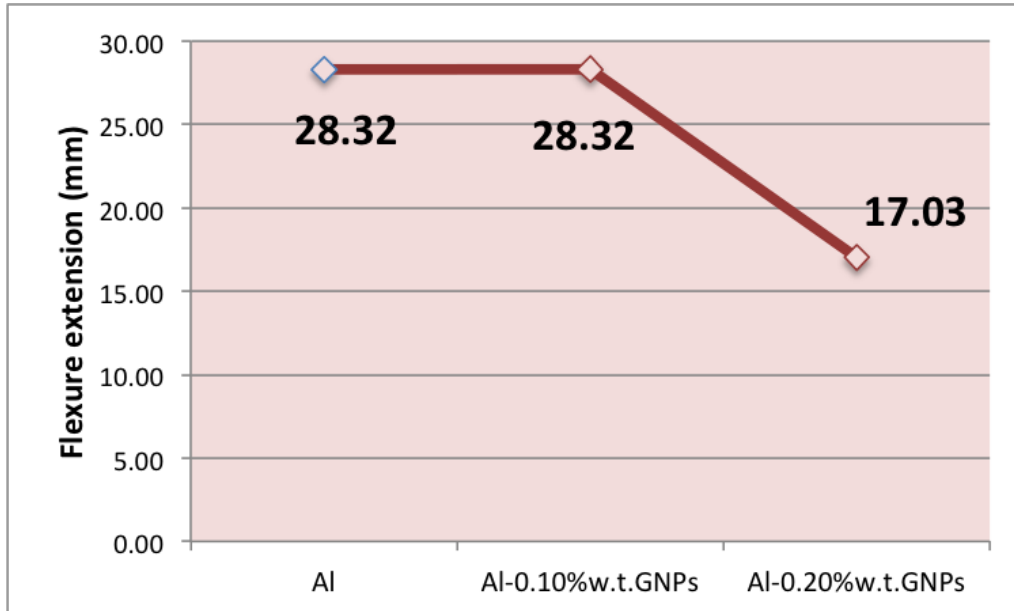
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως η περιεκτικότητα σε 0.10% w.t. GNPs δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την απορροφούμενη ενέργεια ενώ το δοκίμιο με περιεκτικότητα 0.20% w.t. GNPs δείχνει να απορροφά τη μικρότερη ενέργεια. Από το εμβαδό κάθε καμπύλης υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο η ενέργεια κάμψης (flexure energy). Υπολογίστηκε επίσης για κάθε δοκίμιο το μέγιστο φορτίο κάμψης (flexure strength) και το flexure extension. Στη συνέχεια παρατίθενται και σχολιάζονται οι τιμές των παραπάνω και τα αντίστοιχα διαγράμματα τους.

Πίνακας 3.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

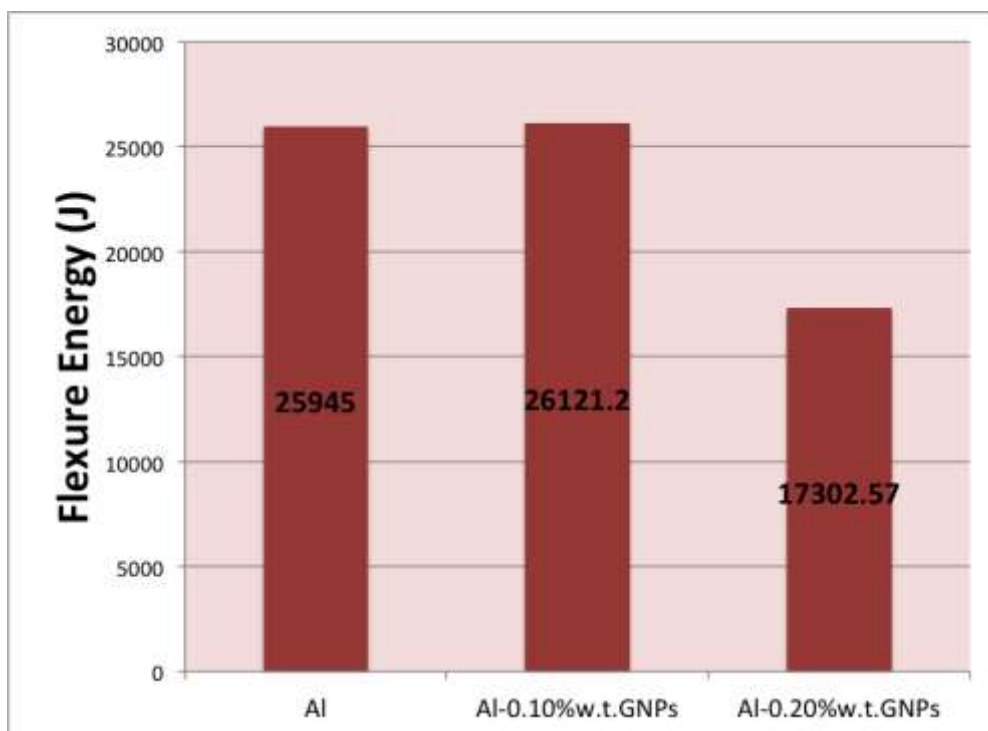
	μέγιστο φορτίο (flexure strength) (N)	flexure extension (mm)	ενέργεια κάμψης (flexure energy) (N)
Al	998.65	28.31	25945
Al-0.10%w.t. GNPs	1020.13	28.31	26121.2
Al-0.20%w.t. GNPs	824.16	17.03	17302.57



Σχήμα 3.10 Μέγιστο φορτίο κάμψης για κάθε υλικό



Σχήμα 3.11 Flexure extension για κάθε υλικό



Σχήμα 3.12 Ενέργεια κάμψης για κάθε υλικό

Η προσθήκη 0.10% w.t. GNPs φαίνεται να μην προκαλεί κάποια αξιολογίσιμη μεταβολή στο μέγιστο φορτίο, στην ενέργεια κάμψης και στο flexure extension. Στην προσθήκη 0.20% w.t. GNPs προκαλείται μείωση του μέγιστου φορτίου κατά 17,5%, μείωση της ενέργειας κάμψης κατά 33% και μείωση του flexure extension της τάξεως του 40% . Οι μεταβολές αυτές παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.6 Ποσοστιαίες μεταβολές τιμών κάμψης

	μεταβολή μέγιστου φορτίου (%)	μεταβολή flexure extension (%)	μεταβολή ενέργειας κάμψης (%)
Al			
0.10%w.t. GNPs	+2.2	0.0	+0.7
0.20%w.t. GNPs	-17.5	-39.8	-33.3

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

Παρακάτω συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία:

- Όσον αφορά το μεταλλογραφικό έλεγχο, η προσθήκη των GNPs δημιουργεί εγκλείσματα, δεν επηρεάζει το εμβαδό των διαδενδριτικών περιοχών αλλά επηρεάζει το μέσο μήκος τους. Συγκεκριμένα, η προσθήκη 0.10% w.t. GNPs μειώνει το μέσο μήκος των διαδενδριτικών περιοχών ενώ αντίθετα η προσθήκη 0.20% w.t. GNPs το αυξάνει. Η διαδενδριτική δομή του αλουμινίου μήτρας και της περιεκτικότητας 0.10% w.t. GNPs είναι κατακρημνίσεις ίδιας φάσης ενώ μόνο στην προσθήκη 0.20% w.t. GNPs φαίνεται να αλλάζει η σύσταση των διαδενδριτικών περιοχών και να σχηματίζονται κρύσταλλοι $Al_{12}C_4O$ συσσωρευμένοι σε άκρα των διαδενδριτικών περιοχών.
- Απο την σκληρομέτρηση κατά Vickers που πραγματοποιήθηκε στις επιφάνειες των δοκιμίων υπολογίστηκε ότι η σκληρότητα του υλικού είναι ανάλογη της προσθήκης των GNPs. Συγκεκριμένα, η προσθήκη των 0.10% w.t. GNPs αύξησε την σκληρότητα κατά 6% ενώ η προσθήκη των 0.20 %w.t. GNPs προκάλεσε επίσης αύξηση της τάξεως του 8%.



- Όσον αφορά τις μηχανικές δοκιμές, για περιεκτικότητα 0.10% w.t. GNPs, στον εφελκυσμό παρατηρήθηκε αύξηση του φορτίου θραύσης (UTS) κατά 12.4%, αύξηση της ενέργειας θραύσης (Energy at break) κατά 6% και μείωση της επιμήκυνσης θραύσης (extension at break) κατά 14%. Στην κάμψη το υλικό παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με το αλουμίνιο καθαρότητας 96.66%. Η προσθήκη 0.20% w.t. GNPs, εκτός από μία μικρή αύξηση του φορτίου θραύσης (UTS), της τάξης του 4.4%, που προσέδωσε στο υλικό, φαίνεται να μειώνει γενικότερα τις επιδόσεις του. Αναλυτικότερα η προσθήκη αυτή επέφερε μείωση της ενέργειας θραύσης κατά 17.2% και μείωση της επιμήκυνσης θραύσης κατά 13.3%. Στην κάμψη το υλικό παρουσίασε επίσης μείωση του μέγιστου φορτίου κατά 17.5%, μείωση της ενέργειας κάμψης κατά 33.3% και μείωση του flexure extension κατά 39.8%.
- Από το σύνολο των ελέγχων και των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προσθήκη γραφενικών νανοδομών (GNPs) σε περιεκτικότητα 0.10% w.t. βελτιώνει τις επιδόσεις του αλουμινίου, ενώ περαιτέρω αύξηση του ποσοστού αυτού φαίνεται να τις εξασθενεί.

Κεφάλαιο 5

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επετεύχθη η ενσωμάτωση νανοδομών γραφενίου σε αλουμίνιο καθαρότητας 96.66% με τη μέθοδο της ελεύθερης χύτευσης με ανάδευση. Το βέλτιστο υλικό που δημιουργήθηκε (Al-0.10%w.t.GNPs) παρουσίασε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και βελτιωμένη σκληρότητα.

Ως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, προτείνεται η μελέτη της επίδρασης του εξεταζόμενου υλικού προσθήκης (νανοδομές γραφενίου - GNPs) σε ένα ευρύτερο φάσμα μηχανικών δοκιμών (π.χ. κόπωση και θλίψη), καθώς και σε ταχύτητες επιβολής φορτίου τόσο στατικές, όσο και δυναμικές. Η κατεργασιμότητα και διαμορφωσιμότητα του παραχθέντος σύνθετου υλικού, που αναμένεται να διαφοροποιείται έντονα σε σχέση με το υλικό μήτρας (αλουμίνιο καθαρότητας 96.66%), αποτελεί επίσης ενδιαφέρον αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νανοδομές γραφενίου (GNPs) προτείνεται να εξεταστεί και μετά από κατεργασίες έλασης πολλαπλών πασσών και διέλασης.

Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα θα μπορούσαν να εξαχθούν από τη μελέτη επίδρασης της ενσωμάτωσης και άλλων γραφιτικών μικρό/νάνο-δομών, όπως μικροκρυσταλλίνη γραφίτη, σε αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας.



Βιβλιογραφία

- [1] Αθανάσιος Γ. Μάμαλης, 1996, *Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών: Μεταλλικά Υλικά*, Φοίβος, Αθήνα.
- [2] H.-G. Schwarz, 2004, *Encyclopedia of Energy, Chapter: Aluminum Production and Energy*, Elsevier, pp. 81-95.
- [3] Fathi Habashi, 2005, ‘A short history of hydrometallurgy’, *Hydrometallurgy*, vol 79, pp. 15-22.
- [4] H. Kvande, 2011, *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, Elsevier, pp. 46-69.
- [5] ‘Aluminium scrap’, viewed 25 January 2016, <<http://recycling.world-aluminium.org/resources/materials.html>>
- [6] ‘World Metal Production Surges’, viewed 25 January 2016, <<http://www.worldwatch.org/node/6246?emc=el&m=291792&l=4&v=9f21df1101>>
- [7] ASM International Handbook Committee, 1990, *Volume 2-Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM international, pp. 164-177.
- [8] Χρυσουλάκης Δ. Γιάννης-Παντελής Ι. Δημήτρης, 2008, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [9] ‘NASA-427: A New Aluminum Alloy’, viewed 01 February 2016, <<http://technology.nasa.gov/patent/MFS-TOPS-8>>



- [10] N.R. Mandal, 2001, *Aluminum Welding*, Woodhead Publishing, pp. 14-15.
- [11] John Gilbert Kaufman, 1999, *Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures*, ASM International, pp. 107-108.
- [12] ‘8xxx Series Alloys’, viewed 20 January 2016,
<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417087>>
- [13] ‘7075 Alloy’, viewed 22 January 2016,
<http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/01_applications.asp?AlloyID=28>
- [14] E.Y. Andrei, G. Li and X. Du , 2012, ‘Electronic properties of graphene: a perspective from scanning tunneling microscopy and magnetotransport’, vol 75.
- [15] Σ. Παπαζογλου, 2013, *Διεργασίες laser στο γραφένιο, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ*.
- [16] A.K. Geim, K.S. Novoselov, 2007, ‘The Rise of Graphene’ *Natural Material*, vol. 6, pp. 183–191.
- [17] C. Lee, X.D. Wei, J.W. Kysar, J. Hone, 2008 ‘Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene’, *Science*, vol. 321, pp. 385–388.
- [18] K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, et al., 2008, *Solid State Communications*, vol. 146 pp. 351–355.
- [19] A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, et al., 2008, ‘Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene’, *Nano Letters*, vol. 8, no 3, pp 902–907.
- [20] V. Goyal, A.A. Balandin, 2012, ‘Thermal properties of the hybrid graphene-metal nano-micro-composites: Applications in thermal interface materials’, *Applied Physics Letters*, vol. 100.
- [21] K.M.F. Shahil, A.A. Balandin, 2012, *Nano Letters*, vol. 12 pp. 861–867.

- [22] K.M.F. Shahil, A.A. Balandin, 2012, ‘Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials’, *Solid State Communications*, vol. 152, pp. 1331–1340.
- [23] S.R. Bakshi, D. Lahiri, A. Agarwal, 2010, *International Materials Reviews* , vol. 55, pp. 41–64.
- [24] Muhammad Rashad, Fusheng Pan, Aitao Tang, Muhammad Asif, 2014, *Effect of Graphene Nanoplatelets addition on mechanical properties of pure aluminum using a semi-powder method* , Elsevier, pp. 101-108.
- [25] www.strem.com/uploads/resources/.../graphene_nanoplatelets.pdf
- [26] K. Wang, Y. Wang, Z. Fan, J. Yan, T. Wei, 2011, *Material Reserach Bulletin*, vol. 46, p. 315.
- [27] L.S. Walker, V.R. Marotto, M.A. Rafiee, N. Koratkar, E.L. Corral, 2011, ‘Toughening in Graphene Ceramic Composites’, *ACS Nano*, vol. 5, p. 3182.
- [28] L. Kvetková, A. Duszová, P. Hvizdoš, J. Dusza, P. Kun, C. Balázs, 2012, *Script Material*, vol. 66 .
- [29] J. Liu, H. Yan, M.J. Reece, K. Jiang, J. Eur., 2015, ‘Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets’, *Progress in Natural Science:Materials International*, vol. 25, pp. 460-470.
- [30] E.M. Sherif, A.A. Almajid, F.H. Latif, H. Junaedi, Int. J., 2011, *Electrochemical Science*, vol. 6, p. 1085.
- [31] M. Saxena, O.P. Modi, A.H. Yegneswaran, P.K. Rohatgi, 1987, *Corrosion Science*, vol. 27, pp. 249.
- [32] T.-C. Yeh, T.-C. Huang, H.-Y. Huang, Y.-P. Huang, Y.-T. Cai, S.-T. Lin, Y. Wei, J.-M. Yeh, 2012, *Polymer Chemistry*, vol. 3.



[33] ‘Aluminum battery from Stanford offers safe alternative to conventional batteries’,
viewed 25 January 2016,
<<http://news.stanford.edu/news/2015/march/aluminum-ion-battery-033115.html>>