



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
2021
ΙΩΑΝΝΙΝΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΝΤΟΥΜΑΖΙΟΣ
ΜΕΛΕΤΗ ΦΘΩΡΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕ ΡΟΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΟΒΑΛΤΙΟΥ

ΕΣΩΦΥΛΛΟ:

1. Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση: Τεχνολογίες Προηγμένων Υλικών που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 26 Φεβ -2021 από την εξεταστική επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

ΒΑΘΜΙΑΔΑ

1. Αλέξανδρος Καράντζαλης Επιβλέπων Αναπληρωτής Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Σ.Θ.Ε. του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Επιβλέπων
2. Αγγελική Λεκάτου Καθηγήτρια του ΤΜΕΥ της Σ.Θ.Ε. του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Μέλος
3. Νεκταρία-Μαριάνθη Μπάρκουλα του ΤΜΕΥ της Σ.Θ.Ε. του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Μέλος

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."

(Υπογραφή υποψηφίου)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή δημιουργήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού προγράμματος “Τεχνολογίες Προηγμένων Υλικών” του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Θα ήθελα να αναφέρω τις θερμές μου ευχαριστίες στους Λεντζαρη Κωνσταντινο, Πούλια Ανθουλα, Σφήκα Αθανάσιο και Μπάρμπα Αλέξανδρο για την βοήθεια τους. Τέλος Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Καράντζαλη Αλέξανδρο για την υπομονή και την βοήθεια που μου παραχώρησε.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν η δημιουργία του μίγματος αλουμίνιο κοβαλτίου σε διαφορετικές ποσοτώσεις (7, 10, 15, 20) βάρους επί τοις εκατό και αποτελέσματα μετά από μηχανική διάβρωση των άνω παρασκευών. Με φθορά λόγω εκτριβής και με μηχανική διάβρωση στερεών σωματιδίων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θέμα της εργασίας είναι η μελέτη φθοράς και μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων κραμάτων αλουμινίου κοβαλτίου. Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη φθοράς σε κράματα Αλουμινίου κοβάλτιο σε ποσοστά 7,10,15 και 20%κ.β.Αυτο επιτυγχάνεται μέσω της παρασκευής δοκιμίων με τήξη τόξου υπό κενό. Τα δοκίμια στην συνέχεια μεταφερθήκαν στα εργαστήρια για πειράματα σε φθορά τριβής και σε μηχανική διάβρωση με ροή στερεών σωματιδίων σε δυο γωνίες πρόσπτωσης (60° και 90°). Τα αποτελέσματα ερμηνεύονται βάσει την απώλεια βάρους των δοκιμίων και από ηλεκτρονική μικροσκοπία Στην εργασία που παραθέτω υπάρχουν 3 Κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο υπάρχουν κάποιες γενικές πληροφορίες για τα μέταλλα και στην συνέχεια οδηγείτε στο αλουμίνιο και το κοβάλτιο ξεχωριστά καθώς και αναφορά στα πολύπλοκα μεταλλικά κράματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενείς αναφορά στην φθορά με ιστορικές αναφορές. Ακόμα αναλύεται η φθορά λόγω πρόσφυσης, η φθορά λόγω εκτριβής η φθορά λόγω κόπωσης και η μηχανική διάβρωση στερεών σωματιδίων.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο βρίσκονται όλο το πειραματικό μέρος της εργασίας, το οποίο περιλαμβάνει την ανάμειξη κόνεων, συμπίεση και την δημιουργία σταγόνων (drops). Την κοπή, την λείανση και στίλβωση των δοκιμίων. Γίνεται αναφορά στον θερμό εγκιβωτισμό. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην ηλεκτρονική Μικροσκοπία σάρωσης. Επιπλέον υπάρχουν τα πειραματικά δεδομένα από τα δοκίμια τα οποία μετείχαν στις δοκιμές φθοράς λόγω ολίσθησης και στην μηχανική διάβρωση με ροή στερεών σωματιδίων. Τέλος υπάρχουν αναλύσεις επί των αποτελεσμάτων καθώς και πλούσιο φωτογραφικό υλικό και διαγράμματα.

1. Τα κράματα Al-Co σε διάφορες ποσοστώσεις 7,10,15,20 % κ.ο παρασκευαστήκαν με τήξη τόξου υπό κενό. Η μικροδομή τους είναι ευκτική με κατευθυνόμενη ανάπτυξη. Η μορφολογία είναι ευτυκτική παρά το γεγονός ότι οι συστάσεις είναι υπερευκτικές λόγω ταχείας στερεοποίησης
2. Τα κράματα αποτελούνται από σωματίδια Al_9Co_2 ομοιόμορφα κατανεμημένα σε μήτρα αλουμινίου.

3. Με την αύξηση του κοβαλτίου έχουμε και αύξηση της έκτασης του πολύπλοκου μεταλλικού κράματος Al_9Co_2 καθώς και το μέγεθος των λεπίδων ,σφηνών και πλακιδίων Al_9Co_2 .
4. Ο ρυθμός μηχανικής διάβρωσης στις ενενήντα μοίρες ήταν μεγαλύτερος από τις εξήντα μοίρες καθώς η κάθετη δύναμη κρούσης ήταν μεγαλύτερη.
5. Η προσθήκη Κοβαλτίου στο αλουμίνιο δημιουργεί βελτίωση στην αντίσταση φθοράς (ολίσθησης) σε ποσοστά 7-20% κοβαλτίου.
6. Περεταίρω εργασίες ή μελέτες σε διάφορες ποσοστώσεις αλουμινίου κοβαλτίου θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση της μηχανικής φθοράς και φθορά τριβής

Τέλος θα ήθελα να αναφέρω ότι ,με ευχαρίστηση, μέρος της εργασίας δημοσιεύτηκε με ονομασία Solid Particle erosion of Aluminum In Situ Reinforced with Cobalt Aluminide K.Lentzaris ,AG Lekatou,AE Karantzalis, AK Sfikas and A Ntoumazios το οποίο μπορεί να το βρει οποιοσδήποτε στο διαδίκτυο δωρεάν.

ABSTRACT

This thesis has a title as “Study of wear and solid particle erosion for Aluminum Cobalt alloys”. The main scope of the thesis is the study of the aforementioned wear in Al and Co alloys in 7,10,15,20% by weight. This achieved by the production of samples by vacuum arc melting. The samples guided to the laboratories for the actual tests of abrasion wear and solid particle erosion in two impact angles (60° and 90°). The results interpretations based on the loss of weight and in te scanning electronic microscopy.

In the presence thesis you may find three chapters.

In the first chapter you may find some general information for the metals , also some more information for the aluminum and cobalt and also some information for the complex metallic alloys.

In the second chapter there is an extensive information for the wear with historical reports. Furthermore analyzed the abrasion wear , adhesion wear, fatigue wear and the solid particle erosion.

In the third chapter, which is the final of the thesis, you may find analytically all the information about the experiments, which includes mixing of powders, compressor of them and creation of drops. Cutting, sanding and fining of the specimens. Furthermore exist information regarding Scattered Electron Microscopy (SEM) and all the data and the processed results from the experiments from both Solid erosion wear and sliding wear. Finally there are many photos and graphs for the better understanding of the results.

The results of this thesis can be summarized

1. The Al-Co alloys have been produced by VAM (Vacuum Arc Melting).The microstructure is eutectic with developing direction. The morphology is eutectic but the stripes are hypereutectic.
2. The alloys were composed of Al₉Co₂ particles uniformly distributed in an Al matrix
3. Adding cobalt to the alloy has as a result to increase the amount of the CMA Al₉Co₂ and extended of plates and blades
4. The erosion rate of the Al Co alloy at the impact angle of 90 degrees was bigger that at 60 degrees since the vertical component of the impact force was increased.
5. The addition of Cobalt in the aluminum create a better resistance in the sliding wear for the percentages between 7-20%of Cobalt
6. Further work in different percentages of Al Co could contribute more for better understanding of the abrasion wear and the solid particle erosion.

*Αλέξανδρος Ντουμάζιος
Διπλωματική Εργασία
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων*

Finally, I would like to mention that part of this thesis contribute for the released paper Solid Particle erosion of Aluminum In Situ Reinforced with Cobalt Aluminide K.Lentzaris ,AG Lekatou, AE Karantzalis, AK Sfikas and A Ntoumazios and everyone is welcomed to see that for free online.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εσώφυλλο:	2
Πρόλογος	3
Περίληψη	4
ABSTRACT.....	6
Κεφάλαιο 1	10
Μεταλλικά Υλικά - Μέταλλα	10
Αλουμίνιο.....	11
Τα κράματα αλουμινίου.....	13
Κοβάλτιο	16
Κράματα Αλουμινίου Κοβαλτίου	17
Πολυπλοκα μεταλλικά κράματα	20
Κεφάλαιο 2	20
Φθορά.....	20
Φθορά λόγω Πρόσφυσης	22
Φθορά εκτριβής.....	23
Φθορά κόπωσης	29
Φθορά λόγω Μηχανική Διαβρωση (με Ροή Στερεών Σωματιδίων)	31
Κεφάλαιο 3	40
Πειραματικό Μέρος	40
Παρασκευή διμερούς κράματος Αλουμινίου Κοβαλτίου με την χρήση τήξης τόξου σε περιβάλλον αργού	40
Συμπύεση	41
Φούρνος τήξης τόξου υπό κενό	42

Μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων.....	43
Κοπή.....	43
Λείανση.....	44
Στίλβωση.....	44
Εγκιβωτισμός.....	45
Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM).....	46
Μηχανική Φθορά.....	47
Δοκιμές Φθοράς Ολίσθησης.....	47
Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	48
Μηχανική Διάβρωση με ροή στερεών σωματιδίων.....	49
Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	50
Γραφήματα σχετιζόμενα με την μηχανική διάβρωση με ροή στερεών σωματιδίων.....	51
Μορφολογία μετά την Διαβρωση.....	64
Συμπεράσματα.....	89
Βιβλιογραφία.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ - ΜΕΤΑΛΛΑ

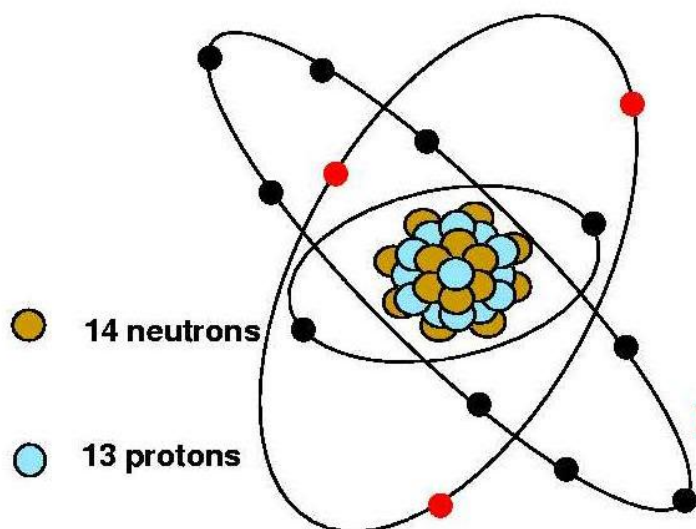
Ο ρωμαίος ιστορικός Πλίνιος ο πρεσβύτερος (1^{ος} αι μ. Χ.) στο έργο του “ Historia Naturalis Liber”, αναφέρει ως προέλευση της λέξης μέταλλο, τη σύνθεση και την εν συνεχεία, παραφθορά των δυο ελληνικών λέξεων “μετ’άλλου”. Στην αρχαία Ελλάδα, είχε παρατηρηθεί ότι η ύπαρξη κοιτασμάτων χρυσού ή αργύρου , σε μια περιοχή, πιθανολογούσε την ύπαρξη και άλλων ομοειδών , συνήθως, κοιτασμάτων σε γειτονικές περιοχές. Τα “μετ’άλλων” υπάρχοντα στοιχεία, με ομοειδείς προς τον χρυσό και αργίλιο ιδιότητες, ονομάστηκαν μέταλλα.¹

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξειδικεύσουμε την αναφορά μας στα μέταλλα και πιο συγκεκριμένα θα επικεντρωθούμε σε δυο στοιχεία, το αλουμίνιο και το κοβάλτιο.

ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Το χημικό στοιχείο αλουμινίου (σύμβολο Al) είναι ένα μέταλλο, το οποίο στην καθαρή, χύδην του μορφή είναι σχετικά μαλακό, ελαφρύ και άφθονο. Παρά το γεγονός πως ο φλοιός της γης αποτελείται κατά κύριο λόγο από οξυγόνο και πυρίτιο το αλουμίνιο θεωρείται ως το πιο κοινό μέταλλο που μπορεί να βρεθεί στο φλοιό της γης. Η μεγάλη συγγένεια του οξυγόνου με το αλουμίνιο με το οποίο παράγει μια χημική ένωση, την αλουμίνα (Al_2O_3) υποδηλώνει ότι το στοιχείο του αλουμινίου είναι παρόν στον φλοιό της Γης ενσωματωμένο στον ορυκτό βωξίτη. Στα τέλη του προηγούμενου αιώνα η βασική τεχνική πρόκληση είναι η εξαγωγή του μεταλλικού αλουμινίου από το βωξίτη. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε μια ηλεκτρολυτική διαδικασία που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα και η οποία αποτελεί μια βασική διαδικασία εμπορικής παραγωγής του αλουμινίου(1).

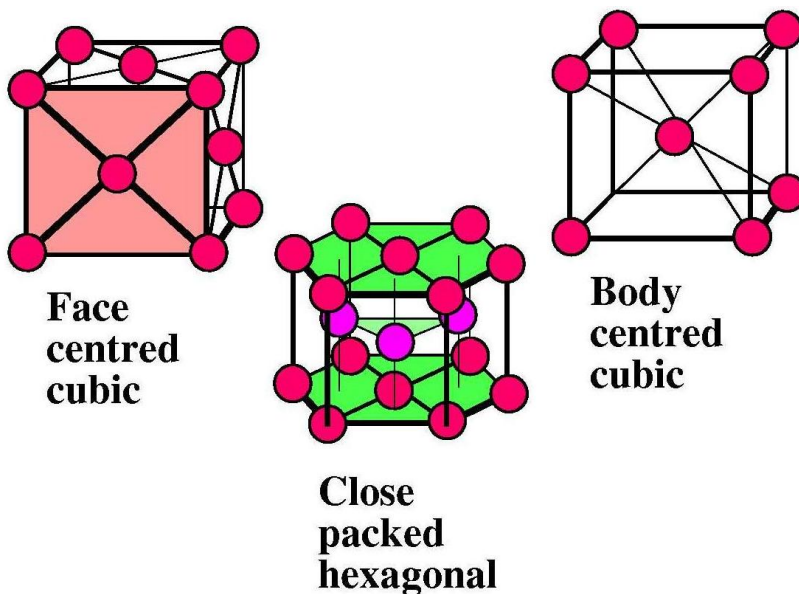
Το αλουμίνιο είναι ένα μεταλλικό υλικό, αποτελούμενο από άτομα που είναι διατεταγμένα σε μια συγκεκριμένη τρισδιάστατη διάταξη - ένα κρύσταλλο. Ο τρόπος με τον οποίο τα άτομα όλων των υλικών συνδέονται καθορίζεται από την ατομική τους δομή. Ο ατομικός αριθμός ενός ατόμου αλουμινίου είναι 13 γεγονός που σημαίνει πως έχει 13 πρωτόνια στον πυρήνα του, μαζί με 14 νετρόνια.



Σχήμα 1. Ατομική δομή του αλουμινίου (1).

Το εξωτερικό κέλυφος ηλεκτρονίων περιέχει τρία ηλεκτρόνια τα οποία συμβάλλουν στο "ελεύθερο αέριο ηλεκτρονίων" των κρυστάλλων αλουμινίου και στα οποία οφείλεται η

εξαιρετική ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Γενικά, η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται με την προσθήκη ακαθαρσιών στο αλουμίνιο και με την σκόπιμη προσθήκη άλλων στοιχείων για το σχηματισμό κραμάτων αλουμινίου. Τα άτομα του αλουμινίου δημιουργούν μια συστοιχία για το σχηματισμό κρυσταλλικού πλέγματος. Το κρυσταλλικό πλέγμα έχει κυβική δομή με μετωπικό κέντρο (face cube crystal, fcc). Το αλουμίνιο όπως τα περισσότερα μέταλλα δημιουργεί ένα συμπαγές μεταλλικό πλέγμα με μια από τις τρεις διαφορετικές πλεγματικές δομές, την κυβική επικεντρωμένη δομή (fcc), την στενή εξαγωνική δομή (cph) ή την χωροεκεντρωμένη δομή (bcc).



Σχήμα 2. Οι τυπικές κρυσταλλικές δομές του αλουμινίου (1)

Οι μοναδικοί συνδυασμοί των ιδιοτήτων του αλουμινίου και των κραμάτων του καθιστούν το αλουμίνιο ένα από τα πιο ευπροσάρμοστα, οικονομικά και ελκυστικά μεταλλικά υλικά για ευρύ φάσμα χρήσεων - από μαλακό, πολύ εύκαμπτο φύλλο περιτυλίγματος μέχρι την πιο απαιτητική μηχανική εφαρμογή. Τα κράματα αλουμινίου είναι δευτερεύοντα στοιχεία μόνο στους χάλυβες που χρησιμοποιούνται ως δομικά μέταλλα.

Το αλουμίνιο έχει πυκνότητα μόνο $2,7 \text{ g / cm}^3$, περίπου το ένα τρίτο της πυκνότητας του χάλυβα ($7,83 \text{ g / cm}^3$). Κατά συνέπεια το αλουμίνιο έχει μικρότερο βάρος από το χάλυβα γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του σε ελαφρές κατασκευές. Το αλουμίνιο αντιστέκεται στο είδος της προοδευτικής οξειδώσεως που προκαλεί τη σκουριά στο χάλυβα. Η εκτεθειμένη επιφάνεια του αλουμινίου συνδυάζεται με το οξυγόνο και σχηματίζει ένα αδρανές φιλμ οξειδίου του αργιλίου το οποίο είναι ιδιαίτερα λεπτό, γεγονός που εμποδίζει την περαιτέρω οξείδωση του. Σε αντίθεση με τη σκουριά του σιδήρου, το φιλμ του οξειδίου του αργιλίου δεν ξεφλουδίζει για να εκθέσει μια νέα επιφάνεια σε περαιτέρω οξείδωση. Το λεπτό στρώμα οξειδίου προσκολλάται στο μέταλλο και είναι άχρωμο και διαφανές δηλαδή

αόρατο με γυμνό μάτι. Στο αλουμίνιο αντίθετα με ότι συμβαίνει στο σίδηρο και στο χάλυβα δεν παρατηρείται αποχρωματισμός και απολέπιση λόγω σκουριάς (2).

Η κατάλληλη κραμάτωση και επεξεργασία επιτρέπουν στο αλουμίνιο να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην φυσική και χημική διάβρωση. Οι επιφάνειες αλουμινίου είναι ιδιαίτερα ανακλαστικές. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια, η ορατή ενέργεια, το φως, η ακτινοβολούμενη θερμότητα και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αντανακλώνται αποτελεσματικά, ενώ οι ανοδιωμένες και σκούρες ανοδιωμένες επιφάνειες μπορούν να είναι ανακλαστικές ή απορροφητικές. Η ανακλαστικότητα του γυαλισμένου αλουμινίου, σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, οδηγεί στην χρήση του για ποικίλες διακοσμητικές και λειτουργικές χρήσεις. Το αλουμίνιο εμφανίζει εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, αλλά ειδικά κράματα έχουν αναπτυχθεί με υψηλό βαθμό ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτά τα κράματα είναι χρήσιμα, για παράδειγμα, σε ηλεκτροκινητήρες υψηλής ροπής. Το αλουμίνιο επιλέγεται συχνά για την ηλεκτρική αγωγιμότητα του, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από εκείνη του χαλκού με ισοδύναμο βάρος. Η θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αλουμινίου, είναι περίπου 50 έως 60% της αντίστοιχης του χαλκού, και μπορεί να αξιοποιηθεί σε εναλλάκτες θερμότητας, εξατμιστήρες, ηλεκτρικά θερμαινόμενες συσκευές και σκεύη, και κεφαλές κυλίνδρων αυτοκινήτων και καλοριφέρ (2).

Το αλουμίνιο είναι μη-μαγνητικό υλικό, ιδιότητα που έχει σημασία στις βιομηχανίες ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών. Είναι μη πυροφορικό, γεγονός που το καθιστά ελκυστικό για εφαρμογές που περιλαμβάνουν χειρισμό εύφλεκτων ή εκρηκτικών υλικών. Επιπλέον είναι επίσης μη τοξικό και χρησιμοποιείται συνήθως σε δοχεία για τρόφιμα και ποτά. Γενικά είναι ένα υλικό που μπορεί εύκολα να υποστεί επεξεργασία γεγονός που αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του. Μπορεί να ανταγωνιστεί αποτελεσματικά φθηνότερα υλικά με μικρότερο βαθμό κατεργασιμότητας. Αποτελεί ένα μέταλλο που μπορεί να χυτευτεί εύκολα και μπορεί να διαμορφωθεί σε ελάσματα διαφορετικού πάχους (2).

ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Ήδη από το 19^ο αιώνα το αλουμίνιο θεωρήθηκε ως ένα κραματικό στοιχείο του μπρούτζου και ως αντιοξειδωτικό του χάλυβα. Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες τα σφυρήλατα και τα χυτά κράματα. Μια περαιτέρω ταξινόμηση της κάθε κατηγορίας βασίζεται στον κύριο μηχανισμό ανάπτυξης της κύριας φάσης τους. Πολλά από τα κράματα του αλουμινίου μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία. Για το

αλουμίνιο υπάρχει ένα μεγάλο εύρος εμπορικά διαθέσιμων κραμάτων η σύσταση των οποίων καθορίζεται από διεθνείς κανόνες. Γενικά τα κράματα αλουμινίου μπορούν να προσδιοριστούν από έναν τετραψήφιο αριθμό και επιπλέον ένα γράμμα που υποδεικνύει την κατάσταση του κράματος. Η ταξινόμηση των κραμάτων αλουμινίου είναι (4):

1xxx για τα κράματα αλουμινίου με 99% καθαρότητα

2xxx για τα κράματα αλουμινίου και χαλκού

3xxx για τα κράματα αλουμινίου και μαγγανίου

4xxx για τα κράματα αλουμινίου και πυριτίου

5xxx για τα κράματα αλουμινίου και μαγνησίου

6xxx για τα κράματα αλουμινίου με μαγνήσιο και πυρίτιο

7xxx για τα κράματα ψευδαργύρου και μαγνησίου

8xxx για τα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου

Τα χυτά κράματα αλουμινίου συμβολίζονται με τον αριθμό και μια τελεία μετά τα τρία πρώτα στοιχεία. Για παράδειγμα τα χυτά κράματα αλουμινίου – πυριτίου είναι 4xx.x. Τα κράματα χύτευσης έχουν την ίδια σύσταση με τα κράματα σφυρηλάτησης του αλουμινίου και αντίστοιχα διακρίνονται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία και σε αυτά που δεν μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία. Η κύρια διαφορά μεταξύ των κραμάτων χύτευσης και των κραμάτων σφυρηλάτησης του αλουμινίου είναι πως τα πρώτα έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε πυρίτιο (2).

Το αλουμίνιο και τα κράματα του παρουσιάζουν ιδιαίτερο βιομηχανικό ενδιαφέρον εξαιτίας των μηχανικών φυσιολογικών και τριβολογικών τους ιδιοτήτων που είναι ιδιαίτερα εμφανείς στα κράματα του. Οι βασικές ιδιότητες του αλουμινίου είναι το μικρό του βάρος η ευκολία στη διαμορφωσιμότητα του η μεγάλη του αντοχή στη διάβρωση και η μεγάλη ηλεκτρική και θερμική του αγωγιμότητα. Οι βασικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου παρουσιάζονται όταν προστίθεται σε αυτό κραματικά στοιχεία ή υφίσταται ψυχρή ή θερμή κατεργασία.

Το πυρίτιο αποτελεί το πιο συνηθισμένο κραματικό στοιχείο του αλουμινίου και κυρίως χρησιμοποιείται στα χυτά κράματα. Η ύπαρξη του πυριτίου εξασφαλίζει τη χυτευτότητα του κράματος και τη χαμηλή του πυκνότητα. Η χαμηλή πυκνότητα αποτελεί πλεονέκτημα για τη μείωση του συνολικού βάρους του χυτού συστατικού. Το πυρίτιο έχει πολύ χαμηλή διαλυτότητα στο αλουμίνιο, συνεπώς καθιζάνει ως καθαρό Si το οποίο είναι σκληρό και βελτιώνει την αντίσταση στην τριβή. Το Si μειώνει το συντελεστή θερμικής διαστολής των

κραμάτων Al-Si. Η ικανότητα επεξεργασίας είναι φτωχή με την προσθήκη πυριτίου στο αλουμίνιο

Ανάλογα με την κατά βάρος συγκέντρωση Si στο κράμα, τα κράματα Al-Si χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: Υποευτεκτικά (<12% κ.β. Si), Ευτηκτικά (12-13% κ.β. Si), Υπερευτηκτικά (14-25% κ.β. Si). Η αύξηση του πυριτίου στο κράμα του αλουμινίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου στερεοποίησης όπως επίσης και την μείωση της θερμοκρασίας υγροποίησης ενώ παράλληλα αυξάνεται και η επιμήκυνση του πλέγματος η οποία γίνεται μέγιστη όταν η περιεκτικότητα του πυριτίου φτάνει στο 12%. Η επιμήκυνση του πλέγματος σχετίζεται με το ρυθμό στερεοποίησης. Η αύξηση της περιεκτικότητας του πυριτίου σχετίζεται με τη σκληρότητα του κράματος η μεταβολή της οποίας μπορεί να αποδοθεί στη μεταβολή της ευτηκτικής σύστασης η οποία παρατηρείται με την αύξηση της περιεκτικότητας του πυριτίου στην σύσταση του κράματος. Ο ρυθμός φθοράς και ο συντελεστής τριβής των κραμάτων Al-Si έχουν μελετηθεί και έχει αποδειχθεί πως αυξάνοντας την περιεκτικότητα του Si πάνω από 10% η απώλεια μάζας του κράματος μειώνεται

Η προσθήκη χαλκού (Cu) ως κύριο συστατικό στα κράματα αλουμινίου επηρεάζει την αντοχή και την σκληρότητα των κραμάτων αλουμινίου είτε αυτά υπόκεινται σε θερμική κατεργασία είτε όχι τόσο σε περιβαλλοντική όσο και σε μέση θερμοκρασία. Επιπλέον η προσθήκη του χαλκού αυξάνει τη σκληρότητα του πλέγματος του κράματος. Ο χαλκός γενικά μειώνει την αντίσταση της διάβρωσης του αλουμινίου και σε συγκεκριμένα κράματα αυξάνει την τάση διάβρωσης. Επιπλέον η τελική τάση εφελκυσμού αυξάνεται με θερμική επεξεργασία και για περιεκτικότητα σε χαλκό έως 1.5%. Η αύξηση της τάσης εφελκυσμού αυξάνεται εξαιτίας της καθίζησης της φέρουσας φάσης του χαλκού στον χώρο ανάμεσα στα άτομα του χαλκού

Το μαγνήσιο (Mg) παρέχει ουσιαστική ενίσχυση και βελτίωση των χαρακτηριστικών σκληρότητας του αλουμινίου ενώ επίσης μπορεί να προσδώσει καλή αντοχή στη διάβρωση και υψηλή αντοχή (Davis 1999). Τα κράματα αλουμινίου που περιέχουν μαγνήσιο ανήκουν στην 5xxx σειρά κραμάτων. Το μαγνήσιο είναι πιο αποτελεσματικό από το μαγγάνιο ως ενισχυτής της σκληρότητας. Τα κράματα με μεγάλη περιεκτικότητα μαγνησίου παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς τη δυνατότητα επεξεργασίας τους εν ψυχρώ αλλά και στη θερμική τους επεξεργασία προκειμένου να αποφεύγεται η διάβρωση τους

Τα κράματα αλουμινίου της έκτης σειράς περιέχουν πυρίτιο και μαγνήσιο ως κύρια κραματικά στοιχεία στις κατάλληλες ποσότητες έτσι ώστε να σχηματίζεται το Mg_2Si που τα καθιστά εύκολα στη θερμική επεξεργασία. Τα κράματα αυτά είναι εύκολα διαμορφώσιμα ενώ παρουσιάζουν ευκολία στη συγκόλληση και μπορεί να υποστούν επεξεργασία και παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στη διάβρωση και μέση αντοχή

Ο Ζη όταν είναι κύριο συστατικό κράματος και μπορεί να οδηγήσει σε κράματα μεγάλης θερμικής επεξεργασίας όταν συνδυάζεται με μικρότερες ποσότητες μαγνησίου. Στα κράματα αλουμινίου με ψευδάργυρο προστίθενται επίσης ποσότητες άλλων στοιχείων όπως ο χαλκός και το χρώμιο σε μικρές ποσότητες.

Στα κράματα αλουμινίου υπάρχουν επίσης συστατικά που δημιουργούν δευτερεύουσες φάσεις όπως ο σίδηρος, το πυρίτιο, το μαγνήσιο, ο χαλκός το μαγγάνιο και το χρώμιο και οι συνδυασμοί τους. Τα στοιχεία αυτά δημιουργούν αυξημένους λόγους φάσεων διμεταλλικών ενώσεων οι οποίοι σε συνδυασμό με το πυρίτιο που σχηματίζεται κατά την στερεοποίηση ή την καθίζηση κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας οδηγούν στην δημιουργία κραμάτων με μεγάλη ανθεκτικότητα και σκληρότητα.

Το μαγγάνιο και το χρώμιο περιλαμβάνονται στην ομάδα των στοιχείων που αποτελούν συστατικά δεύτερης φάσης, επειδή στα εμπορικά κράματα αυτά έχουν πολύ χαμηλές ισορροπίες στερεών διαλυτοτήτων. Στην περίπτωση πολλών συνθέσεων που περιέχουν μαγγάνιο, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν επίσης σίδηρος και πυρίτιο και σχηματίζουν την τεταρτοταγή φάση $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$. Στα κράματα που περιέχουν χαλκό και μαγγάνιο, σχηματίζεται η τριμερής φάση $Al_{20}Cu_2Mn_3$. Τα περισσότερα από τα κράματα στα οποία υπάρχει χρώμιο περιέχουν επίσης μαγνήσιο, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της θέρμανσης στερεάς κατάστασης να σχηματίζουν $Al_{12}Mg_2Cr$, το οποίο έχει επίσης πολύ χαμηλό σημείο στερεής διαλυτότητας.

ΚΟΒΑΛΤΙΟ

Το κοβάλτιο είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 27. Το κοβάλτιο, όπως και το νικέλιο, βρίσκεται στον φλοιό της γης μόνο σε χημική ενώσεις και όχι από μόνο του. Το όνομα του προέρχεται από την γερμανική λέξη "Kobald" που σημαίνει "Goblin".

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του κοβαλτίου επιτρέπουν ένα ανθεκτικό στη φθορά μέταλλο με μοναδικές ιδιότητες σθένους. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν αναντικατάστατο σε μια σειρά βασικών βιώσιμων και στρατηγικών εφαρμογών. Το κοβάλτιο είναι ένα μεταβατικό μέταλλο που εμφανίζεται στην τέταρτη περίοδο του περιοδικού πίνακα μεταξύ σιδήρου και νικελίου. Το άτομο κατάστασης εδάφους είναι $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3d^7 4s^2$. Το πιο κοινό σθένος του κοβαλτίου είναι συνεπώς το Co^{2+} , λόγω της αφαίρεσης δύο ηλεκτρονίων $4s$. Υπάρχουν όμως και άλλα σθένη, όπως στα πιο πολύπλοκα άλατα. Για παράδειγμα, μικτά σθένη, Co^{2+} και Co^{3+} , υπάρχουν στο Co_3O_4 . Το κοβάλτιο είναι ένα γυαλιστερό, γκρι, εύθραυστο μέταλλο με μια στενή συσκευασμένη κρυσταλλική

δομή hcp σε θερμοκρασία δωματίου. Στους 421 ° C, η κρυσταλλική δομή hcp αλλάζει σε f.c.c. . Το μέταλλο χρησιμοποιείται σπάνια ως δομικό υλικό σε καθαρή μορφή, αλλά σχεδόν πάντα ως κράμα ή συστατικό άλλου συστήματος.

Έχει χαρακτηριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση ως κρίσιμη πρώτη ύλη (Critical Raw Material) το 2014 λόγω της μεγάλης οικονομικής σπουδαιότητας που έχει, σχετιζόμενο συχνά με τον υψηλό κίνδυνο της τροφοδοσίας του.

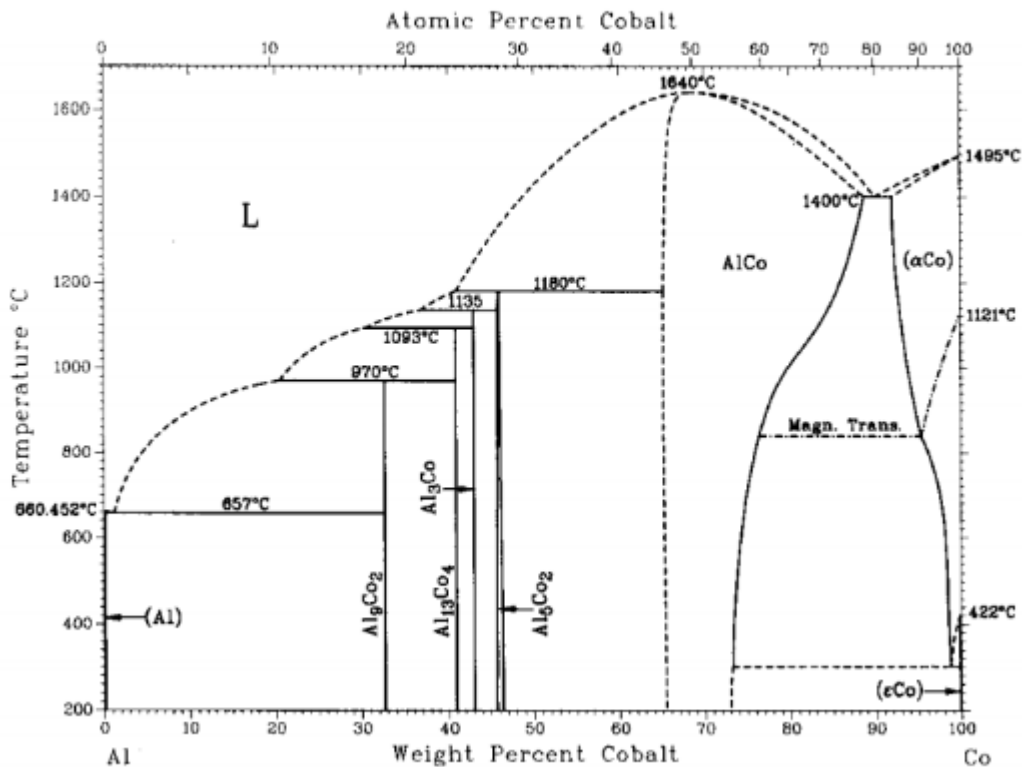
Όσον αφορά τον εφοδιασμό, το κοβάλτιο κατατάσσεται στην 33η αθθονία και είναι ευρέως διασκορπισμένο στον φλοιό της Γης, εντοπίζεται μόνο σε δυνητικά εκμεταλλεύσιμες ποσότητες σε λίγες χώρες, με επίκεντρο κυρίως την Κεντρική Αφρική και επίσης τον Καναδά, την Κούβα, την Αυστραλία και τη Ρωσία. Συνήθως συνδέεται με την παραγωγή χαλκού και νικελίου.

Περίπου το 50% των παγκόσμιων αποθεμάτων κοβαλτίου βρίσκονται στη Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό (ΛΔΚ) (USGS 2016), ενώ περίπου το 55% του παγκόσμιου κοβαλτίου προέρχεται από αυτήν τη χώρα. Για την ΕΕ, η συγκέντρωση του κοβαλτίου σε αυτήν την πολιτικά ευαίσθητη περιοχή μεταφέρει το κοβάλτιο στον «κρίσιμο» κατάλογο πρώτων υλών.

ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΟΒΑΛΤΙΟΥ

Οι ενδομεταλλικές ενώσεις του αλουμινίου έχουν τραβήξει το ερευνητικό ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας σε εφαρμογές με μεγάλες θερμοκρασίες και κατασκευές δομών , λόγω του εξαιρετικού συνδυασμού στις μηχανικές ιδιότητες που έχουν στις υψηλές θερμοκρασίες, στην χαμηλή πυκνότητα και υψηλή θερμοκρασία τήξεως. Λιγότερες μελέτες έχουν συνταθεί σχετικά με το Al Co πιθανότατα λόγω της περιορισμένης εφαρμογής τους. Πλέον οι ενώσεις Al Co βρίσκουν εφαρμογές σε ενεργούς ετερογενείς καταλύτες ή σε στρώματα επιμετάλλωσης ημιαγωγικών συσκευών.

Al-Co



Σχήμα 3. Στην παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων μεταξύ αλουμίνιο και κοβαλτίου.

Οι ενδομεταλλικές ενώσεις που έχουμε είναι

- Al₉Co₂

Η ενδομεταλλική ένωση Al₉Co₂ σχηματίζεται από την περιτηκτική αντίδραση της υγρής φάσης και της Al₁₃Co₄ στην θερμοκρασία των 970°C. Η κρυσταλλική δομή αυτής της ένωσης χαρακτηρίζεται ως μονοκλινής.

- $Al_{13}Co_4$

Η ενδομεταλλική ένωση $Al_{13}Co_4$ σχηματίζεται από την περιτηκτική αντίδραση της υγρής φάσης και της Al_3Co στην θερμοκρασία των $1093^\circ C$

- Al_3Co

Η ενδομεταλλική ένωση Al_3Co σχηματίζεται από την περιτηκτική αντίδραση της υγρής φάσης και της Al_5Co_2 στην θερμοκρασία των $1135^\circ C$

- Al_5Co_2

Η ενδομεταλλική ένωση Al_5Co_2 σχηματίζεται από την περιτηκτική αντίδραση της υγρής φάσης και της Al_3Co στην θερμοκρασία των $1180^\circ C$. Η ένωση αυτή είναι εξαγωνικής κρυσταλλικής δομής.

Ακόμα παρατηρούμε την ύπαρξη μιας μη στοιχειομετρικής ενδομεταλλικής φάσης για σύσταση από κοβάλτιο από 67% κ.β. – 88,9%κ.β.

- $AlCo$

Η μη στοιχειομετρική ενδομεταλλική φάση $AlCo$ σχηματίζεται από την αντίδραση της υγρής φάσης για τις προαναφερθείσες συστάσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κρυσταλλικές δομές των ενδομεταλλικών στοιχειομετρικών ενώσεων που σχηματίζονται, η Al_9Co_2 είναι μονοκλινής και κάθε κυψελίδα περιλαμβάνει τέσσερα άτομα κοβαλτίου και δέκα οχτώ άτομα αλουμινίου με πλεγματικές σταθερές $a=8.5565 \text{ \AA}$, $b=6.29 \text{ \AA}$, $\beta=94,76$. Η Al_5Co_2 κρυσταλλώνεται στην εξαγωνική κυψελίδα τύπου D8 και περιλαμβάνει είκοσι οχτώ άτομα συνολικά. Οι πλεγματικές σταθερές είναι $a=7,671 \text{ \AA}$, $c=7.608 \text{ \AA}$, $c/a=0.99$. Αναφορά πρέπει να γίνει και στην μη στοιχειομετρική ενδομεταλλική φάση $AlCo$ (β') η οποία κρυσταλλώνεται στο κρυσταλλικό πλέγμα BCC. Οι απομένουσες ενώσεις χρήζουν περαιτέρω επιστημονικής διερευνήσεως καθώς δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως η κρυσταλλική τους. Η $Al_{13}Co_4$ που είναι ενδομεταλλική ένωση, σύμφωνα με τον Hudd, έχει μονόκλινη κρυσταλλική δομή με πλεγματικές σταθερές $a = 1.5183$, $b=0.8122$, $c = 1.2340$, $\beta=107.9^\circ$. Διαφορετική άποψη διατυπώνουν άλλοι επιστήμονες βλ Grin οι οποίοι προτείνουν ότι είναι με ορθορομβική κρυσταλλική δομή με πλεγματικές σταθερές $a=0.8158$, $b=1.2342$, $c=1.4452$. Αξίζει να καταγραφεί και μια διαφορετική άποψη η οποία υπάρχει για την κρυσταλλική δομή της $Al_{13}Co_4$ η οποία αποτελείται από δύο στρώματα διαφορετικής κρυσταλλικής δομής. Το ένα στρώμα είναι πλούσιο σε αλουμίνιο ενώ το άλλο στρώμα είναι πλούσιο σε κοβάλτιο.

ΠΟΛΥΠΛΟΚΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ

Μια κατηγορία ενδομεταλλικών ενώσεων είναι τα πολύπλοκα μεταλλικά κράματα (Complex Metallic Alloys). Χαρακτηριστικά της κατηγορίας είναι η δομική πολυπλοκότητα, ο μεγάλος αριθμός ατόμων ανά κυβική κυψελίδα και οι μεγάλες μοναδιαίες κυψελίδες. Ακόμα κάποιες ιδιότητες που αξίζουν να αναφερθούν είναι ο χαμηλός συντελεστής τριβής, χαμηλή επιφανειακή ενέργεια, υψηλή σκληρότητα, υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, χαμηλή δυσθραυστότητα καλή αντίσταση στην οξείδωση και υψηλή προσρόφηση υδρογόνου.

Ένας νέος μηχανισμός πλαστικής παραμόρφωσης που περιλαμβάνει ένα νέος τύπος δομικής ατέλειας ονομάζεται metadislocation (MD) βρέθηκε στην περίπλοκη ενδομεταλλική φάση ε-Al-Pd-Mn. Γενικά, από τους μηχανισμούς της πλαστικής παραμόρφωσης που μεσολαβούν μεταξύ σύνθετων μεταλλικών κραμάτων και ατελειών οι περισσότερες είναι άγνωστες.

Τα metadislocation θεωρούνται από τις πιο περίπλοκες ατέλειες λόγο του ότι περιλαμβάνουν εκατοντάδες άτομα στο κέντρο τους. Κάποιες διαταραχές δεν σχετίζονται με συμβατικές επίπεδες ατέλειες αλλά με ένα ορισμένο αριθμό αποκαλούμενων φάσεων τύπου phason, έναν τύπο ατέλειας προεξοχής που παρατηρείτε στα πολύπλοκα μεταλλικά κράματα.

Το πολύπλοκο μεταλλικό κράμα $Al_{13}Co_4$ ο M. (8) και ανέλυσαν την πλαστική συμπεριφορά της φάσης CMA $Al_{13}Co_4$. Το υλικό συμπίεστηκε σε θερμοκρασίες 873 με 1073 βαθμούς K με έναν ρυθμό παραμόρφωσης $10^{-5}s^{-1}$. Διαπιστώθηκε ότι μετά την ελαστική περιοχή παραμόρφωσης μεταξύ 0.25 και 0.55% ένα δυνατό σημείο διαρροής εμφανίστηκε. Στην ενδιάμεση θερμοκρασία των προαναφερθεισών θερμοκρασιών παρατηρήθηκε διαφορά τάσης 45% από το πάνω έως το κάτω όριο διαρροής. Η αντοχή της διαρροής μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνέκριναν την CMA $Al_{13}Co_4$ με την φάση ξ' - Al- Pd - Mn. Η $Al_{13}Co_4$ είχε δομικές ομοιότητες με την τελευταία φάση , η οποία είναι καθοριστική για τον σχηματισμό ατέλειας και συμπερασματικά για τις πλαστικές ιδιότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΘΟΡΑ

Ιστορικά, η ανάπτυξη της γνώσης σχετικά με τη φθορά όπως επίσης και η ικανότητα ποσοτικής εκτίμησης της ξεκίνησε την περίοδο 1950-1965 η οποία είναι και η περίοδος που αναπτύχθηκε η ιδέα της γραμμικής φθοράς και η φθοράς εκτριβής (abrasive wear) (9).

Με τον όρο φθορά υλικού ορίζεται η βαθμιαία απομάκρυνση του υλικού που επιτυγχάνεται ανάμεσα σε δύο κινούμενες επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή και κινούνται σχετικά η μία προς την άλλη από το ένα ή και τα δύο σώματα. Η φθορά ενός υλικού μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες και επηρεάζεται από πολλούς παραμέτρους όπως :Το εξεταζόμενο υλικό, το υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) ως προς το οποίο μελετάται η φθορά του εξεταζόμενου, τα παραμένοντα στο σύστημα προϊόντα φθοράς και το περιβάλλον (υγρασία θερμοκρασία, λιπανση κτλ). Ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης των δύο υλικών σε επαφή τις χωρίζουμε στις παρακάτω κατηγορίες(6).

- Φθορά λόγω ολίσθησης
- Φθορά λόγω κύλισης
- Φθορά λόγω παλινδρόμησης
- Φθορά λόγω πρόσκρουσης
- Φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης
- Φθορά λόγω δόνησης

Ανάλογα με τον μηχανισμό που υπεισέρχεται στο φαινόμενο φθοράς κατηγοριοποιούμε στους παρακάτω τύπους φθοράς

- Φθορά λόγω πρόσφυσης
- Φθορά λόγω εκτριβής
- Φθορά λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων
- Φθορά λόγω κόπωσης

Δυο από τις πιο γνωστές και διαδεδομένες μορφές φθοράς που παρατηρούνται είναι η φθορά λόγω πρόσφυσης (adhesive wear) και η φθορά λόγω λείανσης (abrasive wear). Η φθορά πρόσφυσης πραγματοποιείται όταν τα υλικά με καλά λειασμένη επιφάνεια και με παρόμοια σκληρότητα ολισθαίνουν μεταξύ τους και οι επιφανειακές δυνάμεις προκαλούν την απομάκρυνση και τη μεταφορά μεταλλικών θραυσμάτων. Η φθορά λόγω λείανσης εμφανίζεται όταν τα λειαντικά σωματίδια ή οι επιφανειακές προεξοχές του υλικού συμπιεστούν και υποστούν θραύση από μα

επιφάνεια. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναφερθούν οι βασικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν για την φθορά των υλικών, οι μηχανισμοί και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

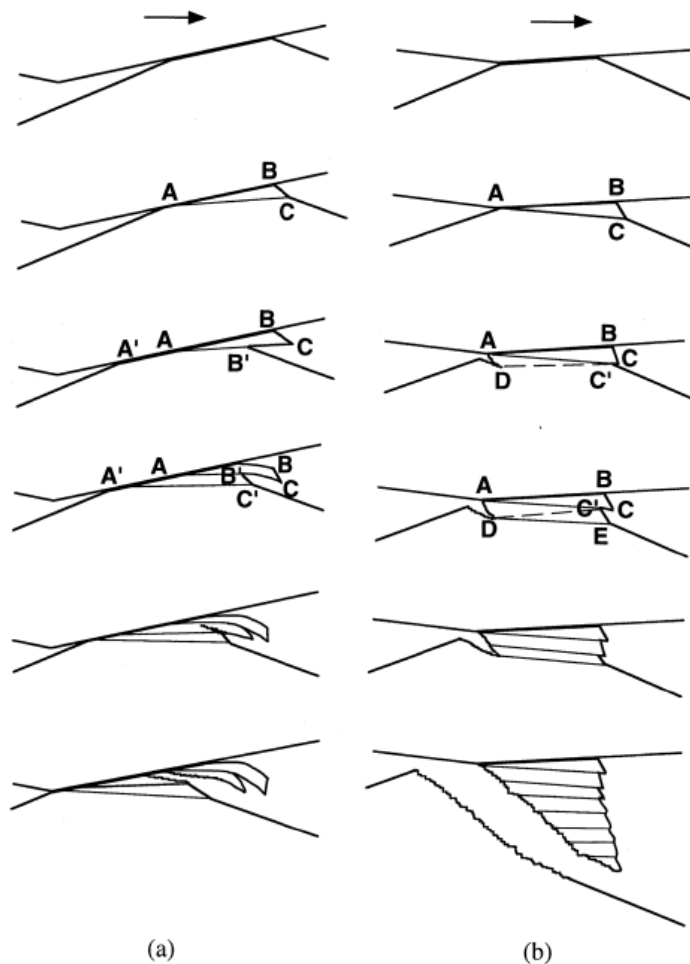
ΦΘΟΡΑ ΛΟΓΩ ΠΡΟΣΦΥΣΗΣ

Φθορά λόγω πρόσφυσης παρατηρούμε όταν έχουμε δυο ομαλές επιφάνειες και ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη. Κατά την διάρκεια της ολίσθησης έχουμε στην διεπιφάνεια των δύο υλικών, μεταξύ των ατόμων έχουμε την εμφάνιση δυνάμεων πρόσφυσης και αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί οι οποίοι καταστρέφονται και επαναδημιουργούνται. Με τον τρόπο αυτό, τμήματα του ενός υλικού μεταφέρονται στον άλλο και στην συνέχεια αποβάλλονται ως παραπροϊόντα της διεργασίας αυτής (6). Η αρχική ιδέα της φθοράς πρόσφυσης ανήκει στους Holms και Archard το 1953 σύμφωνα με τους οποίους ο όγκος φθοράς ορίζεται ως συνάρτηση της ταχύτητας ολίσθησης του κανονικού φορτίου και της σκληρότητας του υλικού. Η συγκεκριμένη θεωρία έχει το μειονέκτημα ότι αγνοεί της επίδραση της μικροδομής του υλικού στην φθορά και περιορίζεται σε ιδανικές συνθήκες ολίσθησης. Η θεωρία αυτή βασίζεται σε έναν μηχανισμό πρόσφυσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του υλικού ενώ η απομάκρυνση του υλικού σχετίζεται με την αστοχία της συνεκτικότητας των σωματιδίων. Στη συγκεκριμένη διαδικασία φθοράς δεν λαμβάνεται υπόψη η δημιουργία ρωγμών και η επακόλουθη ανάπτυξη τους. Με βάση την υπόθεση ότι η φθορά των σωματιδίων μπορεί να προσομοιωθεί με ημισφαιρικά σωματίδια της ίδιας ακτίνας με την επιφάνεια επαφής σύμφωνα με την θεωρία του Holm και Archard ο ρυθμός φθοράς μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $W=KdP/3H$ (1) όπου με K συμβολίζεται ο συντελεστής φθοράς, d η απόσταση ολίσθησης P το εφαρμοζόμενο ονομαστικό φορτίο και H η σκληρότητα του υλικού μέσου.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή ο ρυθμός φθοράς ενός υλικού είναι ανάλογος του εφαρμοζόμενου φορτίου και είναι ανεξάρτητος από την ζώνη επαφής ενώ η ενίσχυση της αντίστασης στη φθορά του υλικού σχετίζεται με την αύξηση της σκληρότητας (11).

Στη διεπιφάνεια των συγκολλημένων επιφανειών αναπτύσσεται εφαπτομενική διάτμηση υπό συμπίεση η οποία δημιουργεί επίπεδα ολίσθησης σε όλη τη θεωρούμενη επιφάνεια επαφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σχηματίζονται νηματοειδείς λωρίδες στην επιφάνεια του υλικού και κατά συνέπεια ζώνες διάτμησης μέσω των οποίων διαδίδονται οι αναπτυσσόμενες ρωγμές όταν το υλικό δέχεται ταυτόχρονα εφελκυσμό και διάτμηση στην περιοχή επαφής (11).

Στη διαδικασία της φθοράς πρόσφυσης, η μεταφορά και επαναφορά από μία επιφάνεια στην επιφάνεια επαφής λαμβάνουν χώρα σε πολλές περιπτώσεις με αποτέλεσμα, να σχηματίζονται σχετικά μεγάλα σωματίδια φθοράς αποτελούμενα από δύο επιφάνειες. Αυτό είναι ένα άλλο βασικό μέρος του μηχανισμού φθοράς πρόσφυσης. Στην διαδοχική διαδικασία της επαναλαμβανόμενης πρόσφυσης, αυτά τα σωματίδια φθοράς εγκαταλείπουν τη διεπιφάνεια επαφής ως ελεύθερα τεμάχια(απόβλητα) ή παραμένουν πάνω στην επιφάνεια και σχηματίζουν τραχείς περιοχές (12).



Σχήμα 4. Σχηματική αναπαράσταση φθοράς πρόσφυσης με α) λεπτά νηματοειδή σωματίδια και β)σφηνοειδή σωματίδια φθοράς (απόβλητα)(11)

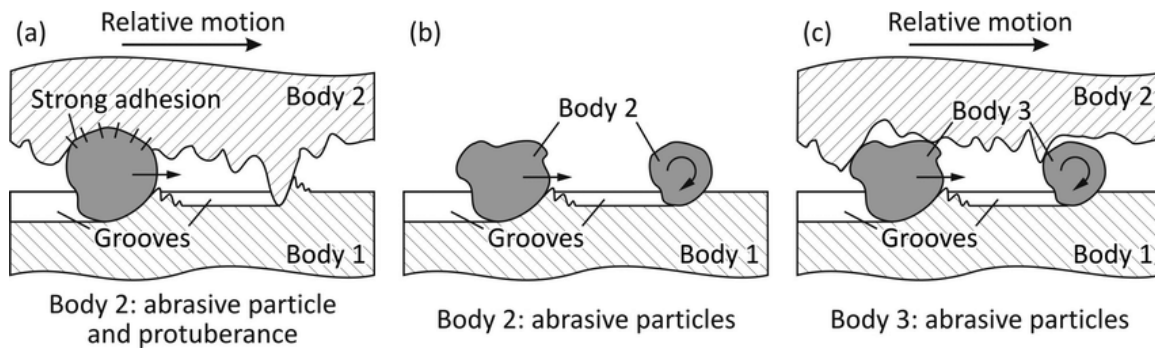
ΦΘΟΡΑ ΕΚΤΡΙΒΗΣ

Η θεωρία της φθοράς εκτριβής (abrasive wear) προτάθηκε από τους Kruschon and Babichev το 1953 οι οποίοι όρισαν ότι η φθοράς εκτριβής συμβαίνει όταν αναπτύσσεται τριβή μεταξύ ενός

μετάλλου και ενός σκληρότερου σώματος ή κόκκων. Η φθοράς εκτριβής για παράδειγμα μπορεί να λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της τριβής μιας σκληρής ακατέργαστης επιφάνειας χάλυβα που ολισθαίνει στην επιφάνεια ενός πιο μαλακού μετάλλου. Η φθοράς εκτριβής μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους μηχανισμούς οι οποίοι προκαλούν καταστροφή της επιφάνειας όπως κοπή, ξύσιμο και απλή ή επαναλαμβανόμενη πλαστική παραμόρφωση (13).

Η φθοράς εκτριβής μπορεί να εμφανιστεί είτε λόγω της εμφάνισης πλαστικής ροής είτε λόγω της ψαθυρής θραύσης. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες η πλαστική ροή μπορεί να πραγματοποιηθεί μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με άλλες διεργασίες ακόμα και αν πρόκειται για εντελώς ψαθυρά υλικά. Για τη φθοράς εκτριβής έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα τα οποία μπορεί να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες: τα μοντέλα που εξετάζουν τη φθοράς εκτριβής με πλαστική παραμόρφωση και τα μοντέλα που εξετάζουν τη φθοράς εκτριβής με την υπόθεση της ψαθυρότητας (14).

Στα μοντέλα που εξετάζουν τη φθοράς εκτριβής θεωρώντας ότι επέρχεται πλαστική παραμόρφωση σημαντικός παράγοντας για την φθορά είναι η σκληρότητα της επιφάνειας επαφής και τον προσδιορισμό της αντοχής της ενώ στα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη της ψαθυρότητας του υλικού σημαντικός παράγοντας είναι η αντοχή σε θραύση παρά το γεγονός πως η σκληρότητα εξακολουθεί να παίζει σημαντικό ρόλο. Κατά την φθοράς εκτριβής οι επιφάνειες των υλικών φθείρονται καθώς και η διεπιφάνεια πρόσφυσης. Εξαιτίας της αύξησης της επιφάνειας επαφής οι τοπικές τάσεις, επαφής, μειώνονται. Μετά την έναρξη της φθοράς λείανσης η μετακίνηση των οξειδωμένων σωματιδίων πραγματοποιείται κατά μήκος της επιφάνειας. Αυτή γενικά είναι μια διαδικασία σταθερής κατάστασης που απαιτεί την επανοξείδωση της απογυμνωμένης επιφάνειας προκειμένου να απομακρυνθούν τα οξειδωμένα σωματίδια. Το τελικό στάδιο της φθοράς πραγματοποιείται στη φάση της λείανσης και εμφανίζεται μόνο αν η πίεση επαφής αυξάνεται στο σημείο της διάτμησης των σωματιδίων. Η διάτμηση οδηγεί στο σχηματισμό λεπτών φύλλων φθοράς στην επιφάνεια του υλικού τα οποία ανάλογα με την εφαρμοζόμενη πίεση συνοδεύονται από μεγαλύτερη ή μικρότερη απώλεια υλικού (10).



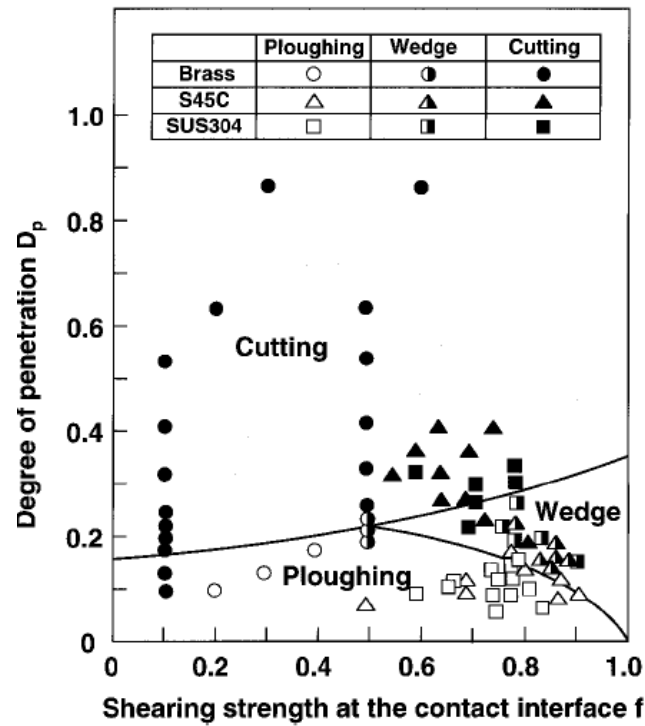
Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση φθοράς εκτριβής μεταξύ α) και β) δύο λειαντικών σωμάτων και γ) τριών σωμάτων (15).

Γενικά η φθοράς εκτριβής μπορεί να εμφανιστεί με τρεις διαφορετικές μορφές με μικροκοπή, διαμόρφωση σφήνας και πλανητική/επίπεδη λείανση. Ανάλογα με τον ακολουθούμενο μηχανισμό σχηματίζονται διαφορετικά σωματίδια φθοράς. Κατά τη λειτουργία της κοπής σχηματίζονται μικρά σωματίδια με μορφή κορδέλας. Βασικός παράγοντας σε αυτόν τον μηχανισμό φθοράς είναι η τριβή. Όταν η λειτουργία είναι η λειτουργία σφήνας το σωματίδιο που σχηματίζεται είναι σφηνοειδές και εμφανίζεται στο άκρο της αυλάκωσης και υποβοηθάει στη συνέχεια του σχηματισμού της αυλάκωσης. Αυτή η μορφή φθοράς εμφανίζεται ως συνδυασμός της λείανσης σε ένα λεπτό πεδίο με κεκλιμένη ή καμπυλοειδή διεπιφάνεια και της αναπτυσσόμενης διάτμησης στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας. Αυτή η μορφή φθοράς εμφανίζει μεγάλη τριβή. Στην πλανητική λείανση τα σωματίδια φθοράς δεν παράγονται με απλό πέρασμα της ολίσθησης και σχηματίζεται μόνο μια βαθιά ρωγμή. Προκειμένου να δημιουργηθούν σωματίδια φθοράς απαιτείται η επαναλαμβανόμενη ολίσθηση και η συσσώρευση της πλαστικής ροής στην επιφάνεια του υλικού (15).

Αυτές οι επεξηγήσεις για τη φθοράς εκτριβής θεωρητικά προκύπτουν από δισδιάστατα μοντέλα που επεξηγούν τη θεωρία εκτριβής. Οι θεωρητικές προσεγγίσεις επιβεβαιώνονται από τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν γίνει με σφαιρικά δοκίμια και χρησιμοποιούνται για το διάγραμμα φάσης της φθοράς εκτριβής και ορίζουν την παράμετρο D_p που είναι ο βαθμός διείδυσης.

$$D_p = R \sqrt{\frac{\pi H}{2W}} - \sqrt{\left(\frac{\pi H}{2W}\right) R^2 - 1} \quad (2)$$

Στη σχέση αυτή το R είναι η ακτίνα του σωματιδίου το W το φορτίο και το H η σκληρότητα του σωματιδίου.

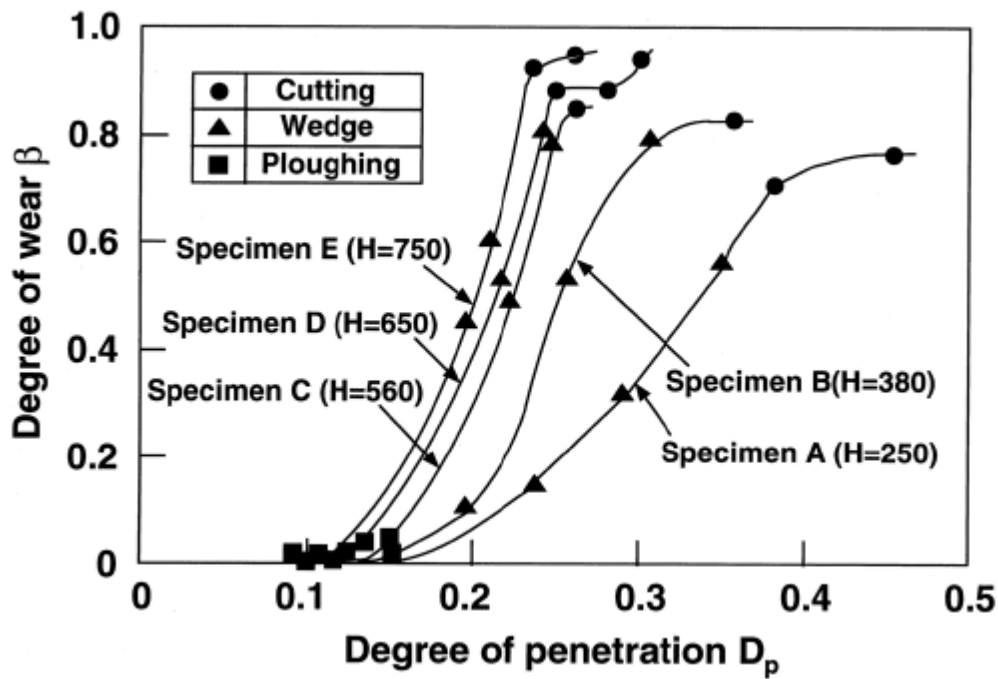


Σχήμα 6. Διάγραμμα φάσης για φθοράς εκτριβής για όλκιμα υλικά (13).

Σε περιπτώσεις φθοράς όλκιμων υλικών οι ρωγμές σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της παραγωγής σωματιδίων και της πλαστικής ροής του υλικού με αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο πλευρών στις ρωγμές. Ο βαθμός φθοράς β ορίζεται από τη σχέση:

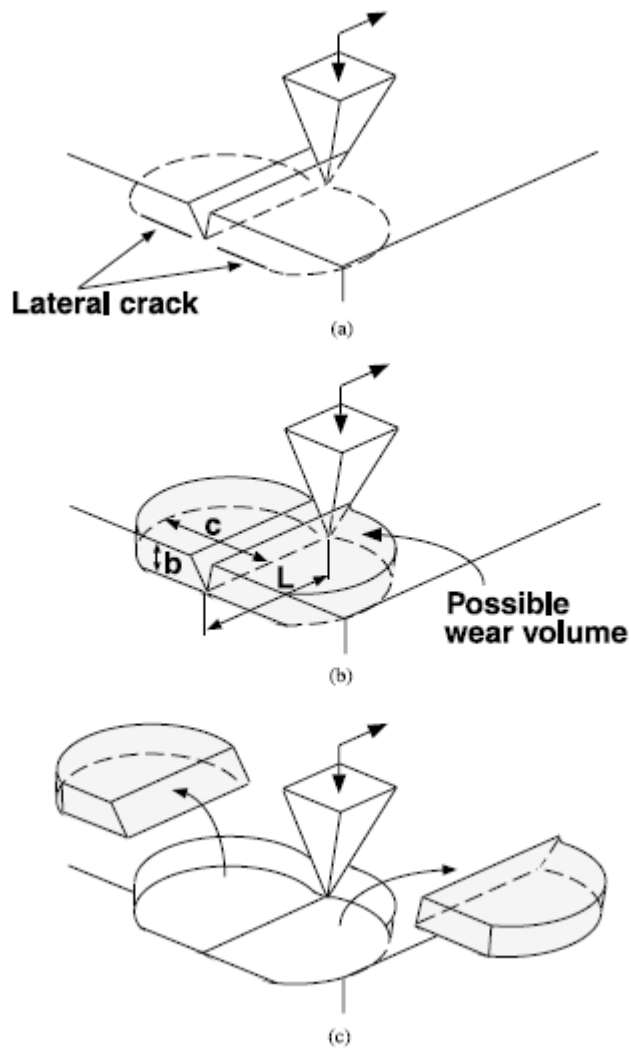
$$\beta = \frac{\Delta V_g - \Delta V_r}{\Delta V_g} \quad (3)$$

Όπου ΔV_g είναι ο όγκος της ρωγμής ανά μονάδα ολίσθησης πάνω από την αρχική επιφάνεια και ΔV_r είναι ο όγκος της ρωγμής ανά μονάδα ολίσθησης και στις δύο πλευρές της ρωγμής. Η διαφορά $\Delta V_g - \Delta V_r$ αποτελεί τον όγκο φθοράς σε μια ρωγή μετά από ένα πέρασμα ολίσθησης.



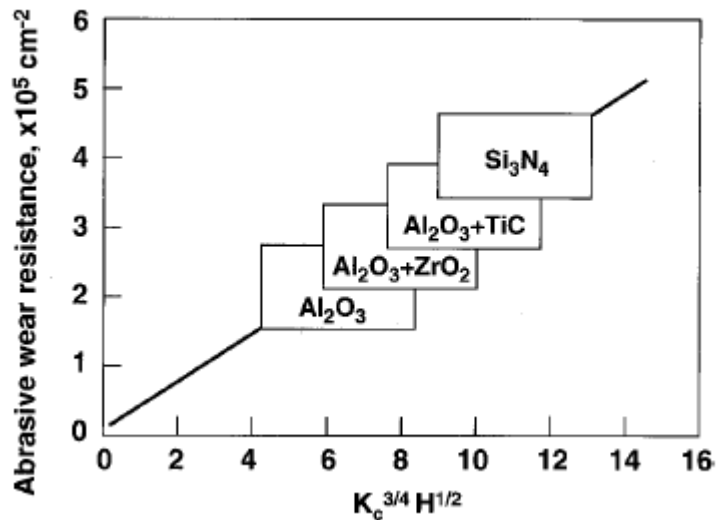
Σχήμα 7. Ο βαθμός φθοράς συναρτήσει του βαθμού διείσδυσης για τις διάφορες μορφές φθοράς λείανσης (13)

Στα εύθραυστα υλικά τα οποία υπόκεινται σε λείανση τα σωματίδια φθοράς δημιουργούνται εξαιτίας των ψαθυρών ιδιοτήτων που αναπτύσσονται εξαιτίας της ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών οι οποίες συνήθως είναι πλευρικές ή μέσες ρωγμές.



Σχήμα 8. Μοντέλο φθοράς εκτριβής για ψαθυρά υλικά (16)

Ο ρυθμός φθοράς με εκτριβής εξαρτάται τόσο από την σκληρότητα όσο και από τη στιβαρότητα του υλικού.

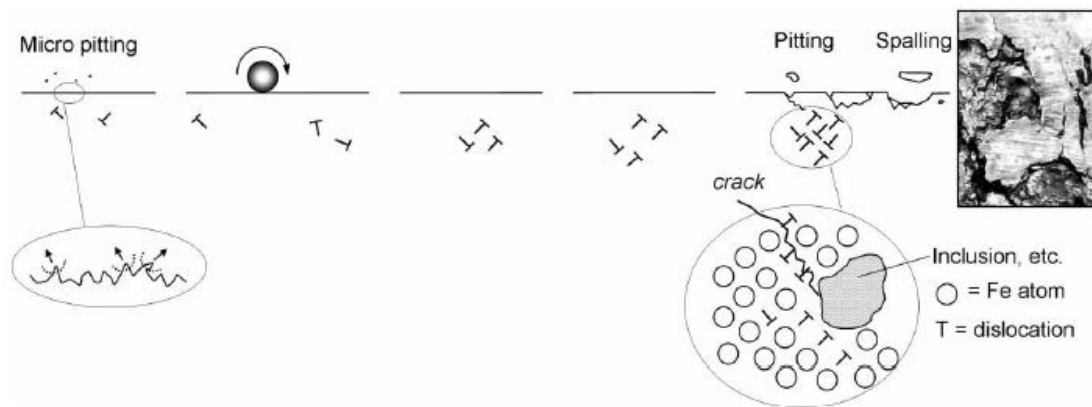


Σχήμα 9. Συσχέτιση της αντίστασης στη φθοράς εκτριβής με τη σκληρότητα (17

ΦΘΟΡΑ ΚΟΠΩΣΗΣ

Η φθορά λόγω πρόσφυσης και λόγω εκτριβής μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από το αν επαναλαμβάνονται κύκλοι διεργασίας προκειμένου να δημιουργηθούν σωματίδια φθοράς. Παρόλα αυτά υπάρχουν και περιπτώσεις φθοράς που απαιτούν την επαναλαμβανόμενη δημιουργία διεπιφάνειας προκειμένου να δημιουργηθούν τα απαιτούμενα σωματίδια φθοράς. Η φθορά που επιτυγχάνεται σε αυτές τις περιπτώσεις ονομάζεται φθορά κόπωσης. Όταν ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων κύκλων επαφής είναι μεγάλος τότε ο μηχανισμός της κόπωσης είναι και ο μηχανισμός φθοράς.

Ο κρίσιμος αριθμός κυλιόμενων κύκλων N_f για την παραγωγή σωματιδίων φθοράς με εκτόξευση(ξαφνική αποκόλληση) ή ξεφλούδισμα δίδεται πειραματικά από τη σχέση $N_f=1/W^n$ όπου με W συμβολίζεται το φορτίο και με n μια σταθερά που εξαρτάται από το στοιχείο έλασης. Αυτή η σχέση αποτελεί έναν εμπειρικό νόμο ευρέως αποδεκτό στο σχεδιασμό των στοιχείων έλασης (Halme and Anderson 2010).



Σχήμα 10. Τα στάδια φθοράς λόγω κόπωσης στην επιφάνεια στοιχείου έδρασης στην επιφάνεια και στο υπόβαθρο τους (19).

Στα στοιχεία έδρασης η διάρκεια ζωής τους είναι σταθερή. Οι επιφάνειες επαφής που δημιουργούνται είναι ομαλές και δέχονται μικρό αριθμό δονήσεων. Η λειτουργία τους σε σταθερή κατάσταση είναι αυτή που καθορίζει αν θα υφίσταται φθορά επαφής ή φθορά κόπωσης. Αν και η φαινομενική πρακτική πίεση επαφής δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να εισάγει απόδοση στην περιοχή επαφής, παράγεται τοπική απόδοση στην περιοχή επαφής εξαιτίας της ύπαρξης μικροαποβλήτων στην περιοχή επαφής του υλικού. Αν το υλικό είναι μονοκρυσταλλικό υπάρχουν ολισθαίνοντα επίπεδα για προτιμώμενη ολίσθηση κάτω από την διατμητική πίεση. Αν όμως το υλικό είναι πολυκρυσταλλικό τότε εμφανίζονται όρια κόκκων, εγκλείσματα και οπές. Αυτές οι ανομοιογένειες στη δομή του υλικού έχουν ως αποτέλεσμα η τοπικά αναπτυσσόμενη τάση στην περιοχή της επαφής να είναι μεγαλύτερη από την ολική τάση του υλικού ακόμα και αν η θεωρητική τάση για το ομοιογενές υλικό είναι μικρότερη (19).

Υπάρχει μια κατάσταση όπου μια πλαστικά παραμορφωμένη περιοχή εμφανίζεται κάτω από τη διεπιφάνεια επαφής χωρίς να φτάνει στην επιφάνεια. Η επαναλαμβανόμενη τριβή κάτω από ελαστική ή ελαστοπλαστική επαφή προκαλεί τη συσσώρευση τοπικής πλαστικής τάσης γύρω από μερικά σημεία συγκέντρωσης τάσεων και τη δημιουργία ρωγμών μετά την επίτευξη ενός ορισμένου αριθμού κύκλων τριβής. Ο μηχανισμός της εκκίνησης και της διάδοσης της ρωγμής σε μια τέτοια κατάσταση είναι αυτός που προκαλεί τη φθορά κόπωσης, η οποία είναι ένα είδος διαδικασίας με ρυθμό που ελέγχεται από την ανομοιογένεια της μικροδομής ενός υλικού.

ΦΘΟΡΑ ΛΟΓΩ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (ΜΕ ΡΟΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ)

Η διάβρωση των υλικών με επιφανειακή πρόσκρουση των σκληρών σωματιδίων είναι μία από διάφορες μορφές υποβάθμισης υλικού που ταξινομούνται γενικά ως φθορά. Ως φθορά θεωρείται ένα πολύπλοκο φαινόμενο, που αποτελείται από πολλές ταυτόχρονες και αλληλεπιδρώντες διαδικασίες, που συνήθως περιλαμβάνουν μηχανικές, χημικές και υλικές παραμέτρους καθώς και πολύπλοκους μηχανισμούς.

Αυτή η πολυπλοκότητα σε πολλές περιπτώσεις φαίνεται να αψηφά την απλοποίηση από την πλευρά του πειραματιστή που προσπαθεί να διαχωρίσει προσεκτικά τις μεταβλητές και το θεωρητικό που προσπαθεί να μοντελοποιήσει με ακρίβεια το σύστημα φθοράς.

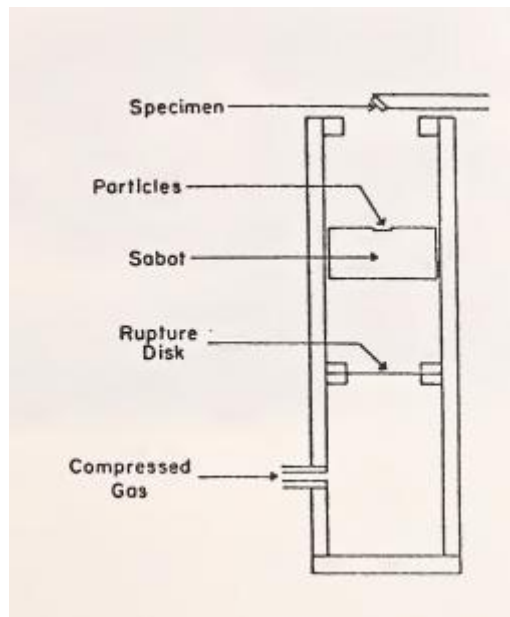
Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος τόσο στην απόκτηση μιας βασικής εκτίμησης σημαντικών παραμέτρων φθοράς και στην εφαρμογή ποικίλων υλικών για την άμβλυνση των προβλημάτων της φθοράς.

Σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χρόνου έκθεσης, η επιφάνεια είναι πιο ομοιόμορφα διαβρωμένη. Μέσω σημαντικής προσοχής στο σχεδιασμό και τη χρήση πειραματικών συσκευών, μπορούν να ελεγχθούν σημαντικές παράμετροι του προσανατολισμού των σωματιδίων, της ταχύτητας και της ποσοτικής διερεύνησης της διάβρωσης μεμονωμένων σωματιδίων. Μερικές σημαντικές μελέτες περιγράφονται παρακάτω.

Διάφορες πειραματικές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσουν τη φθορά επιφανειών μόνο με ένα σωματίδιο και να επηρεάσουν τις επιφάνειες των δειγμάτων υπό ελεγχόμενες συνθήκες.

Από τους Shelton et al. και Hutchings και Winter χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι ηλεκτροστατικής επιτάχυνσης. Έχουν επίσης αναφερθεί μέθοδοι εκρηκτικής επιτάχυνσης, ωστόσο οι περισσότερες μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει κάποιο είδος πυροβόλου αερίου.

Σε αυτή τη μέθοδο, που απεικονίζεται σχηματικά στην Εικ.2., η μονή προβολή στη μεταλλική επιφάνεια (δείγμα) είναι ενός ή περισσότερων διαβρωτικών σωματιδίων. Τα μεγάλα σωματίδια μπορούν να επιταχυνθούν απ' ευθείας, ενώ μικρού μεγέθους σωματίδια επιταχύνονται έμμεσα με τη χρήση φορέα ή σαπουνιού (που δεν χτυπά ή δεν βλάπτει το δείγμα).



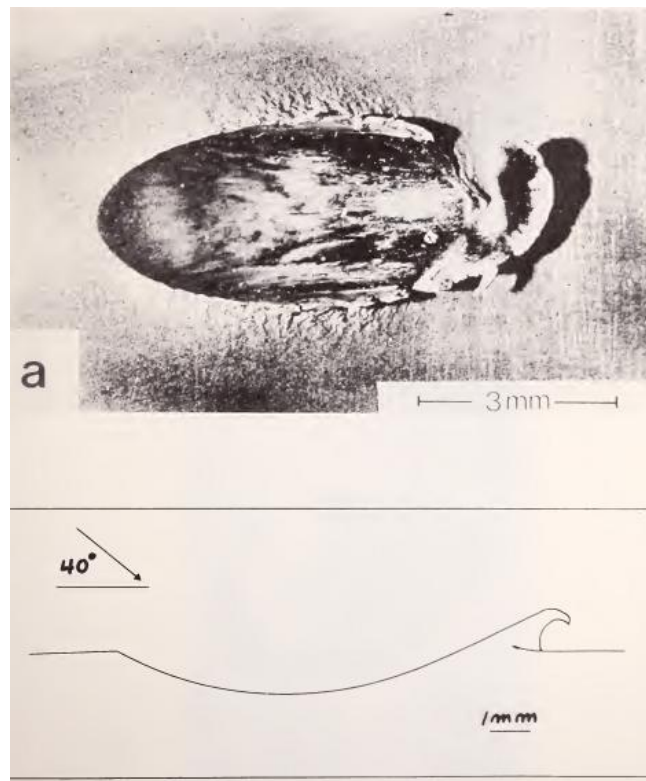
Εικόνα 1. Μέθοδος εκρηκτικής επιτάχυνσης για μηχανική διάβρωση.

Οι Sheldon and Kanhere (20) χρησιμοποίησαν αυτήν την τελευταία μέθοδο για την επιτάχυνση μεμονωμένων σωματιδίων καρβιδίου του πυριτίου, χάλυβα και το γυαλιού έριξαν σωματίδια διαμέτρου περίπου 3 mm σε διάφορες ταχύτητες, από περίπου 130 m/s έως 400 m/s. Και οι δύο επιφάνειες διαβρωμένες και μη, εκτέθηκαν και στη συνέχεια μελετήθηκαν.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις απώλειας βάρους διάβρωσης. Οι παρατηρούμενοι κρατήρες έδειξαν ότι το εκτοπισμένο υλικό του κρατήρα φαίνεται να ρέει προς την κατεύθυνση της εμφάνισης σωματιδίων έως ότου το υλικό παρουσιάσει θραύση. Οι ερευνητές επίσης σημείωσαν σημαντικές ενδείξεις παραμόρφωσης δίπλα στον κρατήρα του εξεταζόμενου υλικού. Σε δείγματα που είχαν προηγουμένως σκληρύνει η μπροστινή χτισμένη άκρη φαινόταν να καταρρέει νωρίτερα.

Ο Hutchings και Winter (2) μελέτησαν τη διαδικασία διάβρωσης χρησιμοποιώντας μεγάλα σφαιρικά σωματίδια (3 mm). Αυτοί έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στη γεωμετρία και στο μηχανισμό απομάκρυνσης μετάλλου. Το χαρακτηριστικό μοτίβο παραμόρφωσης που προέρχεται από την πρόσκρουση σωματιδίων, αποτελείται από 'βαθούλωμα' και από 'χείλος' εκτοπισμένου υλικού.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μορφολογία του κρατήρα κρούσης που βρέθηκε σε αυτό το έργο για μια χαλύβδινη σφαίρα που προσκρούει στο αλουμίνιο. Με βάση τους ερευνητές τα μικρότερα σωματίδια (μεγέθους κάτω του 1 μm) παρήγαγαν πολύ παρόμοια πρότυπα παραμόρφωσης για τις ταχύτητες που μελετήθηκαν (περίπου 150 m/s έως 200 m/s) σε δείγματα χαλκού, μαλακού χάλυβα και αλουμινίου.

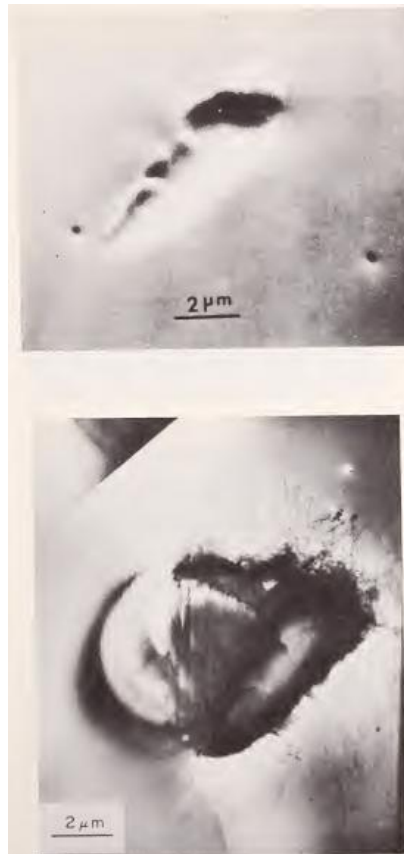


Εικόνα 2. Διάβρωση αλουμινίου προκαλούμενη για 3 λεπτά με γωνία πρόσπτωσης σωματιδίων, $18,5^\circ$ και ταχύτητα 220 ms^{-1} .

Μελέτες των κρατήρων που δημιουργούνται από τη διάβρωση με χρήση σωματιδίων των $50 \mu\text{m}$ Al_2O_3 έχουν αποκαλύψει παρόμοιες δομές. Δείγματα από ανοξείδωτο χάλυβα AISI τύπου 310 που έχουν υποστεί ανόπτηση και δείγματα χαλκού επηρεάστηκαν από τα σφαιρικά σωματίδια γυαλιού με ταχύτητα 59 m/s και επίσης από τη γωνία πρόσπτωσης,.

Δύο γωνίες έκθεσης, 20° και 90° , χρησιμοποιήθηκαν για την εξέταση διαφορετικών τρόπων αφαίρεσης υλικού. Στη χαμηλή γωνία, το υλικό παραμορφώθηκε και μετατοπίστηκε από τον κρατήρα στο χείλος στο άκρο εξόδου και στις πλευρές. Σε επίπτωση 90° , δημιουργήθηκε ένα πιο ομοιόμορφο χείλος υλικού γύρω από τον κρατήρα. Υπήρχαν σημαντικές ενδείξεις πλαστικής ροής εντός της περιοχής κρατήρα κρούσης. Οι μελέτες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας διέλευσης έδειξαν την υπο-επιφανειακή ζημιά.

Η εμφάνιση της επιφάνειας είναι σύμφωνη με το σχήμα και το μέγεθος των σωματιδίων. Η υπο-επιφανειακή ζημιά, όπως φαίνεται στο σχήμα ήταν χαρακτηριστικό αυτής που βρέθηκε στους κρατήρες. Αυτή συνίστατο από υψηλή πυκνότητα εξάρσεων που σχηματίζονται σε μια καλά καθορισμένη ζώνη γύρω από τον κρατήρα, επεκτείνοντας λίγα μικρόμετρα προς όλες τις κατευθύνσεις.



Εικόνα 3. Κρατήρες επιπτώσεων σε 310 ανοξειδώτους χάλυβες που παράγονται από 50 μm Al_2O_3 σωματίδια στα 59 m/s (a) SEM και (b) TEM μικρογραφίες κρατήρα που παράγονται για γωνία προσβολής 90° .

Παρατηρήθηκαν επίσης ορισμένες ζώνες και ομάδες μετατοπίσεων, αλλά συνηθέστερα βρέθηκε τυχαία μάζα εξάρσεων γύρω από τους τοίχους κρατήρων. Υπήρχαν παραμόρφωσης και συσσωμάτωσης σε ορισμένες περιπτώσεις με τις μελέτες περίθλασης ηλεκτρονίων να δείχνουν πολυκρυσταλλικές περιοχές, ίσως λόγω ανακρυστάλλωσης (23).

Η σκοτεινή κεντρική περιοχή στην εικόνα είναι αποτέλεσμα ισχυρής σκέδασης ηλεκτρονίων από το παραμορφωμένο υλικό κοντά στα τοιχώματα του κρατήρα. Έξω από την άμεση περιοχή του κρατήρα, η συγκέντρωση των 'εξάρσεων' μειώθηκε απότομα.

Επίσης στη βιβλιογραφία έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις πλαστικού στελέχους χρησιμοποιώντας μια επιλεγμένη περιοχή για τη διοχέτευση ηλεκτρονίων προκειμένου να μετρηθεί περαιτέρω η φθορά λόγω διάβρωσης. Αυτή η μέθοδος υπολογίζει κατά μέσο όρο την καταπόνηση σε όγκο.

Παρά τις λίγες μελέτες που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής σχετικά με τα μονά σωματίδια διάβρωσης, ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας έχουν ταυτοποιηθεί. Το σχήμα των σωματιδίων και ο προσανατολισμός στην επαφή είναι σαφώς σημαντικές παράμετροι μαζί με την ταχύτητα των σωματιδίων, τη γωνία πρόσπτωσης και τις ιδιότητες του σωματιδιακού υλικού.

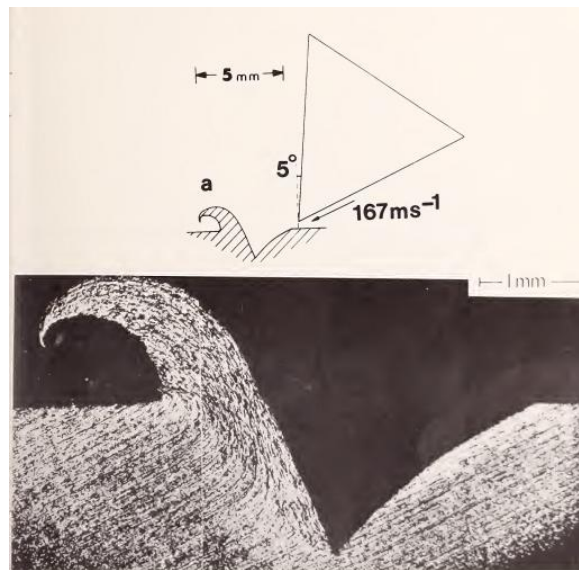
Επίσης ταυτοποιήθηκε και η διαφορά στα χαρακτηριστικά των κρατήρων που σχηματίστηκαν σε μη διαβρωμένες και σε προηγουμένως διαβρωμένες επιφάνειες. Έτσι, μόνο τα πειράματα σωματιδίων από μόνα τους δεν επαρκούν. Οι Sheldon και Kanhere (20) βρήκαν επίσης μια μικρή διαφορά στην ταχύτητα εξάρτησης της διάβρωσης μεταξύ των μη διαβρωμένων και των προηγουμένως διαβρωμένων επιφανειών που είναι πιθανώς σημαντικές. Αυτοί παρατήρησαν ότι το εκτοπισμένο χείλος του υλικού φάνηκε να εκτοπίζεται νωρίτερα σε προηγουμένως διαβρωμένες επιφάνειες, αντανακλώντας προφανώς τα υψηλότερα επίπεδα καταπόνησης στο υλικό.

Οι Hutchings and Winter βρήκαν στοιχεία για την κρίσιμη ταχύτητα του σωματιδίου πάνω από την οποία το υλικό μετατοπίζεται από το χείλος του κρατήρα. Αυτοί πρότειναν ότι οι δυνάμεις τριβής μεταξύ της επιφάνειας και του σωματιδίου μπορούν να είναι σημαντικές στη διαδικασία σχηματισμού κρατήρων.

Ως εκ τούτου, το αποτέλεσμα του περιβάλλοντος (συμπεριλαμβανομένων των επιφανειακών μεμβρανών) στην επιφανειακή τριβή μπορεί να χρειαστεί περαιτέρω μελέτη. Επίσης οι ερευνητές μελέτησαν τις επιπτώσεις γωνιακών σωματιδίων όπου εντοπίστηκε μια διαδικασία 'μικρομηχανικής'. Οι λεπτομέρειες εξαρτώνται από τη γωνία κλίσης των σωματιδίων και τη γωνία προσβολής, καθώς επίσης και από την έκταση στην οποία συνέβη ο κατακερματισμός των σωματιδίων.

Στην εικόνα 3 αντικατοπτρίζεται μια ενδιαφέρουσα τομή μέσω ενός κρατήρα κρούσης στον χάλυβα όπου και η διαμόρφωση του μετατοπιζόμενου υλικού καθώς και το πρότυπο παραμόρφωσης στο 'χύμα' υλικό είναι εμφανή. Σε μερικές από τις ακμές του κρατήρα παρατηρούνται ζώνες τοπικής, έντονης διάτμησης.

Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί στοιχεία για τοπική θέρμανση που οδηγούν σε τοπική θερμικά επηρεασμένη παραμόρφωση [30] και υπογραμμίζεται η ανάγκη να ληφθούν υπόψη οι θερμικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών όσον αφορά στη συμπεριφορά διάβρωσης.



Σχήμα 11. Α) Γεωμετρία πρόσκρουσης και κρατήρας που παράγεται από χάλυβα. Απεικονίζονται η γωνία πρόσκρουσης και η ταχύτητα. (Β) Χαραγμένο τμήμα του κρατήρα παραπάνω. Παρατηρήστε τα σαφή όρια μεταξύ του παραμορφωμένου και μη παραμορφωμένου υλικού.

Μελέτες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης σχετικά με τη φθορά που σχετίζεται με πρόσκρουση σωματιδίων στο χαλκό και στον ανοξειδωτο χάλυβα τύπου 310 βρήκαν μια ζώνη υψηλής πυκνότητας εξάρθρωσης τυπικά μερικών μικρομέτρων πάχους γύρω από έναν κρατήρα κρούσης. Μετρήσεις καταπόνησης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διοχέτευσης ηλεκτρονίων έδειξαν επίσης έναν εντοπισμό βλάβης πλησίον των κρατήρων.

Οι δυο αυτές παραμορφώσεις σχηματίστηκαν σε μεγάλους γωνιακούς κρατήρες σωματιδίων, γεγονός που υποδηλώνει έντονο τοπική πίεση, ενδεχομένως από τον υψηλό ρυθμό καταπόνησης. Πειράματα που χρησιμοποίησαν ένα διαμάντι πυραμίδα για να σχηματίσουν φθορά παρουσίασαν παρόμοια μοτίβα εξάρθρωσης, όπως βρέθηκαν κοντά στους κρατήρες κρούσης, αν και δεν παρατηρήθηκαν δυο ίδιες παραμορφώσεις.

Τα αποτελέσματα του Hutchings (22) καθιερώνουν σαφώς διάφορους τρόπους παραμόρφωσης της πρόσκρουσης σωματιδίων. Το σχήμα των σωματιδίων ήταν σημαντικό. Δεδομένου ότι τα γωνιακά σωματίδια είτε μετατοπίζουν περισσότερο υλικό από το χείλος του κρατήρα όπου γίνεται ευάλωτο σε περαιτέρω διάβρωση ή στην πραγματικότητα αποκόπτουν υλικό από την επιφάνεια (ανάλογα με τη γωνία κλίσης των σωματιδίων κατά την επαφή με την επιφάνεια).

Η αποτελεσματικότητα της διάβρωσης των γωνιακών σωματιδίων σε σχέση με τα στρογγυλά σωματίδια μπορούν να εξηγηθούν. Σε συνδυασμό με αυτά τα πειράματα, ένα θεωρητικό μοντέλο αναπτύχθηκε για να περιγράψει την αλληλεπίδραση σωματιδίων με την επιφάνεια. Οι υπολογισμοί της θέσης των σωματιδίων και ο προσανατολισμός με το χρόνο ήταν σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές φωτογραφίες πραγματικών επιπτώσεων.

Το περιορισμένο εύρος γωνιών κλίσης, 0° έως -17° , πάνω από την οποία παρατηρήθηκε πραγματική κοπή επιβεβαιώθηκε και από τους υπολογισμούς. Επιστημονικά επιβεβαιώθηκε ότι τέτοιες συνθήκες

κρούσης είναι σπάνιες, ίσως μόνο να εμφανίζονται περίπου μία φορά από τις έξι προσπτώσεις σε μια τυχαία βάση. Έτσι, η διαδικασία σχηματισμού των κρατήρων φαίνεται να είναι ο κυρίαρχος τρόπος δημιουργίας φθοράς κατά την πρόσκρουση και η απώλεια μετάλλου λαμβάνει χώρα κυρίως μέσω των επακόλουθων κρουσμάτων με το χείλος του υλικού. Μελέτες σχετικά με τα σωματίδια που ανακτώνται από διαβρωμένες επιφάνειες από χάλυβα 1015 υποστηρίζουν το προαναφερόμενο πρότυπο συμπεριφοράς.

Παραπάνω περιγράφηκαν πειραματικές τεχνικές φθοράς για μονά σωματίδια πρόσκρουσης. Στις ακόλουθες παραγράφους πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή για φθορά από πολλαπλά σωματίδια και πιο συγκεκριμένα σε μεταλλικές επιφάνειες.

Η τεχνολογική ανησυχία για τη διάβρωση των υλικών συνεπάγεται πολλαπλές επιπτώσεις σωματιδίων, συνήθως σε σταθερή κατάσταση μακροπρόθεσμα. Μια απλή εξέταση των αποτελεσμάτων μιας ροής σωματιδίων που προσπίπτουν σε μια επιφάνεια για κάποιο χρονικό διάστημα δείχνει ότι προστίθενται πολλές νέες, πολύπλοκες πτυχές στο βασικό πρόβλημα.

Αυτές περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις των σωματιδίων με ένα ευρύ φάσμα ταυτόχρονων γωνιών επίθεσης, κατακερματισμός σωματιδίων, την επιφανειακή θωράκιση λόγω αναπήδησης σωματιδίων και την ενσωμάτωση των σωματιδίων μεταξύ άλλων. Μερικά από αυτά τα αποτελέσματα, π.χ., κατακερματισμός και ενσωμάτωση συμπεριλαμβάνονται επίσης σε επιπτώσεις απλού σωματιδίου.

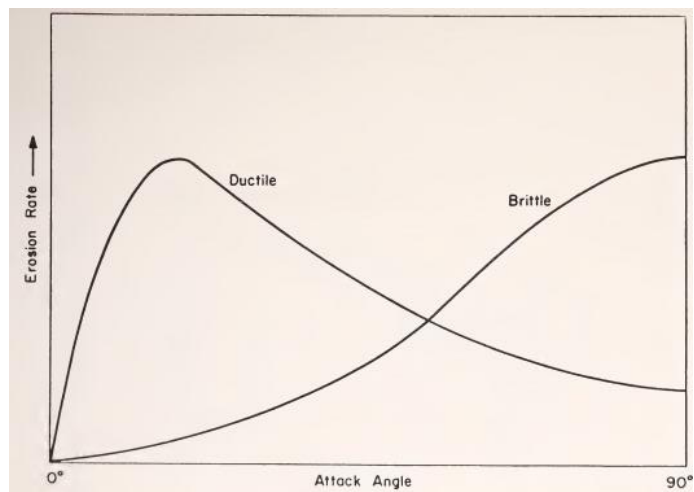
Σαφώς προκειμένου να μετρηθεί ένας σημαντικός ρυθμός διάβρωσης υλικών για σκοπούς εφαρμογής πρέπει να εκτελούνται εκθέσεις διάβρωσης πολλαπλών σωματιδίων. Ο δεύτερος λόγος για τέτοια πειράματα θα συνεπαγόταν με την αναζήτηση νέων, σημαντικών επιδράσεων λόγω πολλαπλών σωματιδίων. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα, όσον αφορά την ενσωμάτωση σωματιδίων στην επιφάνεια του δείγματος, έχει ήδη ανακαλυφθεί στη βιβλιογραφία. Ένα άλλο σημαντικό αποτέλεσμα είναι η υπό-επιφανειακή φθορά λόγω πολλαπλών επιπτώσεων [55].

Δύο βασικοί τύποι σχεδιασμού εξοπλισμού έχουν χρησιμοποιηθεί για την έκθεση των στερεών δειγμάτων σε μία ροή διαβρωτικών σωματιδίων. Στην πρώτη διάταξη το δείγμα μετακινείται με ρυθμιζόμενη ταχύτητα, συνήθως με έναν περιστρεφόμενο βραχίονα, μέσω μιας αργής διαβρωτικής ροής. Η έκθεση μπορεί να είναι διαλείπουσα αλλά μπορεί να συνεχιστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η σχετική ταχύτητα των σωματιδίων μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια από την κύρια ταχύτητα η οποία είναι η εργαστηριακή του δείγματος.

Μια παραλλαγή σε αυτό το σχέδιο επιτρέπει στα περιστροφικά σωματίδια να περιστρέφονται από έναν περιστρεφόμενο δίσκο για να χτυπήσει ένα σταθερό δείγμα. Ο εναλλακτικός σχεδιασμός περιλαμβάνει την προώθηση μιας ροής σωματιδίων σε σταθερό δείγμα. Το δείγμα μπορεί να είναι εντελώς ή τμηματικά εκτεθειμένο στην ροή. Σε αυτό το σύστημα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια μέθοδος μέτρησης ή υπολογισμού της ταχύτητας σωματιδίων. Η συγκέντρωση σωματιδίων στην ροή και η φύση του φορέα αερίου (ρευστό) μπορεί να επιλεγεί ως κατάλληλο σύστημα. Κάποιο είδος ακροφυσίου ή σωλήνα πτήσης εμπλέκεται προκειμένου να περιοριστεί σωστά η διαβρωτική ροή. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο έχουν αναφερθεί ταχύτητες μεγαλύτερες από 300 s (24).

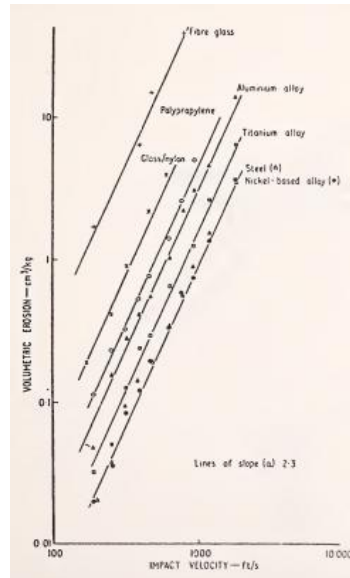
Οι ποσοτικές μετρήσεις του ποσοστού διάβρωσης απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στο πειραματικό σύστημα και στις παραμέτρους της έκθεσης. Για παράδειγμα, ένα ακροφύσιο απόρριψης μπορεί να μεταβάλει σημαντικά το σχήμα και την ταχύτητα ροής του προφίλ. Η τυρβώδης ροή μέσα σε ένα σωλήνα πτήσης ή που προκαλείται από την παρουσία του ίδιου του δείγματος στην ροή, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη ροή σωματιδίων και την ταχύτητα σωματιδίων όπως παρατηρήθηκε από το δείγμα δοκιμής.

Η διακύμανση της διάβρωσης, που συνήθως μετράται σε απώλεια μάζας ή όγκου από το δείγμα ανά μονάδα μάζας του 'επιθετικού' λειαντικού, ως συνάρτηση της γωνίας της 'επίθεσης' των σωματιδίων παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 12 για ψαθυρά και για όλκιμα υλικά. Πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει αυτή τη γενική συμπεριφορά.



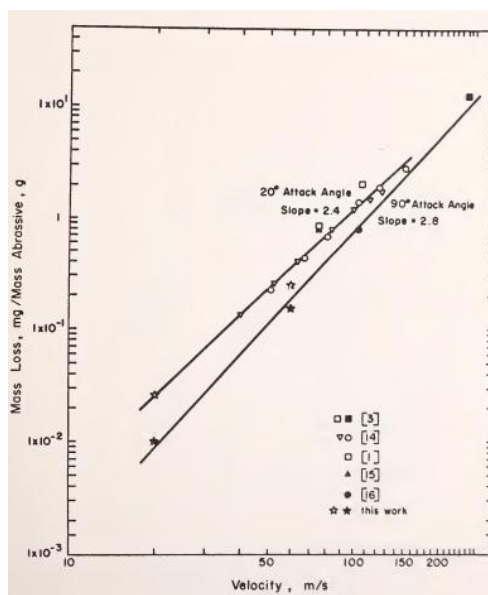
Σχήμα 12. Σχηματική απεικόνιση της γωνίας πρόσκρουσης συναρτήσει του ρυθμού φθοράς].

Για τα όλκιμα υλικά παρουσιάζεται περίπου στις 20°, ενώ για τα εύθραυστα η μέγιστη απώλεια διάβρωσης εμφανίζεται σε περίπου 90° (κανονική συχνότητα εμφάνισης). Η εξάρτηση του ρυθμού διάβρωσης από την ταχύτητα σωματιδίων έχει μετρηθεί για πολλά υλικά με ταχύτητα τουλάχιστον τριών τάξεων μεγέθους. Από τα πειράματα στις περισσότερες περιπτώσεις βρέθηκε ότι ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται όσο η ταχύτητα αυξάνεται.



Σχήμα 13. Επίδραση της ταχύτητας φθοράς για διαφορετικά υλικά.

Έχει αναφερθεί επίσης ότι ο εκθέτης ταχύτητας δεν εξαρτάται από τον τύπο του υλικού σχήμα 13 ωστόσο, υπάρχουν λεπτομερείς μελέτες που δείχνουν κάποια εξάρτηση του εκθέτη ταχύτητας με τη γωνία προσβολής και τη θερμοκρασία της διάβρωσης.



Σχήμα 14. Επιλεγμένες μετρήσεις επάνω σε χαλκό, ταχύτητα πρόσκρουσης συναρτησί απώλειας μάζας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΙΜΕΡΟΥΣ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΟΒΑΛΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΗΞΗΣ ΤΟΞΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΡΓΟΥ

Η παρασκευή των κραμάτων αλουμινίου κοβαλτίου έγιναν στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μεταλλουργίας σε φούρνο με τήξη τόξου σε περιβάλλον αργού. Τα κράματα τα οποία παρασκευάστηκαν είναι

- Al – 7% Co
- Al – 10% Co
- Al – 15% Co
- Al – 20% Co

Τα ποσοστά αναφέρονται στο βάρος(gr) επί τοις εκατό και επιτεύχθηκαν σε τέταρτο δεκαδικό ψηφίο(10^{-4}). Τα αναλώσιμα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν

- Aluminum powder 325 mesh, 99,5% (metal basis)
- Cobalt powder, -400 mesh, 99,5% (metal basis)

στα οποία έγινε ανάμειξη συστατικών (κόνεων)

Συμπύεση

Για την μορφοποίηση των κόνων τοποθετήθηκαν σε χειροκίνητη υδραυλική πρέσα. Η πίεση η οποία ασκήθηκε ήταν 30 Μρα για 300 δευτερόλεπτα, για κάθε δοκίμιο που παρασκευάστηκε.



Εικόνα 4. Υδραυλικη πρεσσα..

Το αποτέλεσμα της μορφοποίησης ήταν ένα γεωμετρικά κυλινδρικό σώμα στην οποία συχνά αναφερόμαστε ως ταμπλέτα (tablet). Τα δοκίμια είχαν βάρος μεταξύ 4-5 γραμμαρίων.

Φούρνος τήξης τόξου υπό κενό

Επόμενο στάδιο ήταν η τήξη τόξου σε περιβάλλον αργού, το οποίο πραγματοποιείται μεταξύ του ηλεκτρόδιου από βολφράμιο (Tungsten) και του δοκίμιου. Οι συνθήκες στις οποίες δημιουργήθηκαν όλα τα δοκίμια ήταν ίδιες (Ένταση ρεύματος: 120Ampere και τάση 25 Volt). Δημιουργία κενού (vacuum) μέσω αντλίας για 30 δευτερόλεπτα και πλήρωση του θαλάμου με αργό. Το τόξο δημιουργείται όταν έρθουν σε επαφή (ή ακόμα και ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους) η ακίδα βολφραμίου και το δοκίμιο, δημιουργώντας το τελικό δοκίμιο το οποίο μοιάζει με σταγόνα (drops). Καθαρισμός και απομάκρυνση ακαθαρσιών μετά το πέρας της δημιουργίας με ορειχάλκινη βούρτσα χειρός. Η θερμοκρασία που αναπτύχθηκε είχε εύρος 2100 – 2500 βαθμούς Κελσίου.



Εικόνα 5. Μηχανή συγκόλλησης

Στην παρούσα φάση θα πρέπει να επισημανθεί ότι η δημιουργία σταγόνας (drops) χρειάζεται έναν ελάχιστο βαθμό εμπειρίας για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Η διαδικασία συγκόλλησης έγινε αρκετές φορές. Η κατάλληλη διαλογή έγινε κυρίως με γνώμονα την μέγιστη δυνατή επιφάνεια και βάρος.

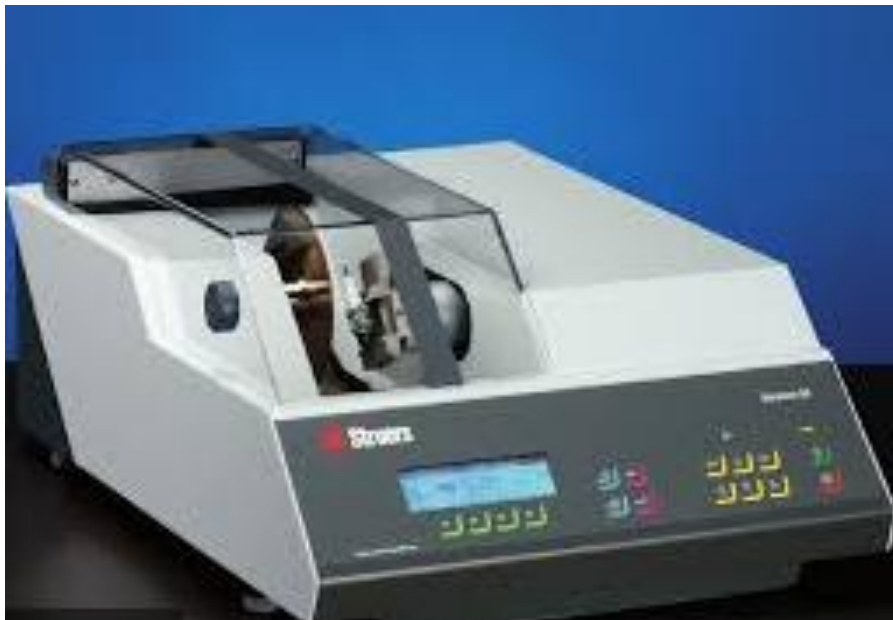
ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.

Κοπή

Η μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμών είναι μια απαραίτητη διαδικασία για την επίτευξη παρατήρησης της πραγματικής δομής των δοκιμών. Τα στάδια που πραγματοποιήθηκαν ήταν τα παρακάτω

- Κοπή ,
- Θερμός Εγκιβωτισμός
- Λείανση
- Στίλβωση

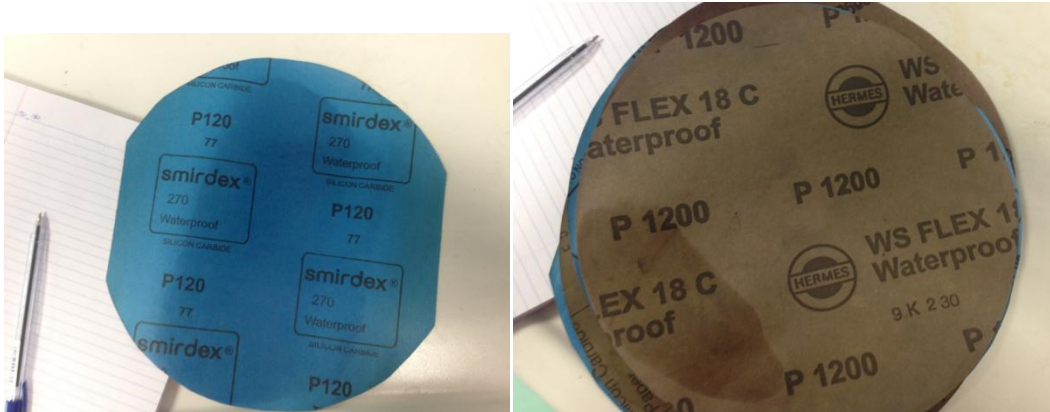
Η κοπή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με το μηχάνημα ACCUTOM 5 Stuers. Η ταχύτητα κοπής ήταν 0,2-0,4 mm/sec και πραγματοποιήθηκε με την συνεχή ρίψη νερού.



Εικόνα 6. Μηχάνημα κοπής ACCUTOM 5 Stuers

Λείανση

Η λείανση είναι μια σημαντική διεργασία καθώς απομακρύνονται όλες οι ατέλειες που βρίσκονται στην επιφάνεια του δοκιμίου αναλόγως των πανιών που χρησιμοποιούμε. Τα πανιά που χρησιμοποιήθηκαν σταδιακά για όλα τα δοκίμια ήταν 120,180,320,400,600,800,1200.



Εικόνα 7. Ενδεικτικά Πανία λείανσης (120 και 1200)

Στίλβωση

Το στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερος σημαντικό καθώς απομακρύνονται όλες οι ατέλειες που υπάρχουν στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Έτσι δημιουργούνται κατάλληλες συνθήκες για την παρατήρηση της μικροδομής του δοκιμίου. Για την διαδικασία της στίλβωσης χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα Struers Rotorol – 25 στο οποίο τοποθετήθηκε ειδικό πανί στίλβωσης στο οποίο ψεκάστηκε με αναλώσιμο από κοκκούς διαμαντιών Presi των 1,3,6 μm σε συνδυασμό λιπαντικό υγρό Lube DP – Lubricant Blue Struers.



Εικόνα 8. Μηχάνημα Λείανσης

Εγκιβωτισμός

Όσα δοκίμια θα ακολουθούσαν πειράματα φθοράς θα πρέπει να εγκιβωτιστούν ενώ τα υπόλοιπα που θα χρησιμοποιούνταν για μηχανική διάβρωση όχι. Για την επίτευξη του εγκιβωτισμού χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα Stuers Laborpress-1 με φαινολική ρητίνη. Η ημι-αυτόματη μηχανή Stuers Laborpress 1 ρυθμίστηκε στους 180°C και ασκήθηκε δύναμη ίση με 20KN για χρονικό διάστημα 300 δευτερολέπτων.



Εικόνα 9. Stuers Laborpress-1 Μηχάνημα θερμού εγκιβωτισμού



Εικόνα 10. Δοκίμιο μετα τον εγκιβωτισμό

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM(Scattered Electron Microscopy)) χρησιμοποιεί ηλεκτρόνια τα οποία σκεδάζονται ή εκπέμπονται από την επιφάνεια του δείγματος με σκοπό τον προσδιορισμό του σχήματος και του μεγέθους των σωματιδίων. Η τεχνική αυτή δημιουργεί <<βάθος>> στην εστίαση και επειδή η σκέδαση των ηλεκτρονίων είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσκρουσης, η τελικ'ή εικόνα έχει τρισδιάστατη επεικόνιση. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Jeol JSM 6510V το οποίο είναι εξοπλισμένο με αναλυτή στοιχειακής ανάλυσης ακτίνων X της εταιρείας Oxford Instrument X –Act (EDX).



Εικόνα 11. Jeol JSM 6510V

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΘΟΡΑ

Η μελέτη της φθοράς στην παρούσα εργασία διαχωρίζεται σε δύο τομείς.

- Φθορά ολίσθησης
- Μηχανική διάβρωση με ροή στερεών σωματιδίων

ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΘΟΡΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Οι δοκιμές έγιναν στο εργαστήριο εφαρμοσμένης μεταλλουργίας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων χρησιμοποιώντας το τριβόμετρο CSM instruments (μηχάνημα φθοράς). Οι συνθήκες για την διεξαγωγή του πειράματος ήταν

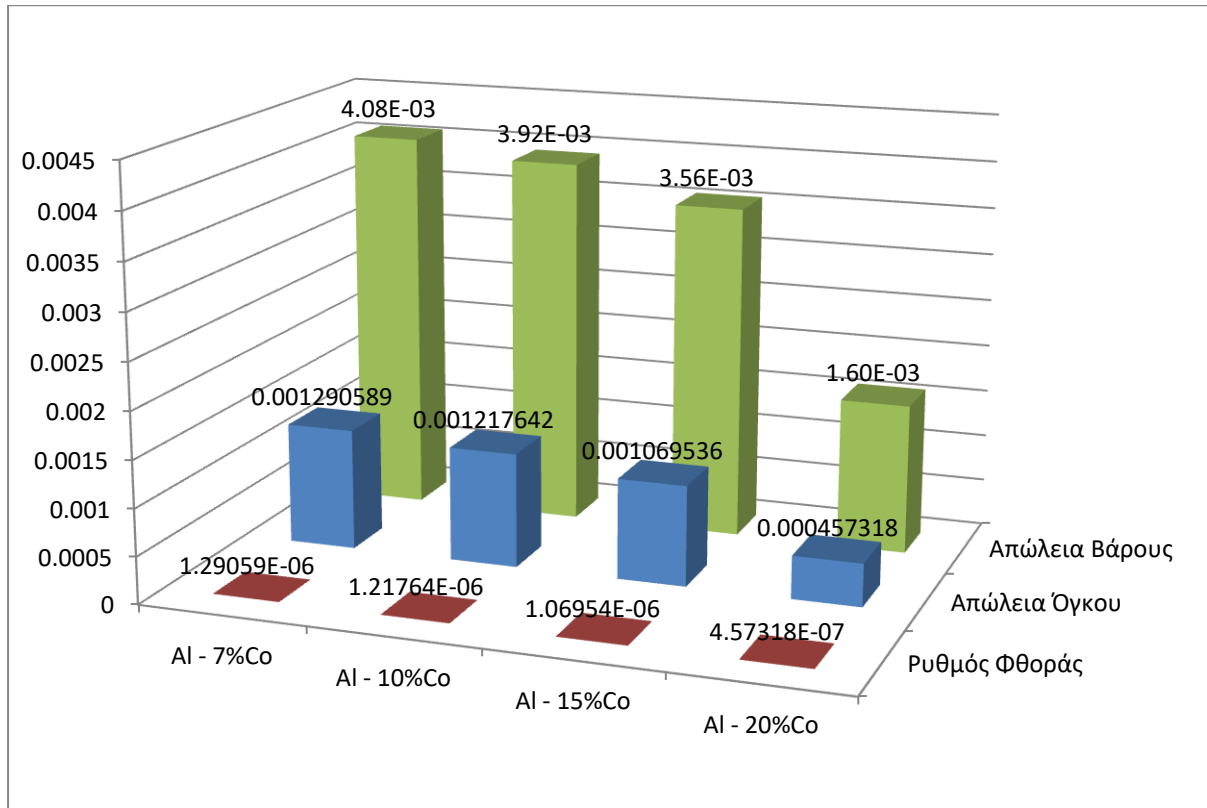
- Φορτίο : 1N
- Ταχύτητα ολίσθησης : 10 c / m
- Συχνότητα μέτρησης : 60 Hz
- Διάμετρος Σφαίρας : 6 mm
- Συνολική απόσταση ολίσθησης : 1000m

Τα δοκίμια ήταν σε περιβάλλον θερμού εγκιβωτισμού ώστε να είναι σε ελεγχόμενη θέση στο μηχάνημα φθοράς.

Η απώλεια μάζας μετρήθηκε κατά την αρχή και το πέρας της διεργασίας. Τα αποτελέσματα εξεργάστηκαν και παρουσιάζονται στην συνέχεια. Τα ποσοστά των φάσεων αλουμινίου και της ενδομεταλλικής ένωσης Al_9Co_2 υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα ImageJ. Την απώλεια όγκου μπορούμε να την υπολογίσουμε από τον κανόνα των μιγμάτων(27).

$$P = \rho_{Al} * \text{ποσοστό}_{Al} + \rho_{Al_9Co_2} * \text{ποσοστό}_{Al_9Co_2}$$

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.



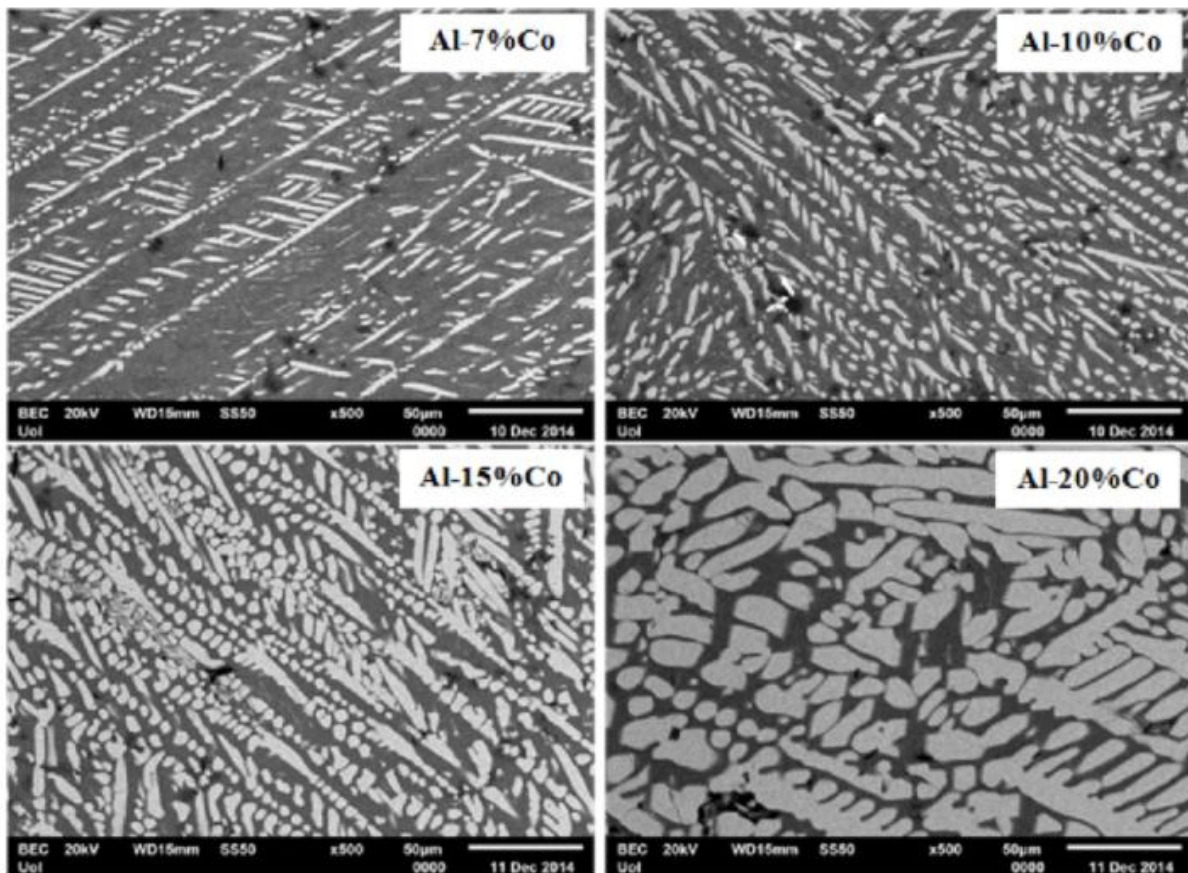
Σχήμα 15. Διάγραμμα με Ρυθμό Φθοράς , Απώλεια όγκου και Απώλεια βάρους λόγο φθοράς.

Στον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα παρατηρούμε τον ρυθμό φθοράς σε κάθε κράμα που δημιουργήθηκε. Παρατηρούμε ότι ενώ αρχικά (στα ποσοστά 7,10% κοβαλτίου) ο ρυθμός μειώνεται παρατηρείτε στην συνέχεια μικρή και στην συνέχεια μεγαλύτερη πτώση στον ρυθμό φθοράς. Με την προσθήκη κοβαλτίου έχουμε και αύξηση της φάσεως Al₉Co η οποία σε μεγαλύτερα ποσοστά γίνεται πιο ψαθυρό και σκληρό το υλικό. Γενικότερα προκαλεί βελτίωση στην αντίσταση σε φθορά του υλικού. Ο ρυθμός φθοράς και η απώλεια βάρους δείχνουν έντονα το συμπέρασμα αυτό.

Μηχανική Διάβρωση με ροή στερεών σωματιδίων.

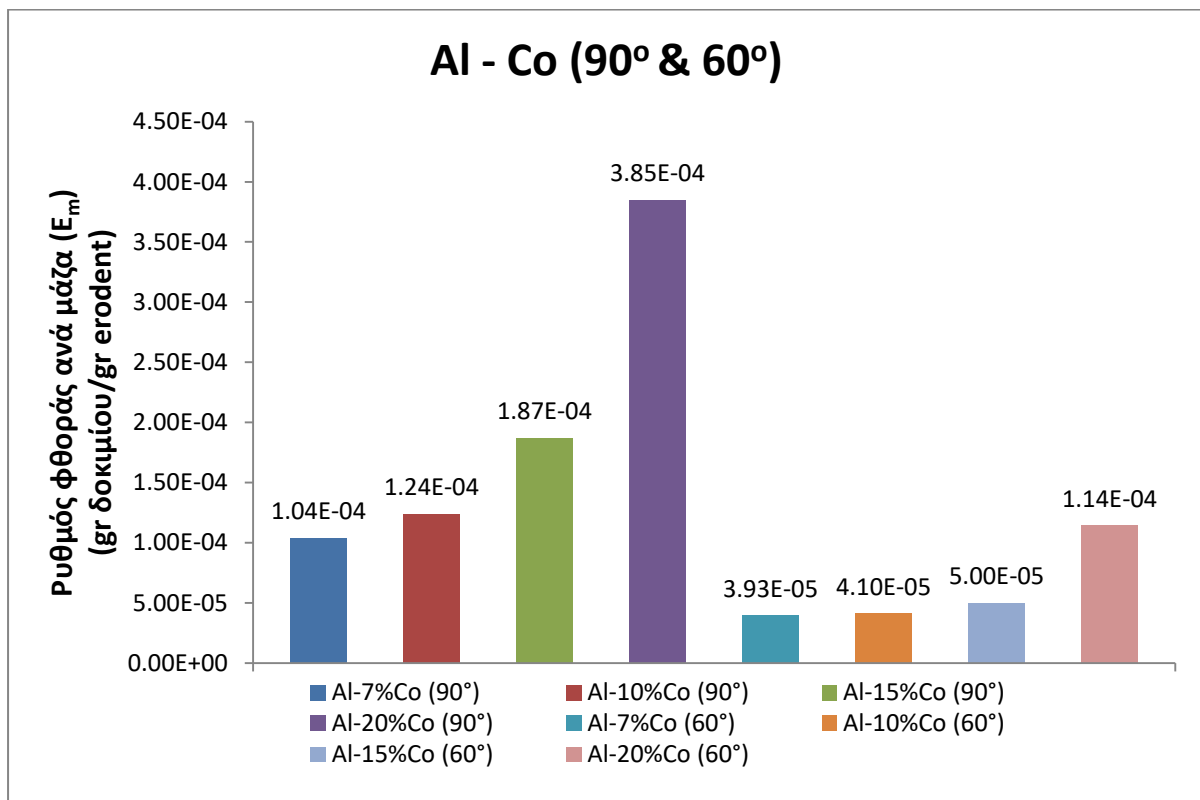
Τα πειράματα διεξήχθησαν σε γωνίες 60 και ενενήντα μοιρών χρησιμοποιώντας σωματίδια Al_2O_3 (170-250 μm) ως διαβρωτικό μέσο. Το ακροφύσιο τοποθετήθηκε σε απόσταση 10 +/- 1 mm και η πίεση με την οποία εκτοξεύονταν ήταν 3,5 bar. Ο κάθε ψεκασμός είχε χρονική διάρκεια 2 λεπτών της ώρας και διακόπτονταν ανά 10 δευτερόλεπτα για να μετρηθεί η απώλεια βάρους και να καταγράφει. Το διαβρωτικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε Al_2O_3 σε σωματίδια με γωνίες. Ο βαθμός διάβρωσης υπολογίστηκε από την απώλεια μάζας έναντι της διαβρωμένης μάζας (Linear regression analysis (least square methods)). Όλα τα κράματα απαρτίζονται από φάση Al_9Co_2 η οποία είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε ολόκληρη την μήτρα αλουμινίου. Ανεβαίνοντας το ποσοστό του κοβαλτίου, ανεβαίνει και το ποσοστό της Al_9Co_2 . (7,10,15,20%Co => 36,41,50,63%vol).

Στην μικροδομή των ποσοστών 7,10%Co φαίνεται να έχουμε σχεδόν παντού ευκτική με κατεύθυνση. Μια πιθανή αιτιολόγηση για αυτό θα ήταν ότι παρόλο που η χρησιμοποιούμενη σύνθεση είναι υπερευκτική, η άμεση ψύξη συμπιέζει το προ-ευκτικό στάδιο, μην αφήνοντας τους αρχικούς Al_9Co_2 κρυσταλλίτες να μεγαλώσουν. Στην περίπτωση του ποσοστού 15% Κοβαλτίου, η επίπεδη Al_9Co_2 φάση γίνεται να συνυπάρχει με μικρό ποσότητες $Al-Al_9Co_2$ ευκτική. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι Al_9Co_2 ευκτικές λωρίδες δεν είναι συνεχής. Στο ποσοστό 20% Κοβαλτίου η μορφολογία είναι διαφορετική. Στην ενδομεταλλική φάση παρατηρείτε τραχύτητα στα σωματίδια και στα πτερύγια.



Σχήμα 16. Μικροδομή Αλουμινίου Κοβάλτιο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.



Σχήμα 17. **Ρυθμός φθοράς ανά μάζα**

Είναι γνωστό ότι υπάρχει διαφορά στην απόκριση στα ψαθυρά και τα όλκιμα υλικά όταν μετρώνται συναρτήσει της γωνίας προοπτώσεως. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα (σχημα 2) το κράμα AlCo(7,10,15,20) ο ρυθμός φθοράς στις 90 μοίρες είναι αρκετά παραπάνω απ'ότι στις 60 μοίρες. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί διότι το ψαθυρό μέρος του μίγματος είναι πιο ευαίσθητο σε κάθετες δυνάμεις (δυνάμεις κρούσης). Ακόμα, είναι προφανές ότι στην κατάσταση των 90 μοιρών το υλικό δέχεται εν συνόλω την ενεργεία που έχουν αποκτήσει οι κόκκοι που χρησιμοποιούμε και κατά συνέπεια διεισδύουν σε μεγαλύτερο βάθος στο υλικό.

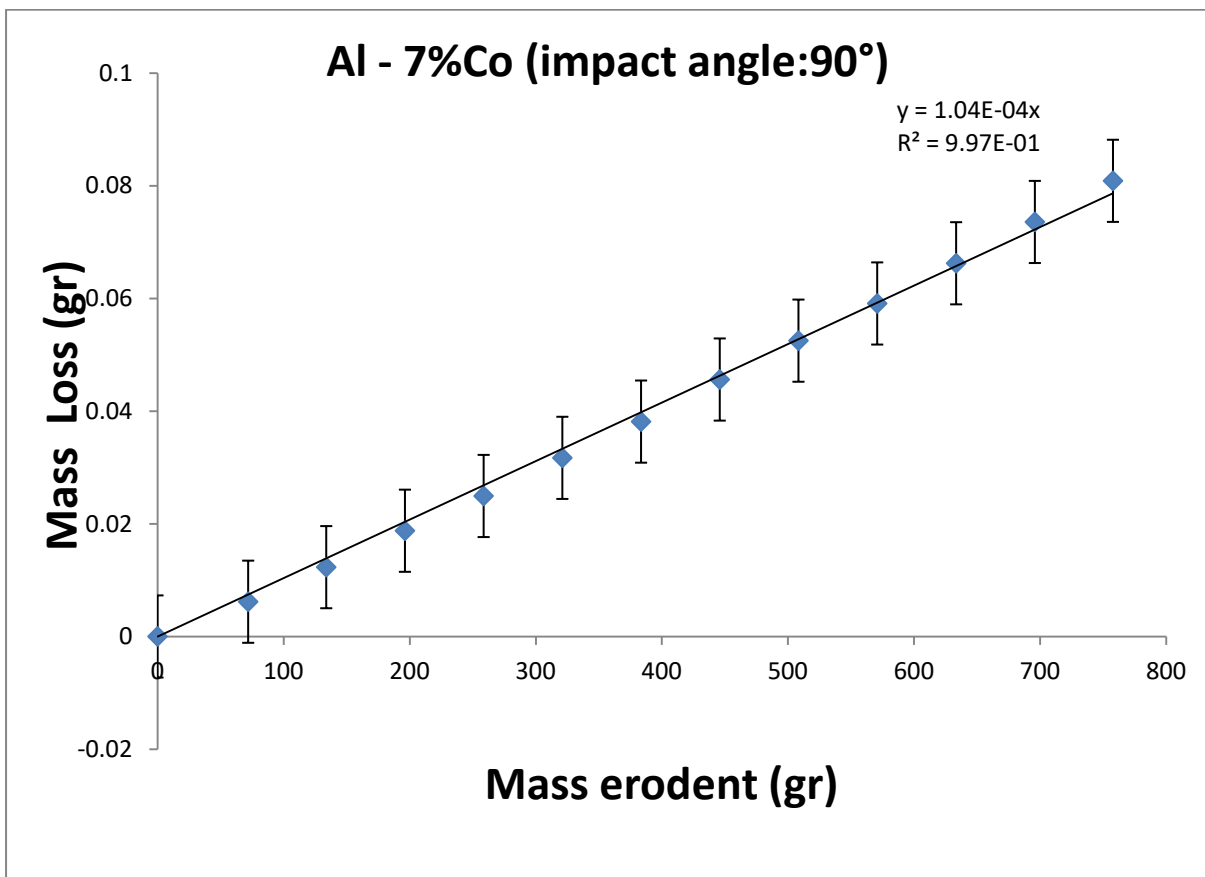
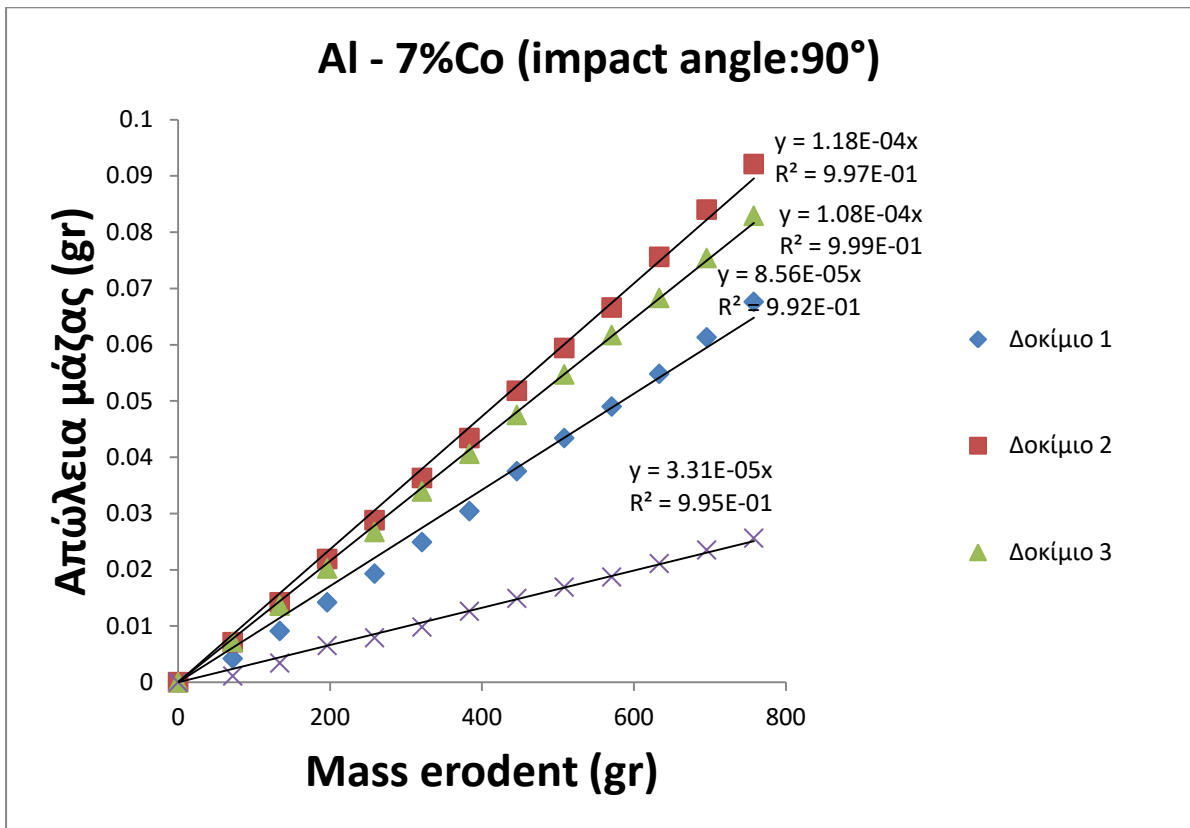
Καθώς ανεβαίνει το ποσοστό του κοβαλτίου, έχουμε και αξιοσημείωτη αύξηση στον ρυθμό μηχ. Διάβρωσης. Ειδικότερα στο Al20%Co-60 στο οποίο μετά από ανάλυση της μικροδομής μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση της τραχύτητας και του αριθμού στην Al9Co2 (σε σύγκριση με το Al7%Co στο οποίο η δομή του ήταν πολύ πιο ομοιόμορφη και πιο λεπτή). Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυξάνεται η ευθραυστότητα του μίγματος.

Η μικρότερη αύξηση σε κοβάλτιο στο κράμα, έχει σαν αποτέλεσμα τον μικρότερο ρυθμό φθοράς. Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα και στις δυο γωνίες που προσπίπτουν στο κράμα, η διάφορα του 15%κοβαλτιο από το 20% κοβάλτιο είναι υπερδιπλάσια. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την σημαντική αύξηση στην τραχύτητα των πλακών Al9Co2 όπως σχολιάστηκε από το παραπάνω σχημα 2. Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων) εφαρμόστηκε στα δεδομένα (απώλεια μάζας – Mass Erodent) μέσω του

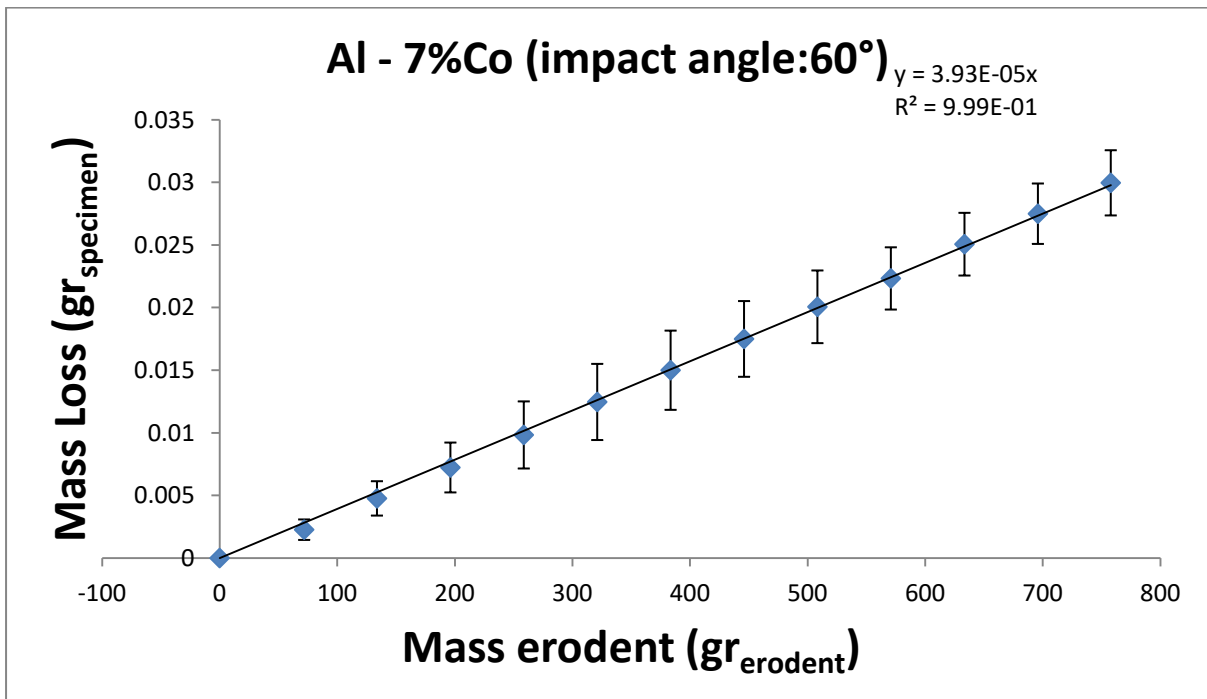
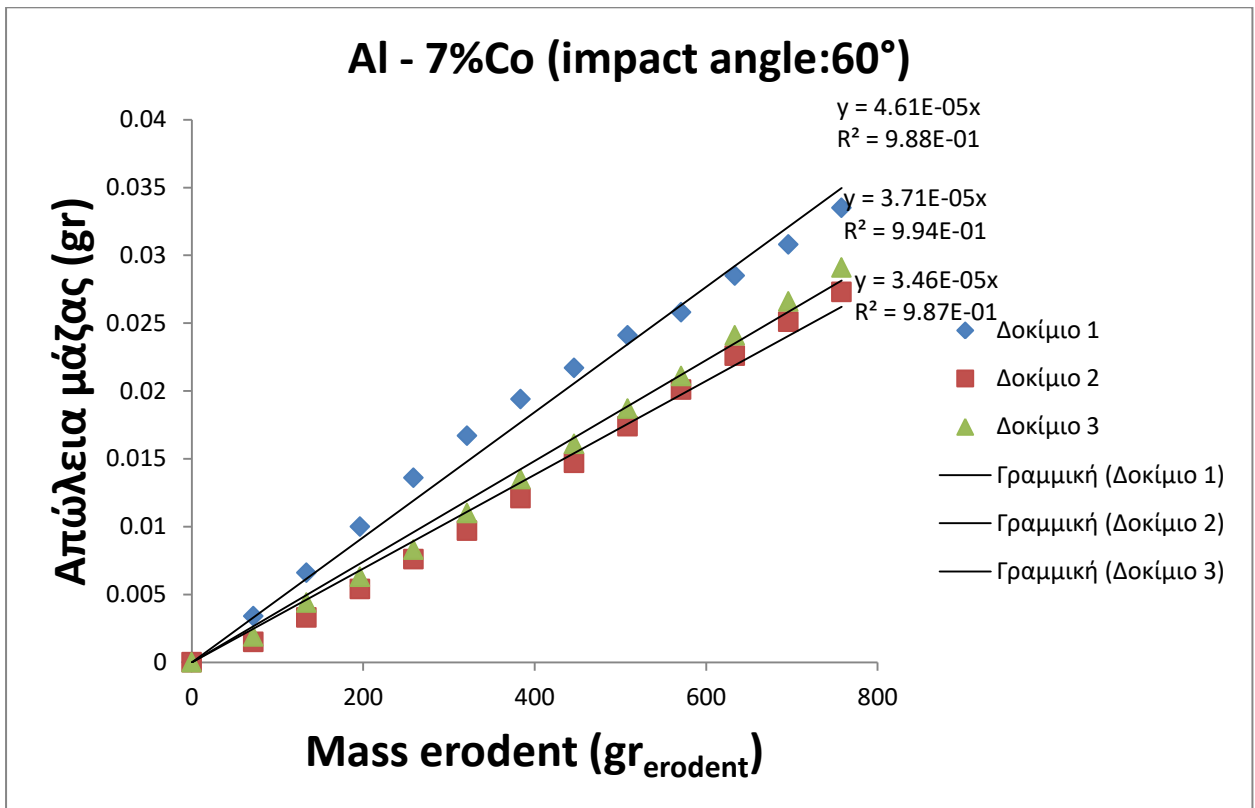
προγράμματος Microsoft Excel (Linest,Trend) λειτουργίες εκτός εάν στην γραμμική προσαρμογή των δεδομένων ο συντελεστής παλινδρόμησης ήταν μεγαλύτερος από 0.98

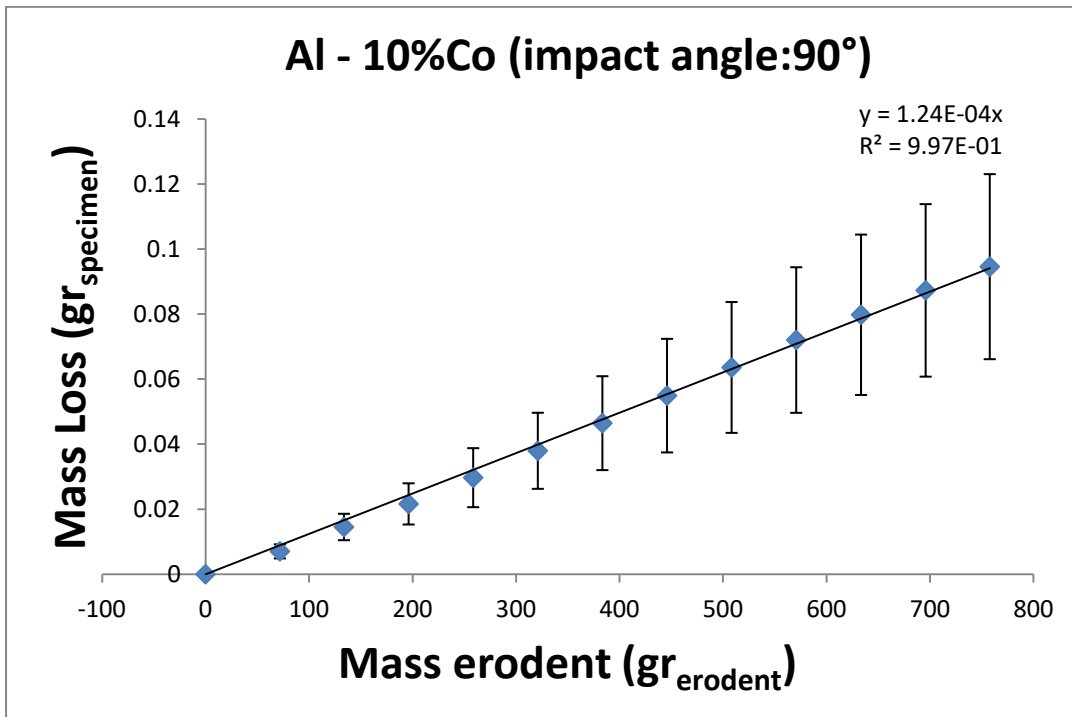
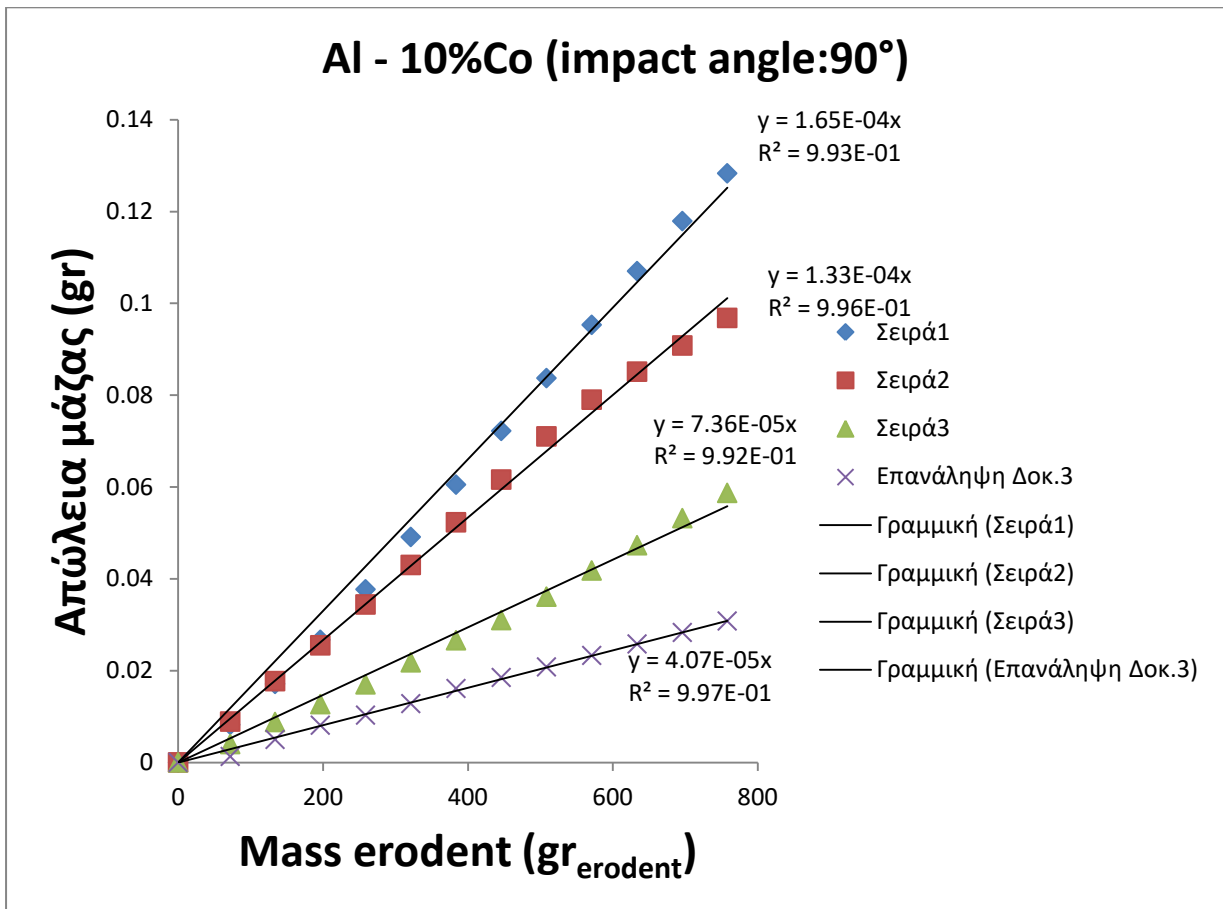
ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΡΟΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

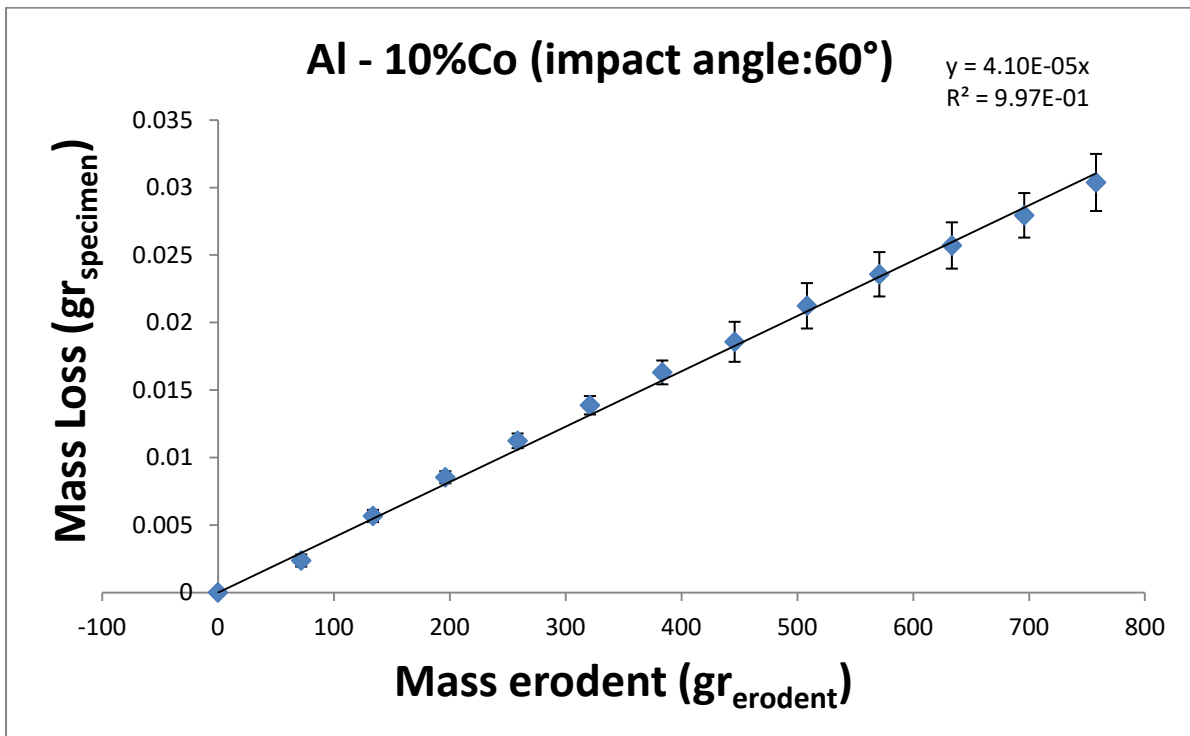
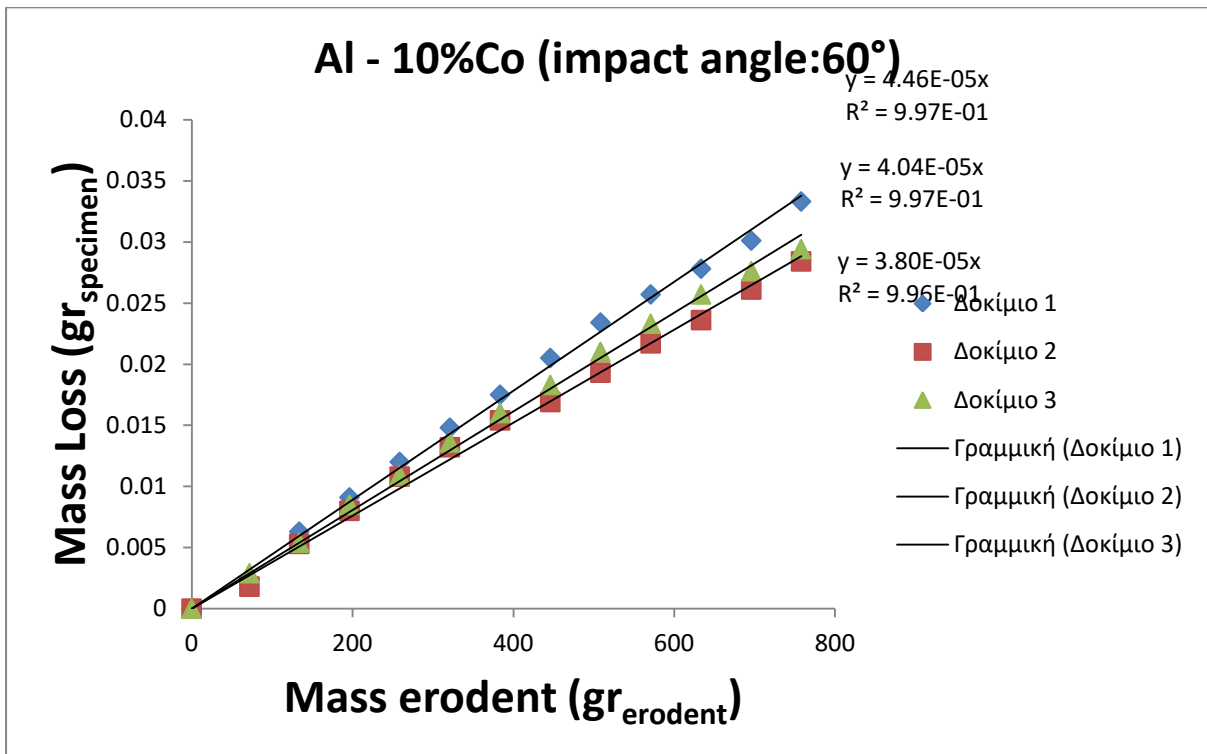
Στην συνέχεια ακολουθούν γραφήματα που εξηγούν τα αποτελέσματα και την επεξεργασία που υπέστησαν για να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά στο σχήμα 15. Τα γραφήματα παρουσιάζουν την απώλεια μάζας του εκτιθέμενου υλικού (δοκίμιο) συναρτήσει του βάρους του διαβρωτικού μέσου.

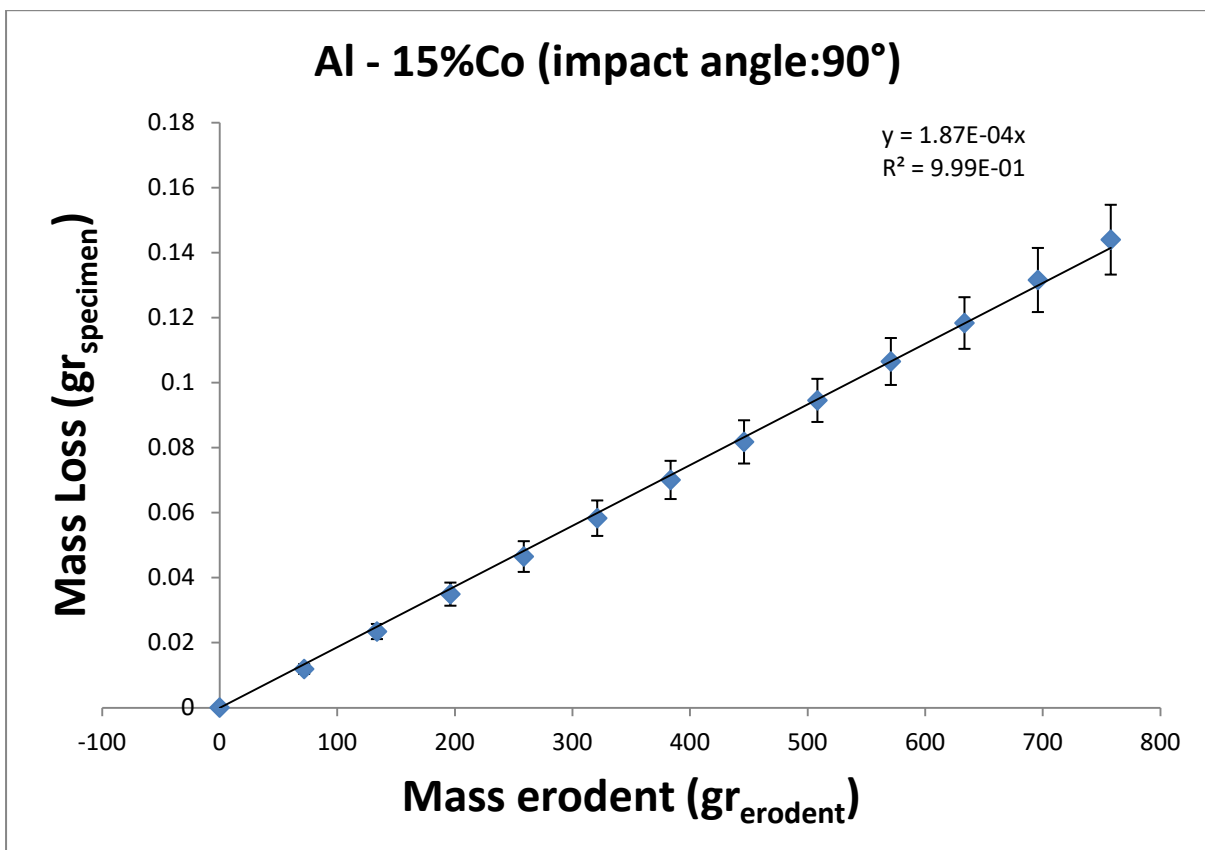
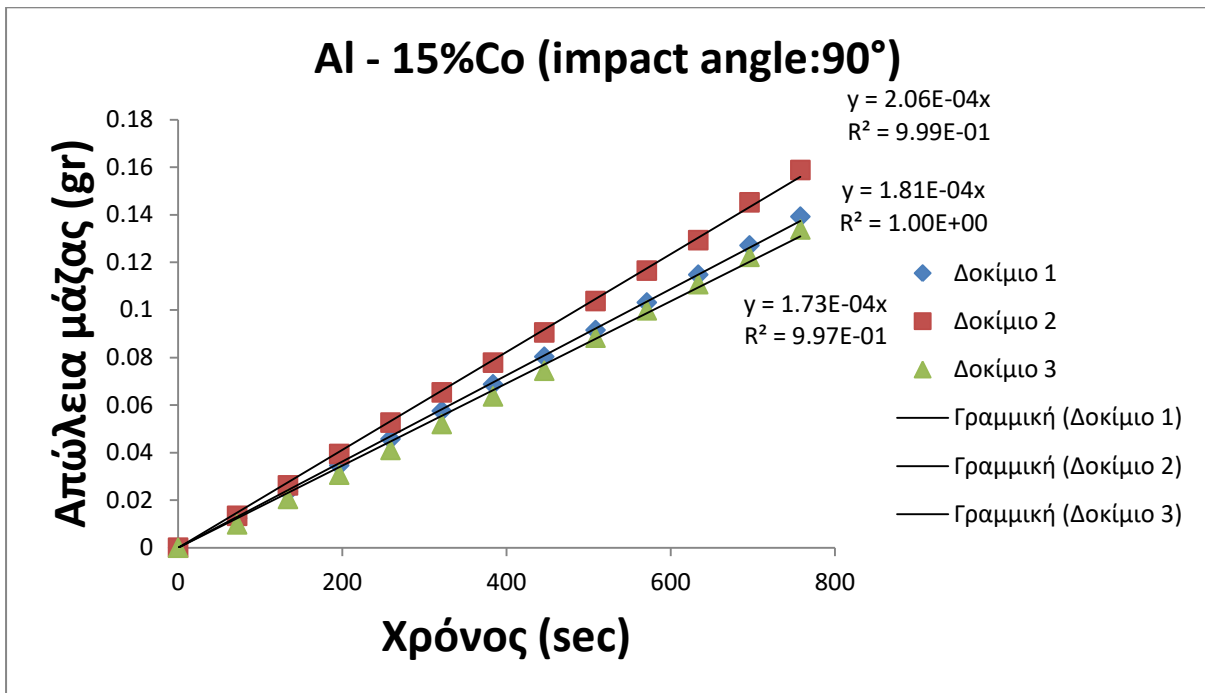


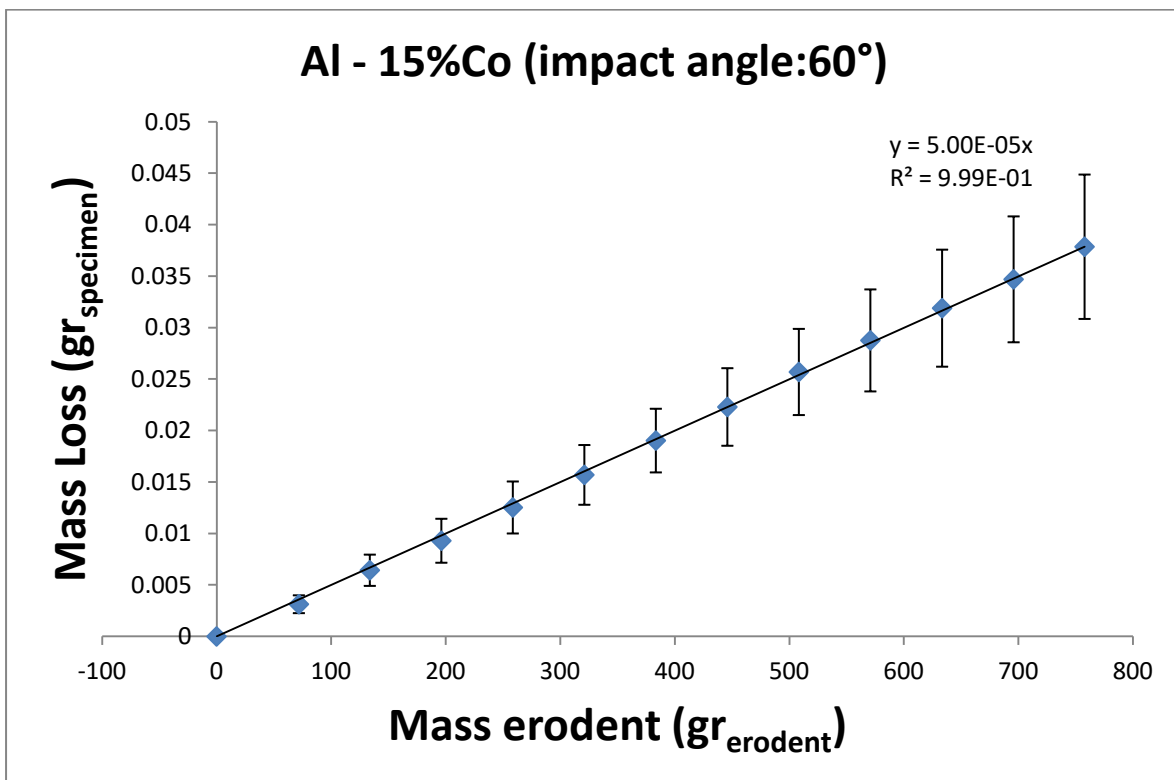
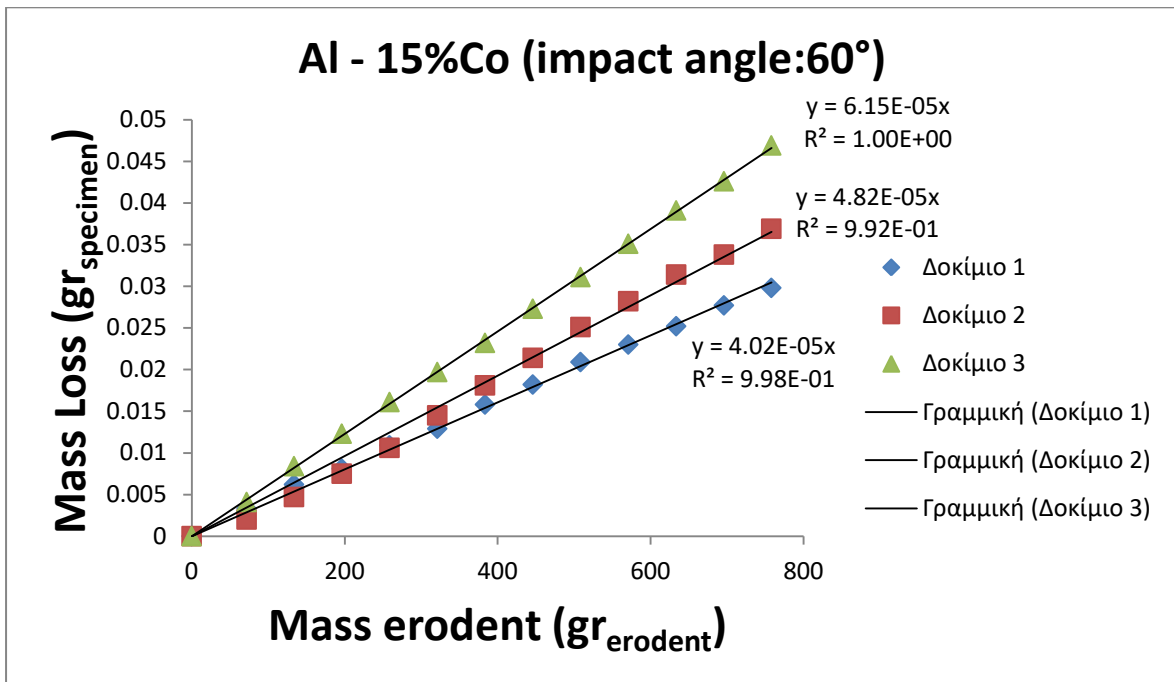
Σχήμα 18. Γράφημα απώλειας μάζας – Mass Erode

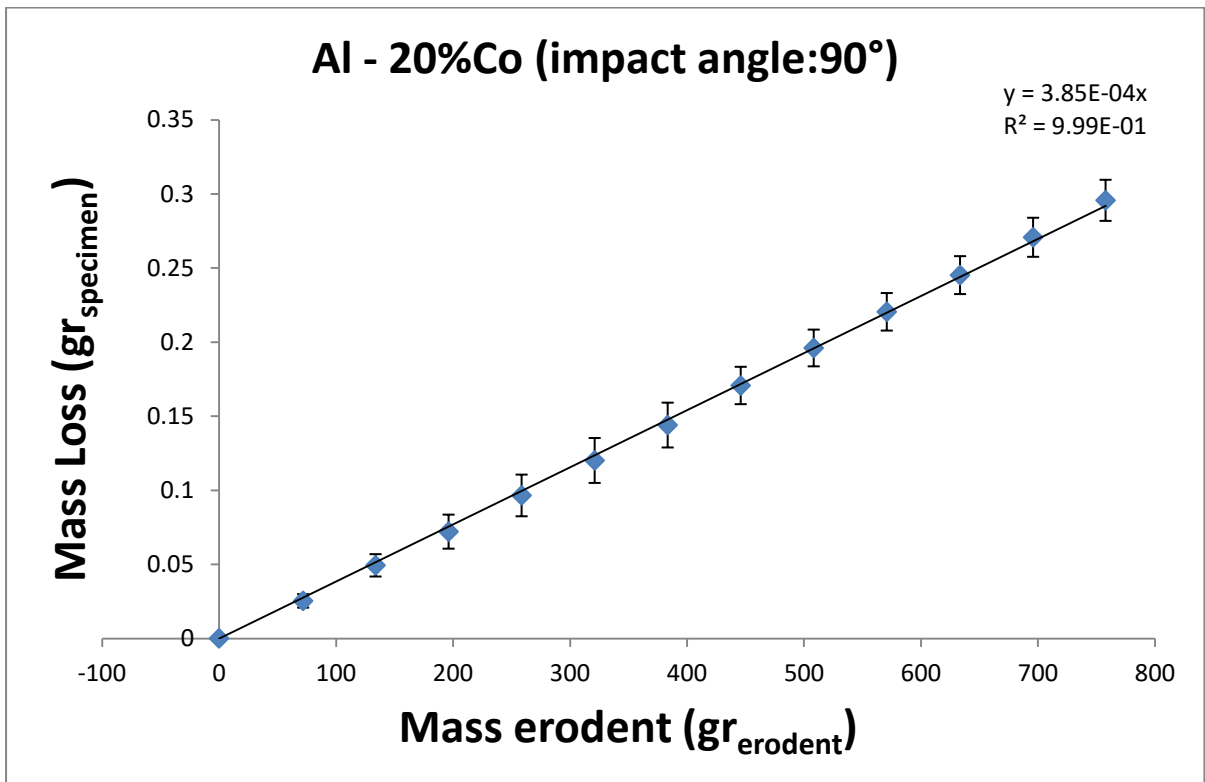
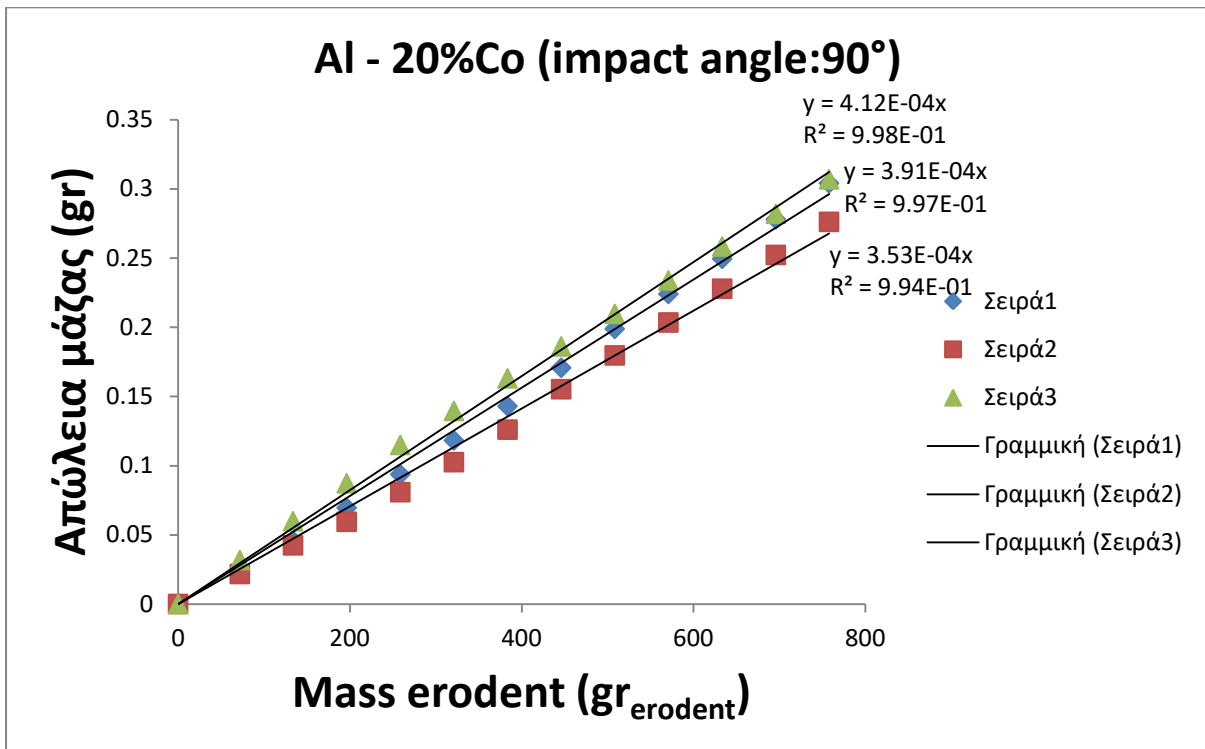




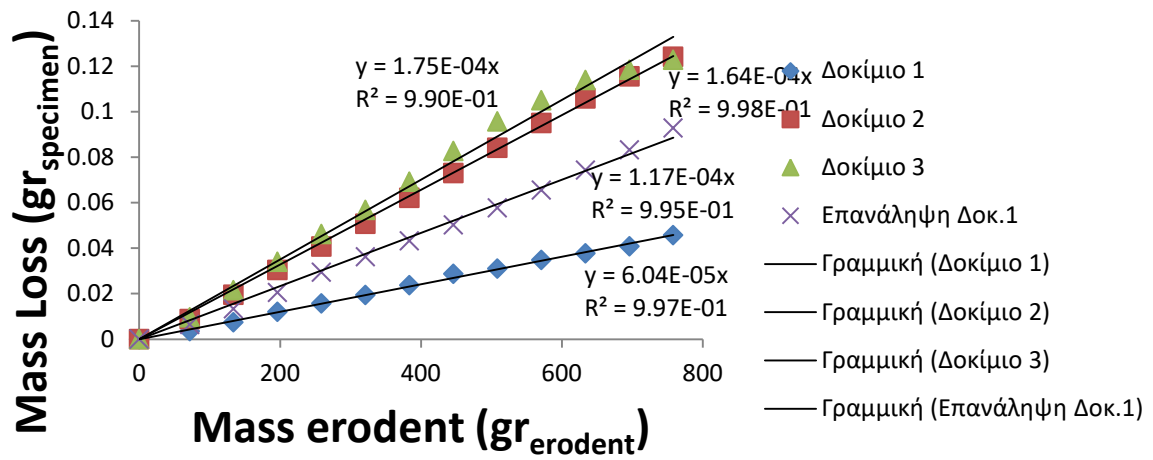




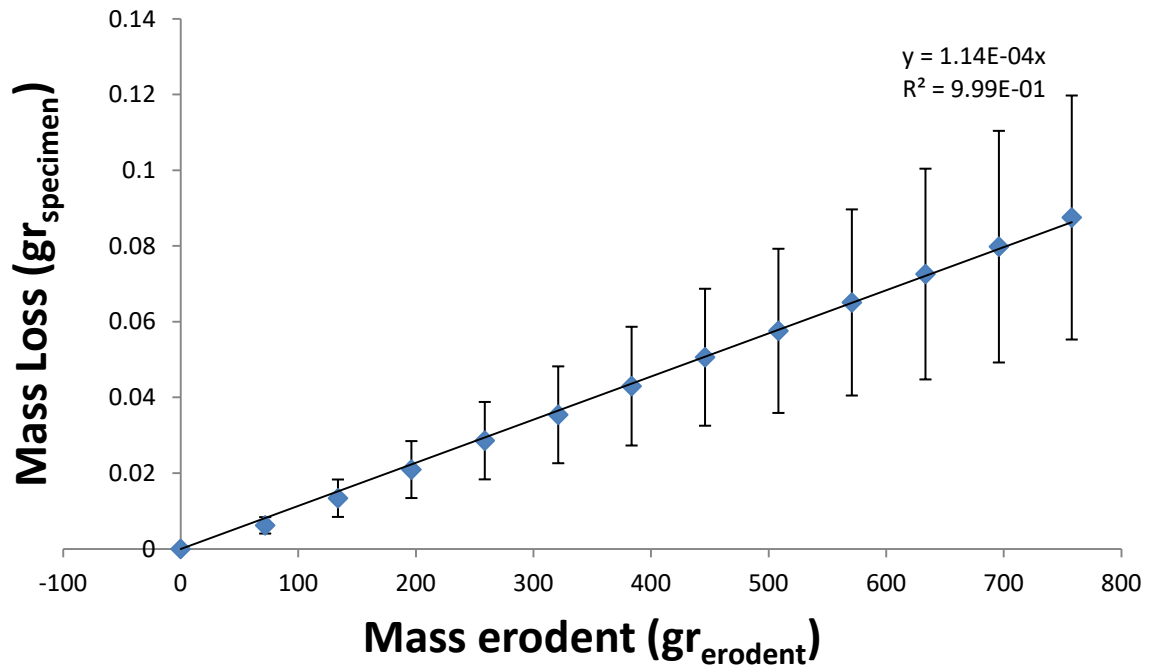


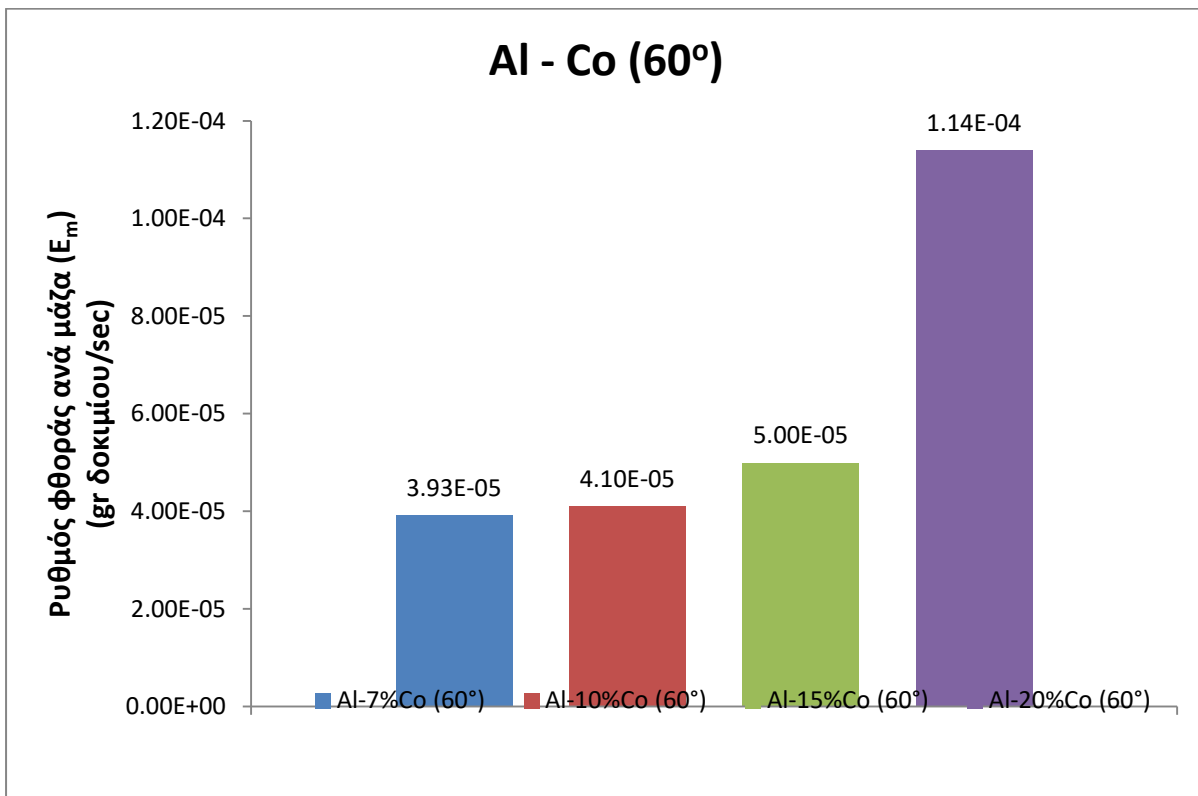
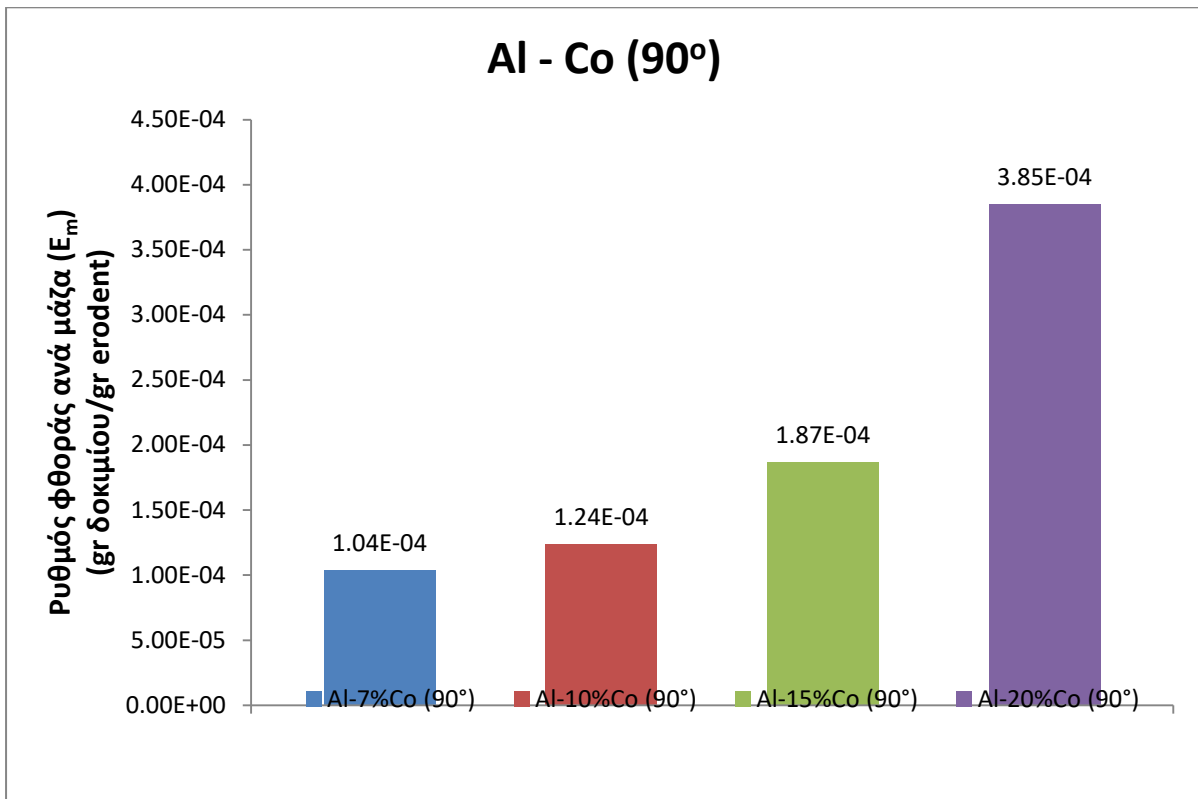


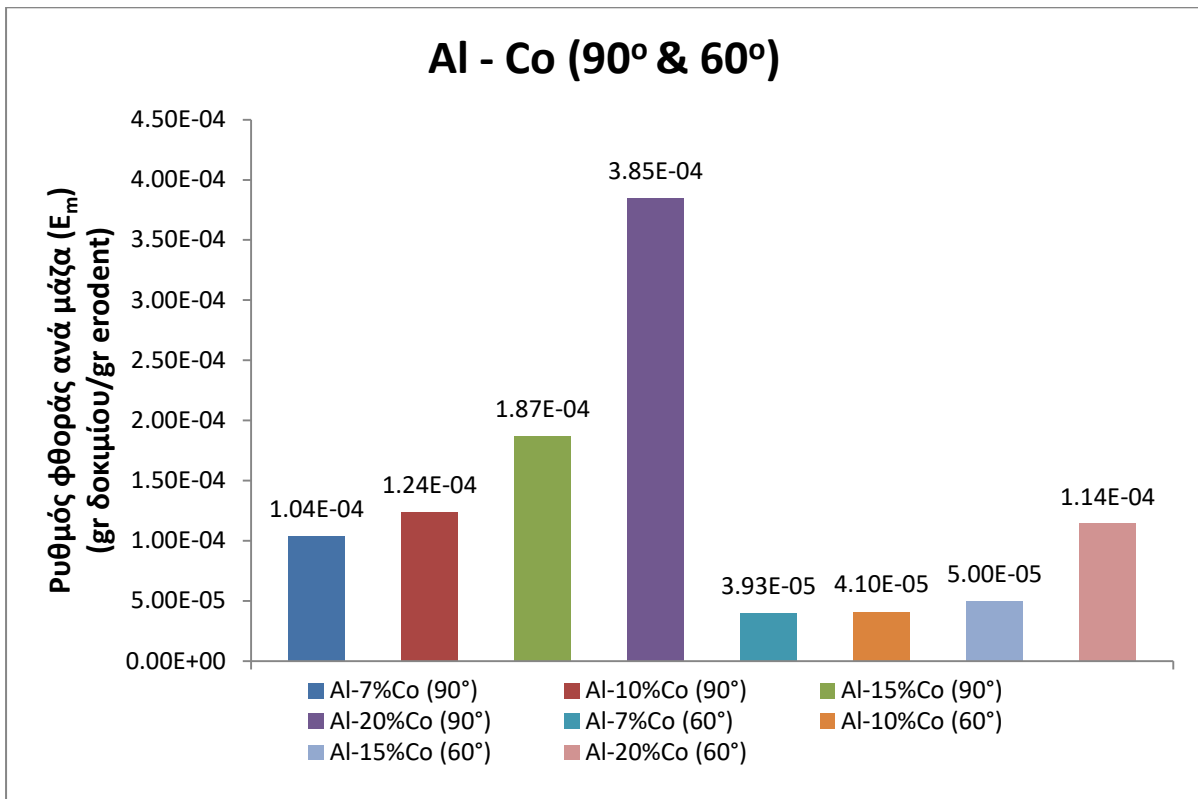
Al - 20%Co (impact angle:60°)

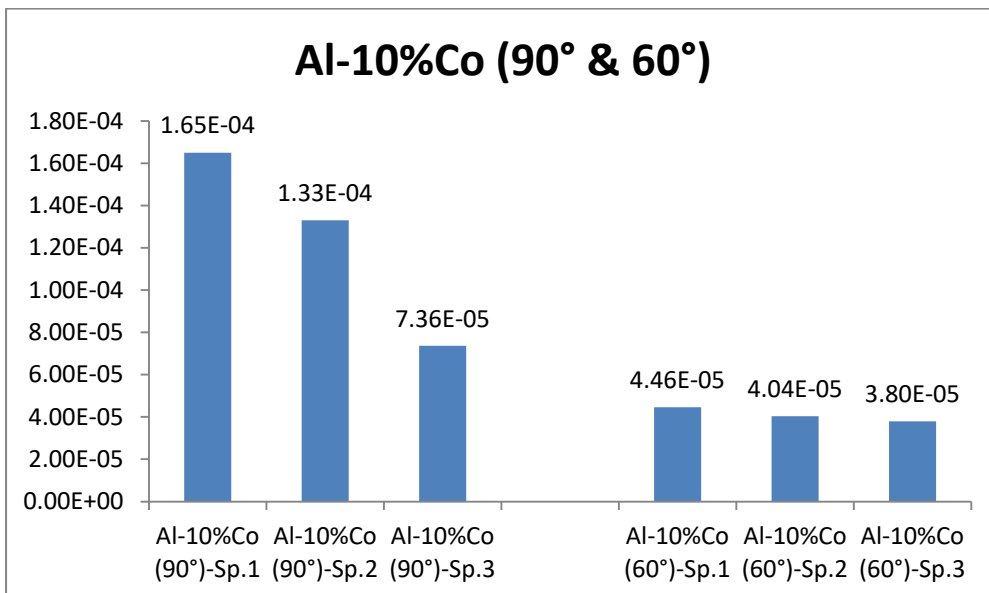
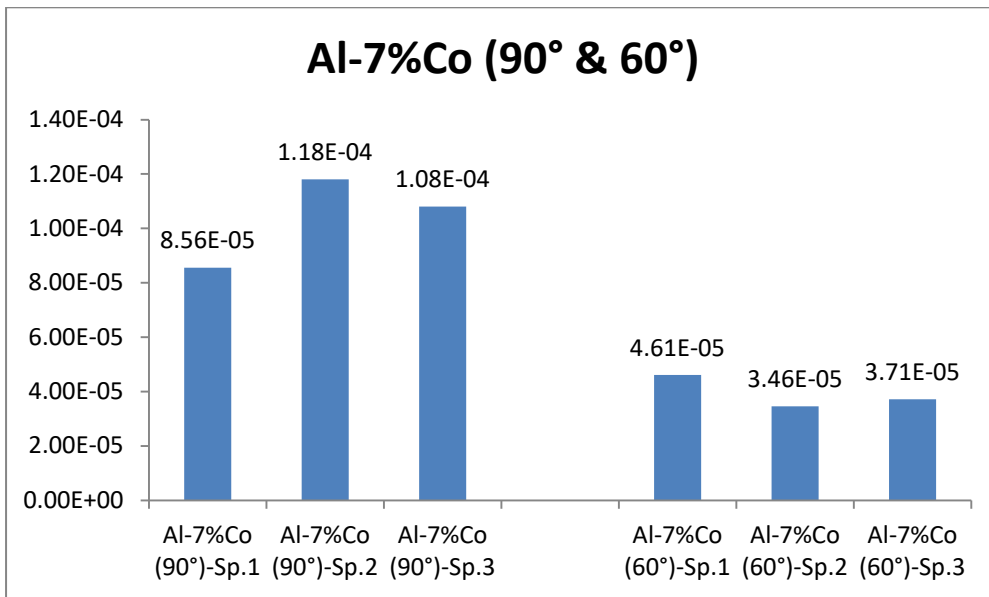


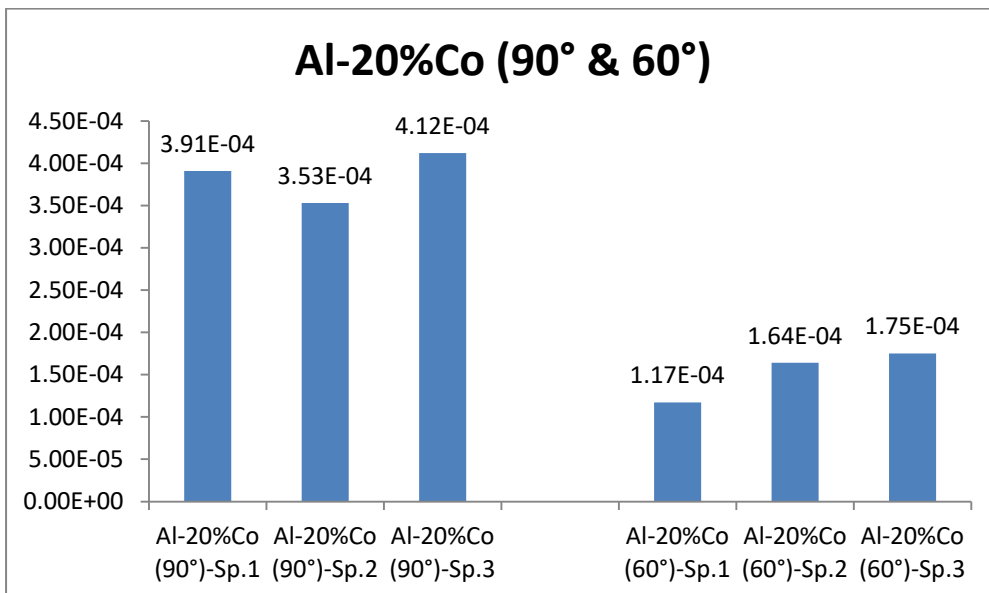
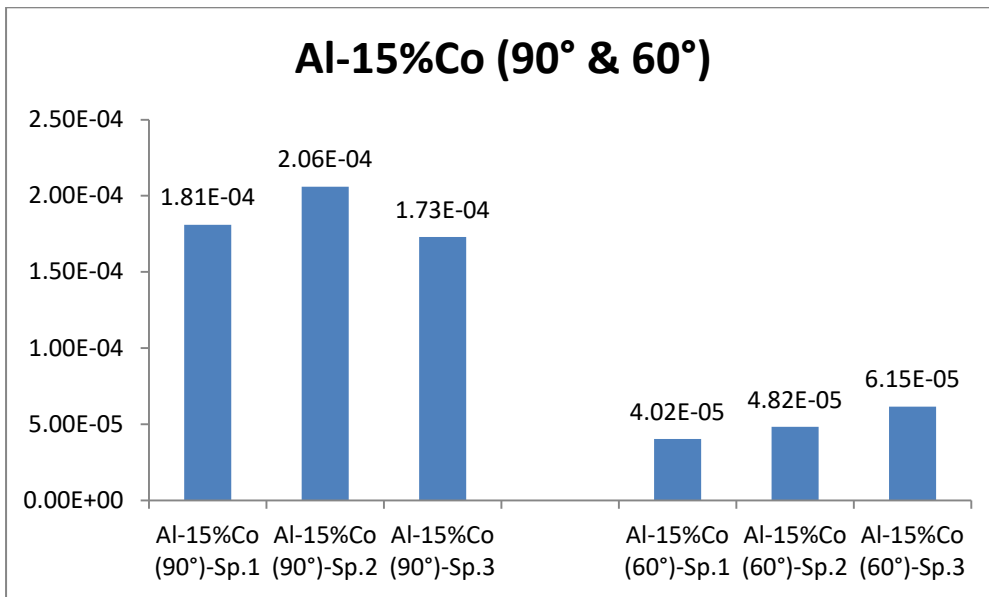
Al - 20%Co (impact angle:60°)











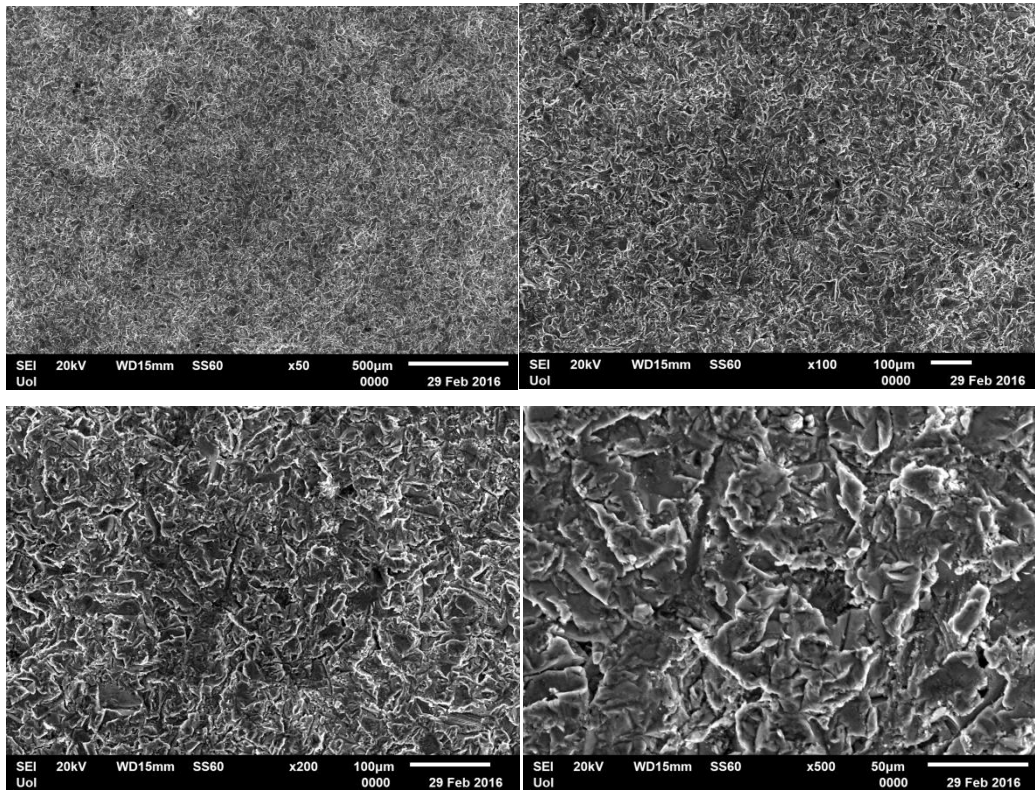
Στην συνέχεια θα παρατηρήσουμε μικροδομές σε τομές του κράματος σε διάφορες ποσοστώσεις μετά από την μηχανική διάβρωση καθώς και edx elemental mapping και ανάλυση edx της φάσης Al_9Co_2

Μορφολογία μετά την Διαβρωση

Η μορφολογία που παρατηρούμε στα κράματα $Al\ X\%Co$ (7/10% κοβαλτίου) είναι αυλακώσεις (βαθιούς λάκκους, αυλάκια) και κρατήρες το οποίο είναι χαρακτηριστικό πλαστικών παραμορφώσεων. Όσο περισσότερο αυξάνεται το κοβάλτιο χάνεται η ολκιμότητα του υλικού. Ωστόσο θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι διαφορές είναι αρκετά μικρές και θα πρέπει κάποιος να έχει μεγάλη εμπειρία για να μπορεί να τις παρατήρει. Όσο αυξάνεται το ποσοστό του κοβαλτίου έχουμε , ενδυναμώνει της φάσης Al_9Co_2) τα στρώματα επιφανείας γίνονται πιο σκληρά και περιορίζουν τις πλαστικές παραμορφώσεις. Κατά συνέπεια το υλικό μας οδηγείτε σε μια πιο ψαθυροί κατάσταση. Ακόμα θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι πόροι οι οποίοι βρίσκονται στις πλάκες της τραχιάς φάσεως Al_9Co_2 συνεφέρει στον ρυθμό φθοράς λόγω των σημείων που συγκεντρώνουν τάσεις και δημιουργούν ρωγμές.

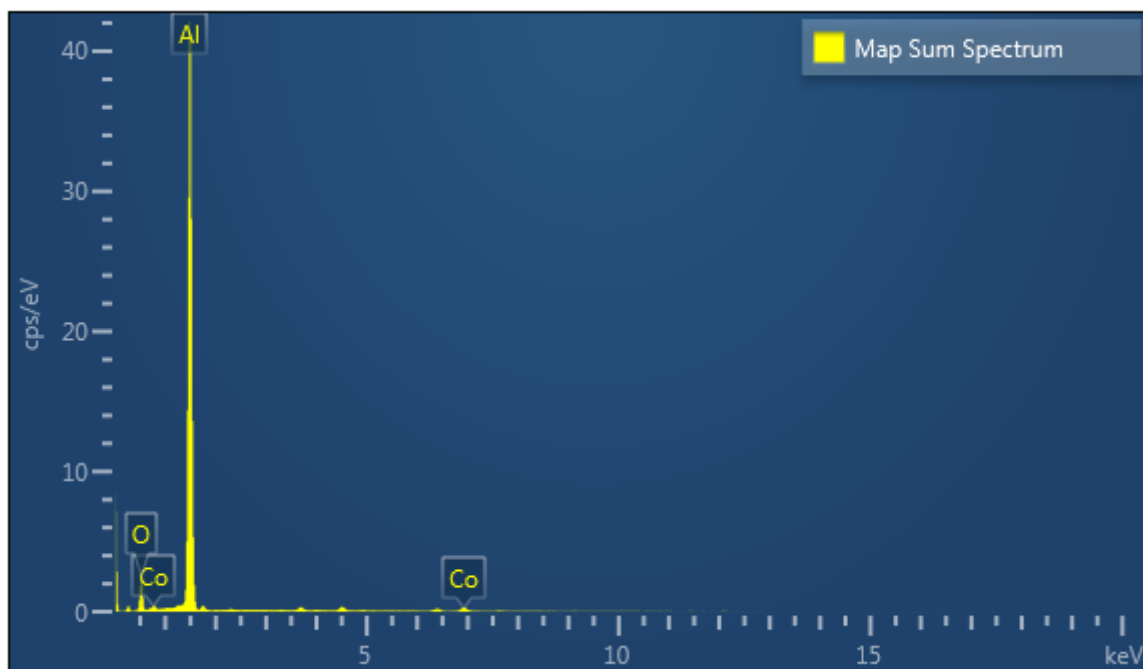
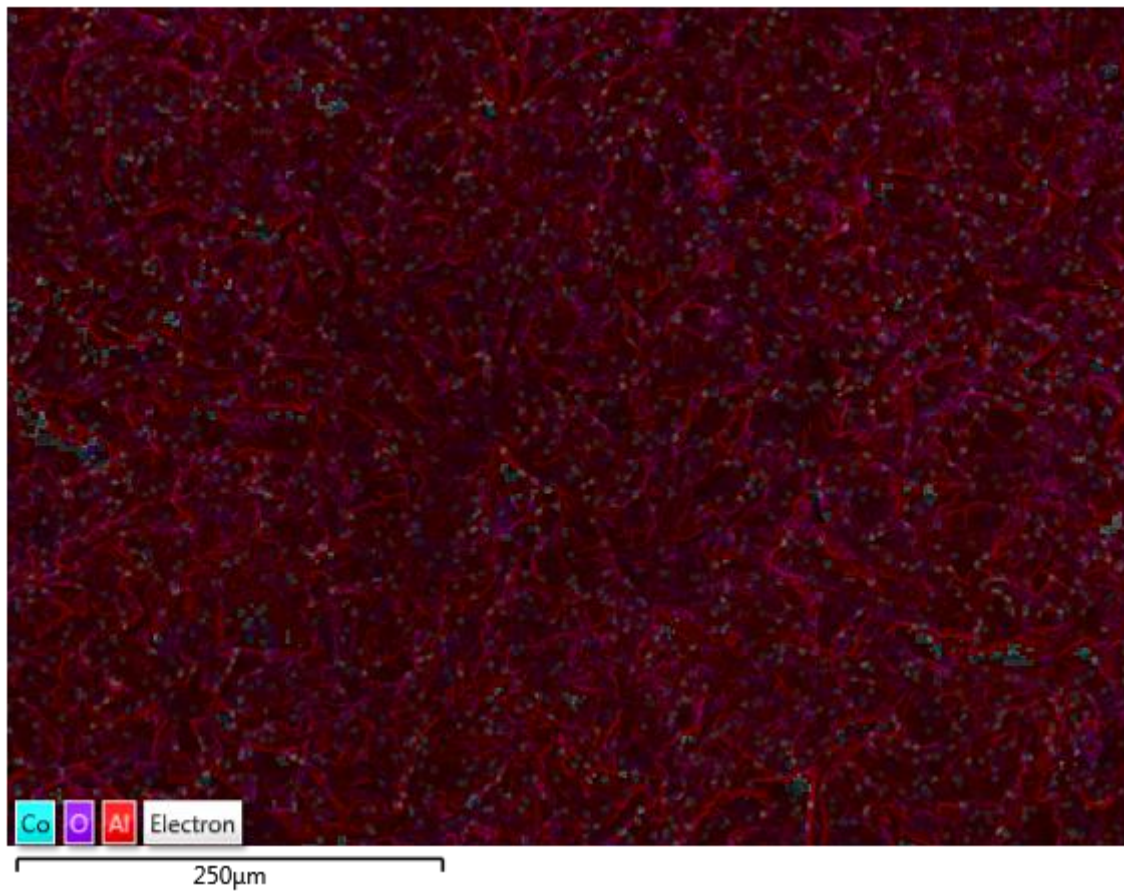
Για να εξηγηθεί καλύτερα η μηχανική διάβρωση θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι στην περίπτωση των 60 μοιρών εμπεριέχει την δύναμη και της εξωτερικής επιφάνειας του δοκιμίου αλλά και του υποστρώματος του. Όταν η σφαίρα κρούει το δοκίμιο δημιουργεί έναν κρατήρα και μια περιοχή όπου έχουμε συσσωμάτωση του υλικού λόγω της γωνίας που προσπίπτει ενώ κάποια άλλα σωματίδια δημιουργούν ένα χείλος στο υλικό. Το υλικό αυτό που έχει συσσωματωθεί εκεί θα φύγει πιθανότατα την επόμενη φορά που θα χουμε επαφή με σφαίρα.

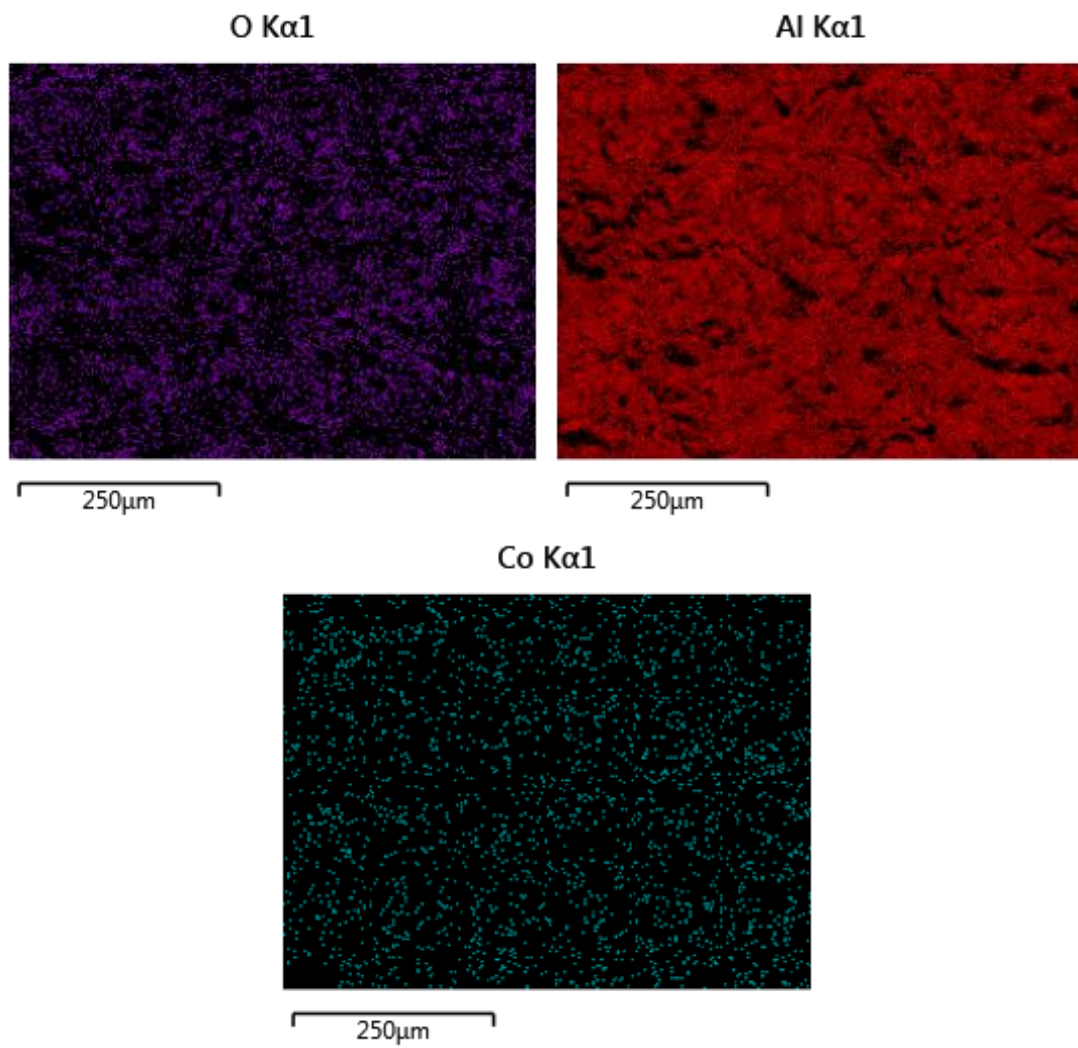
Στην περίπτωση των ενενήντα μοιρών γωνίας, τα πράγματα είναι διαφορετικά. Κυρίως συναντάμε κρατήρες οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί με πλαστική παραμόρφωση. Υπάρχουν και κάποιοι άλλοι μηχανισμοί παραμόρφωσης όπως χαμηλή φθορά κοπώσης, ψαθυρή συμπεριφορά λόγω σκλήρυνσης. Ωστόσο όταν εισέρχονται ποσοστά κοβαλτίου στο υλικό αυξάνεται και το CMA (Al_9Co_2) η εξωτερική επιφάνεια γίνεται πιο σκληρή και η πλαστικές παραμορφώσεις περιορίζονται. Ακόμα, με την αύξηση του ποσοστού κοβαλτίου η φάση Al_9Co_2 γίνεται πιο τραχιά συνεισφέρει στην πιο ψαθυρη κατάσταση. Επιπλέον κάποιοι πόροι που υπάρχουν στην τραχιά φάση Al_9Co_2 πλάκες και οξείες ακμές στις λεπίδες δημιουργούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων που κατά συνέπεια δημιουργούν ρωγμές. Επιπρόσθετος μεγαλώνουν και τα σημεία τομής μεταξύ δενδριτών και των ενωσών τους. (Το οποίο μπορούμε να το παρατηρήσουμε στο ποσοστό 20% πιο εύκολα).



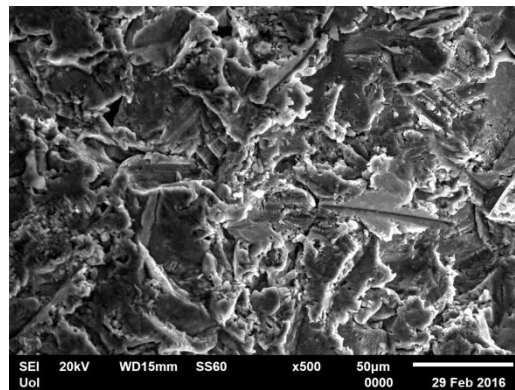
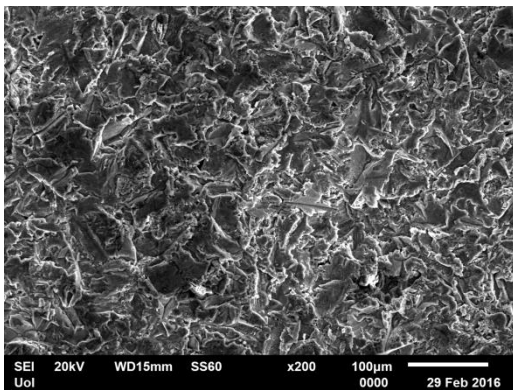
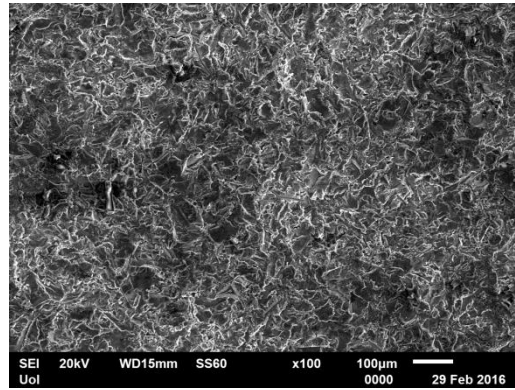
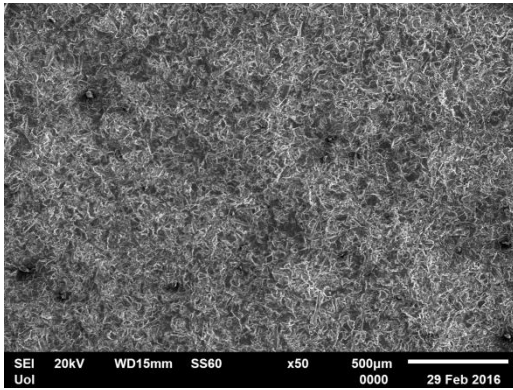
Εικόνα 12. Η μικροδομή του κράματος Al-7%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 8



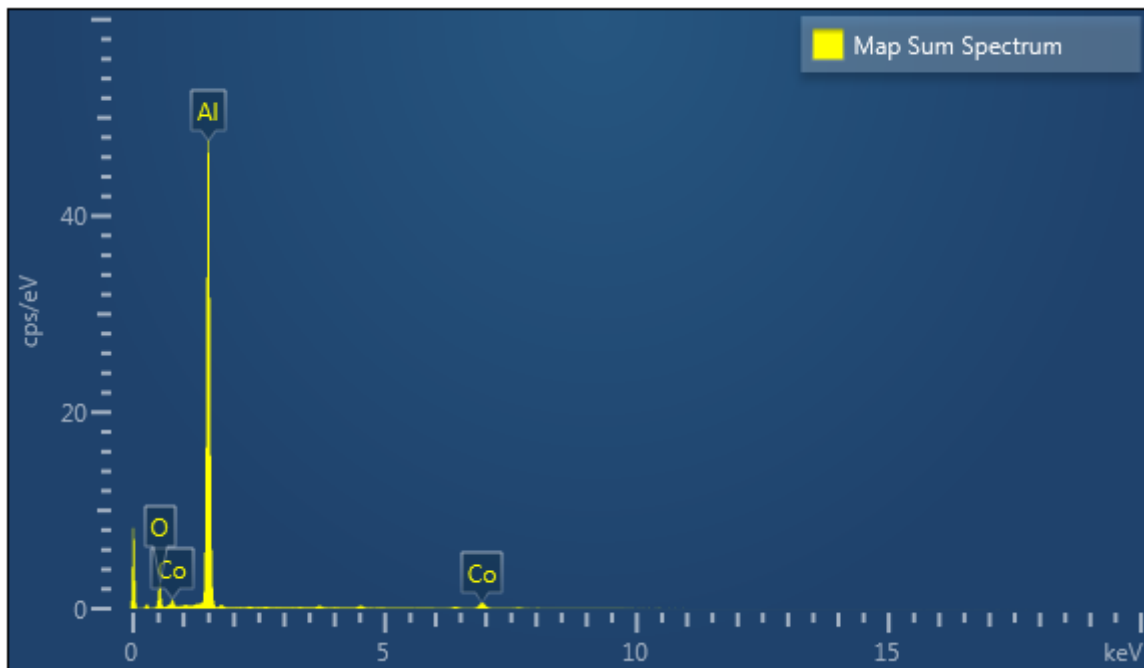
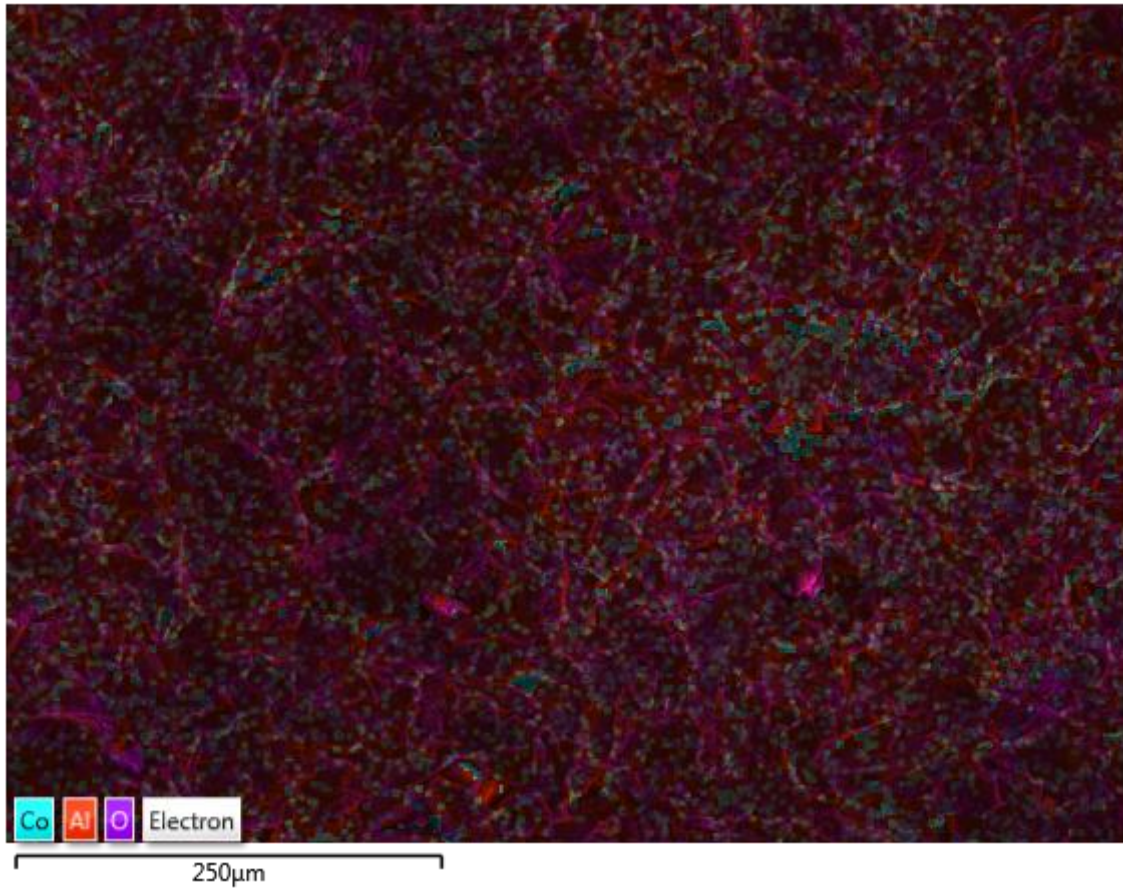


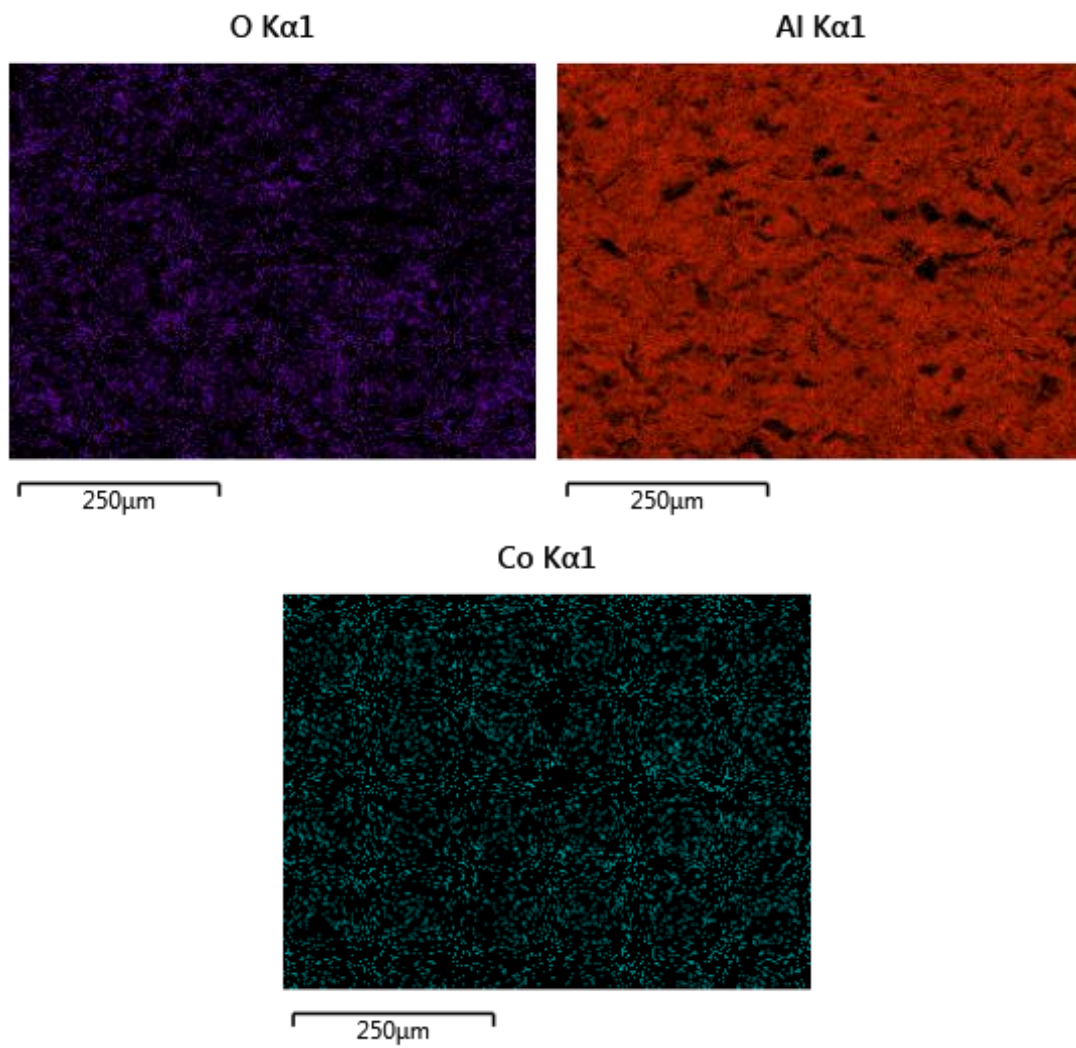
Εικόνα 13. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-7%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90°.



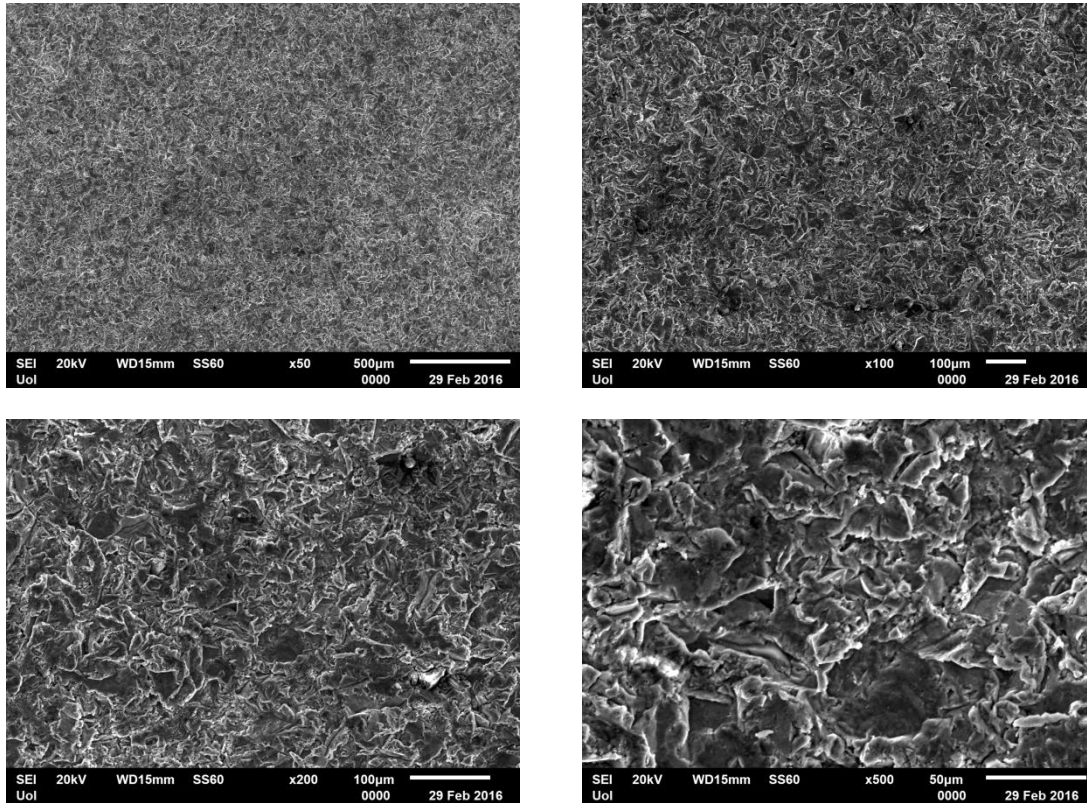
Εικόνα 14. Η μικροδομή του κραματος Al-7%Co μετά το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 7



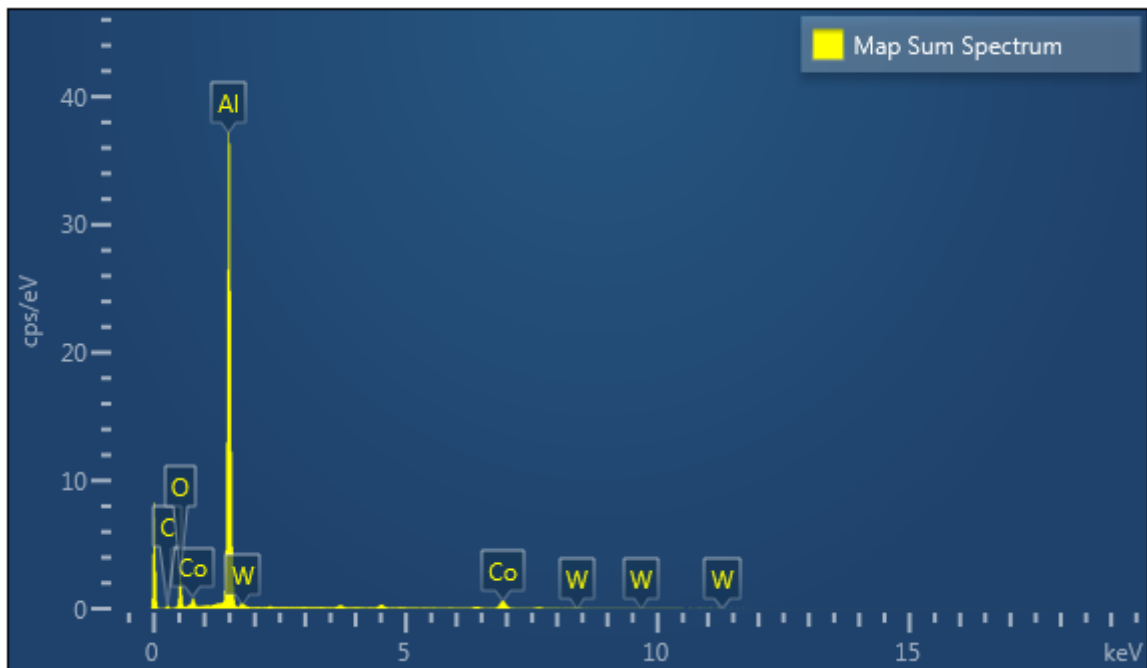
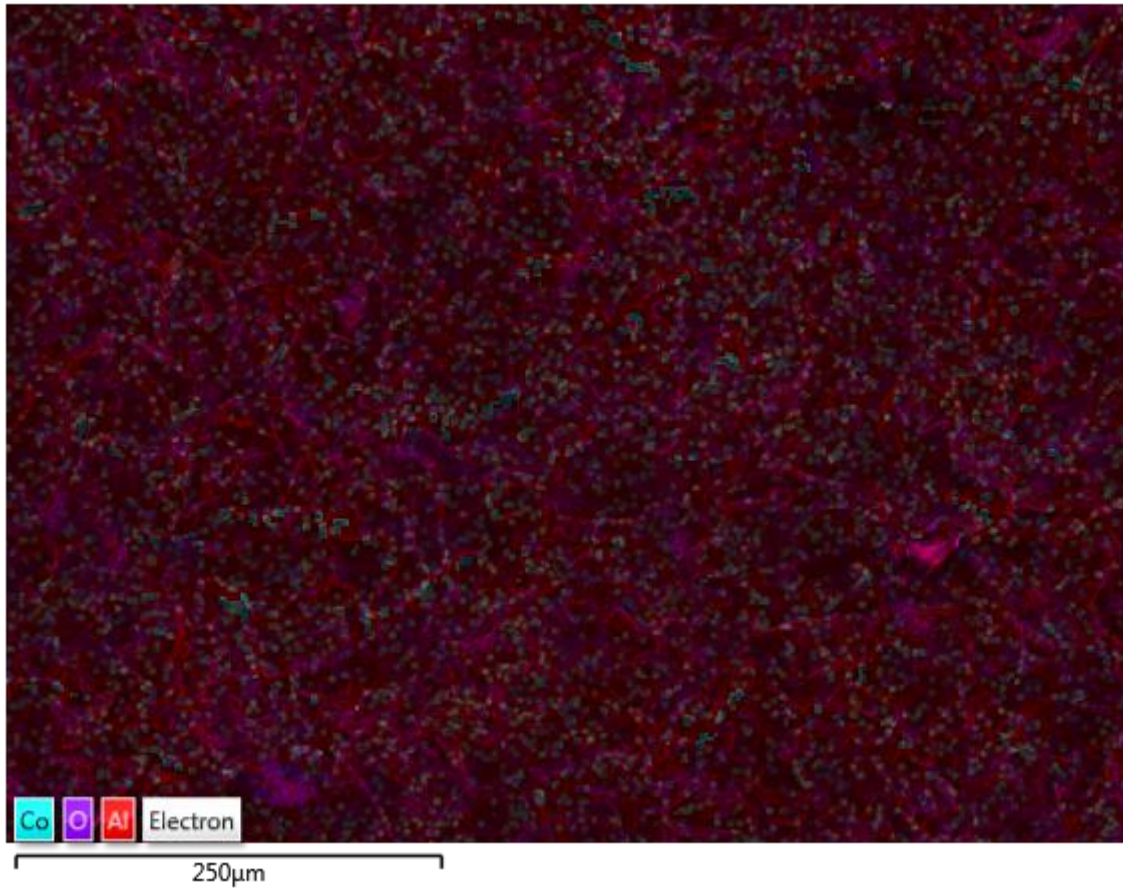


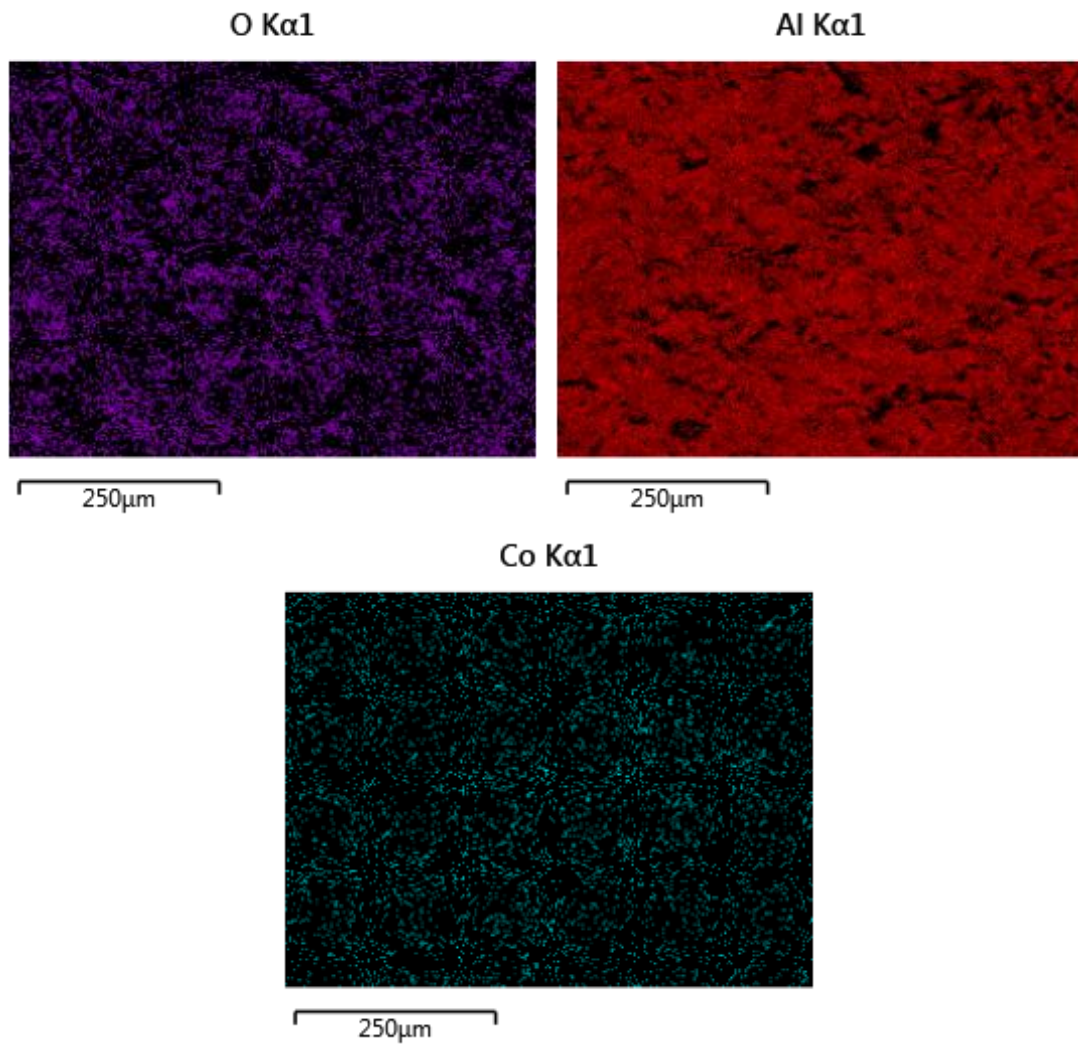
Εικόνα 15. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-7%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60°.



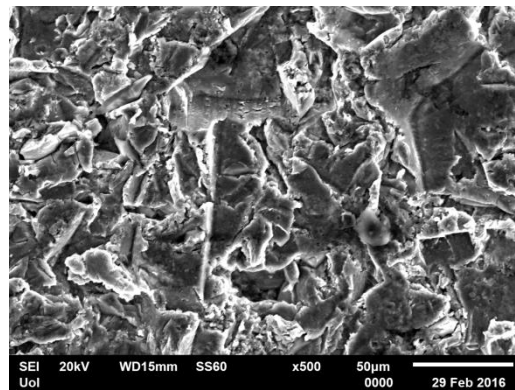
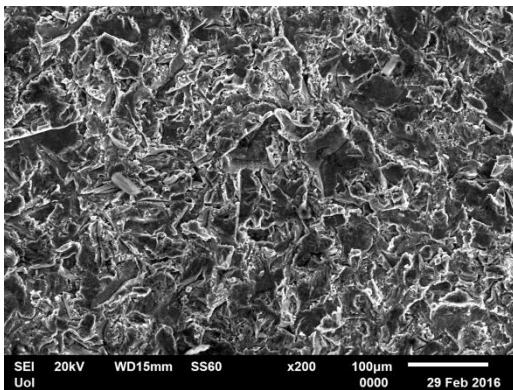
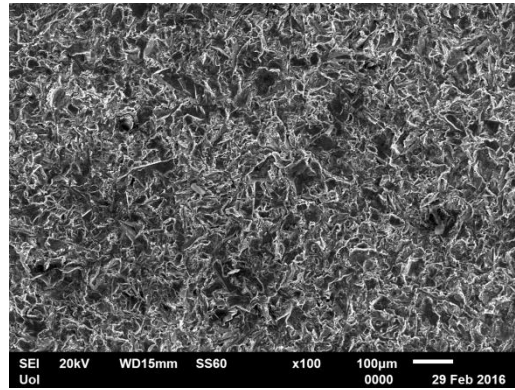
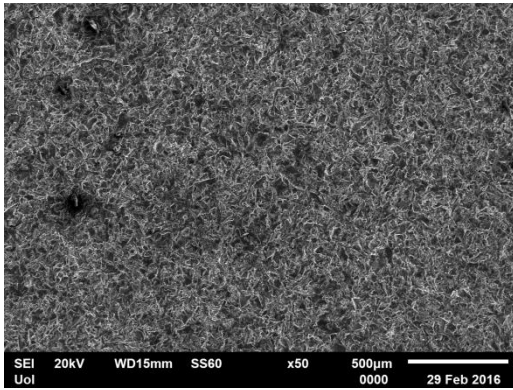
Εικόνα 16. Η μικροδομή του κραματος Al-10%Co μετά το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 6



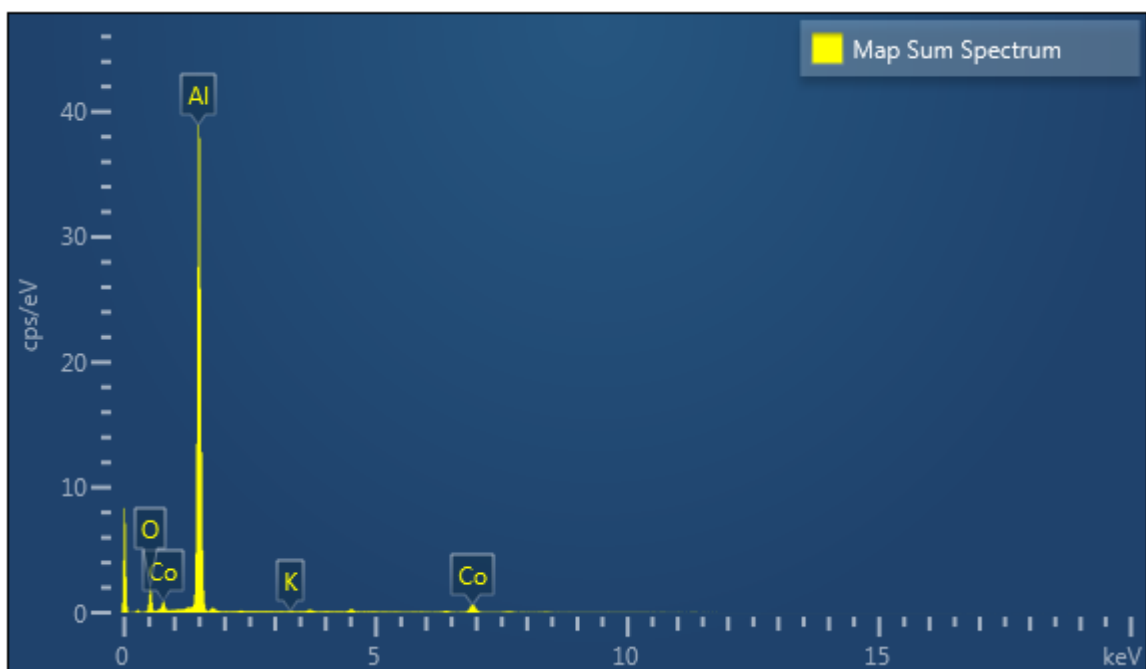
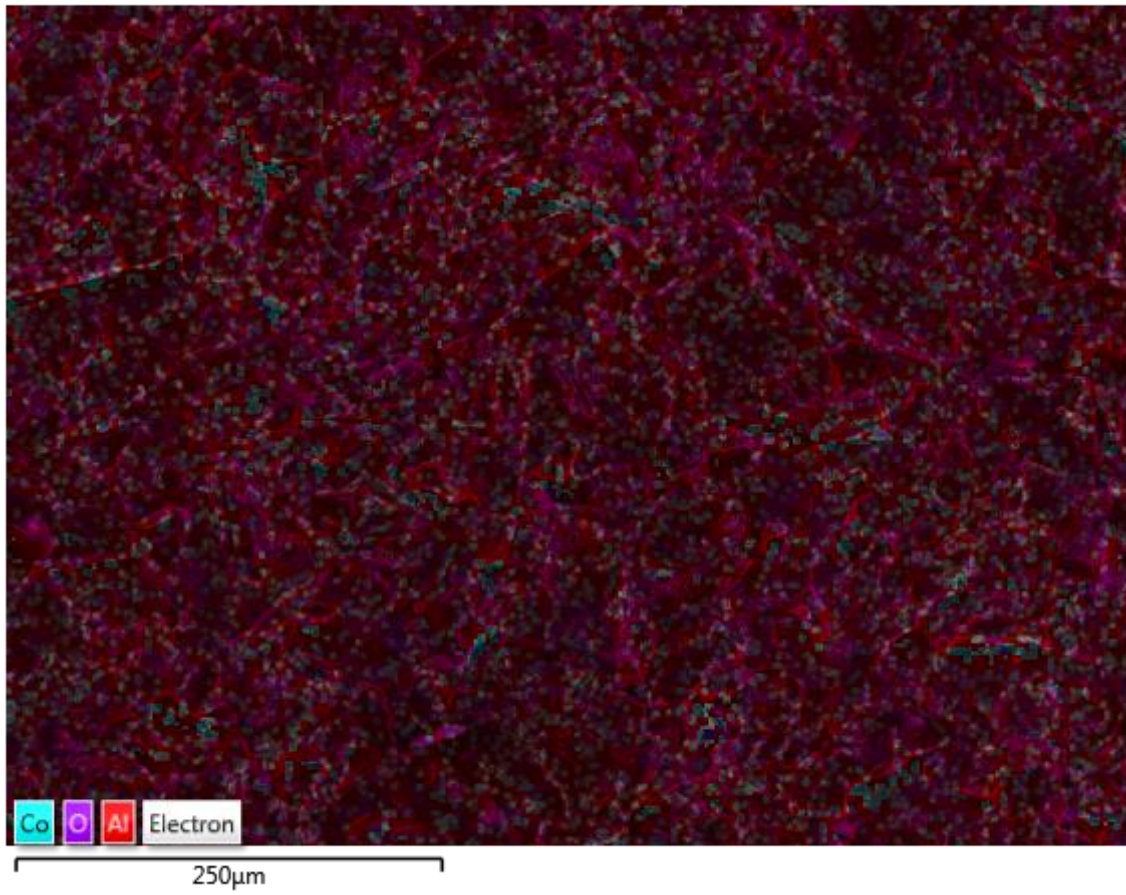


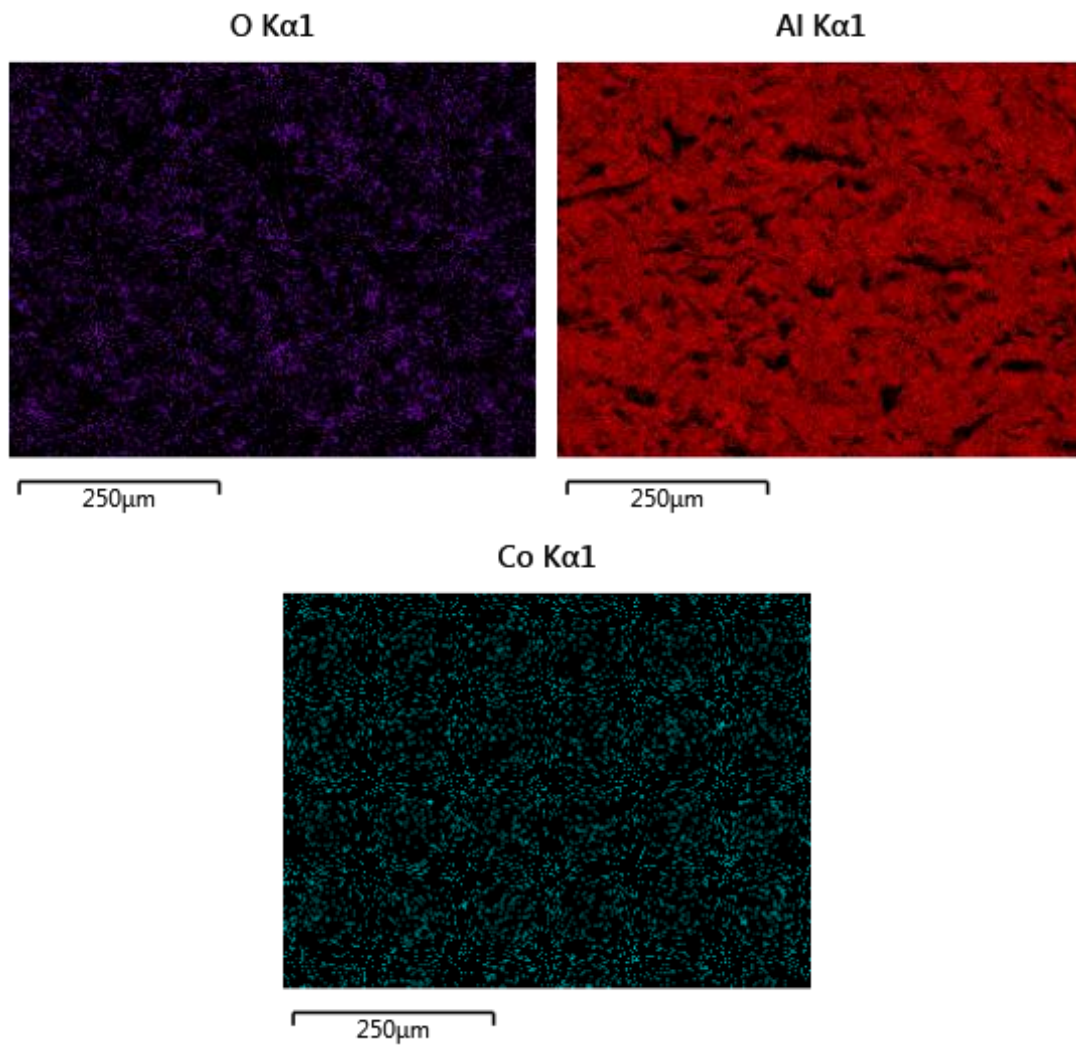
Εικόνα 17. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-10%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90°.



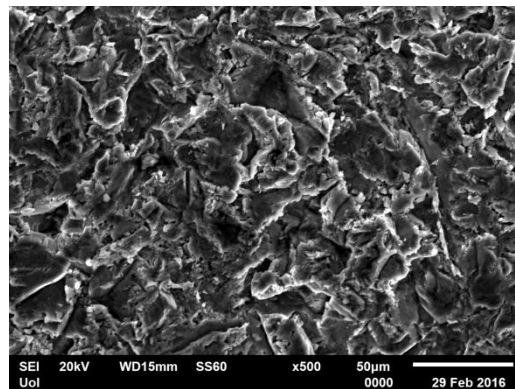
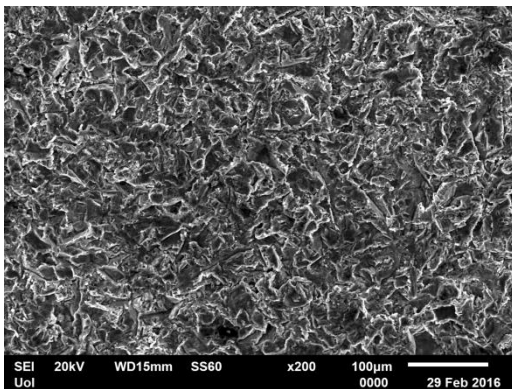
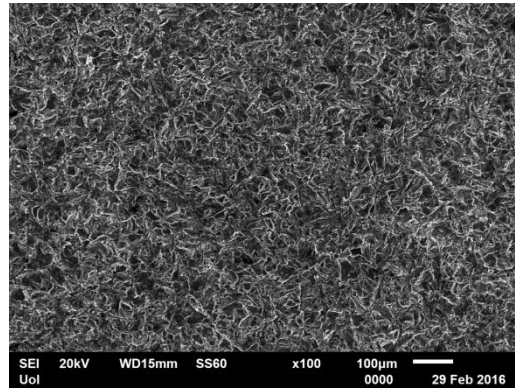
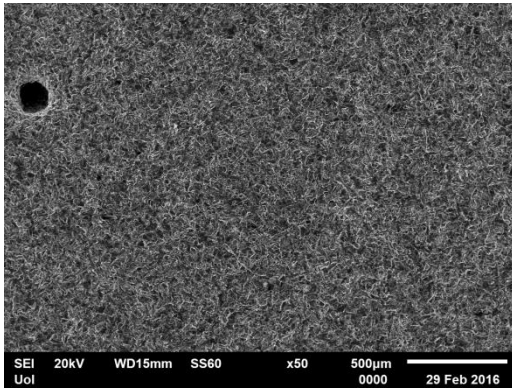
Εικόνα 18. Η μικροδομή του κραματος Al-10%Co μετα το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 5



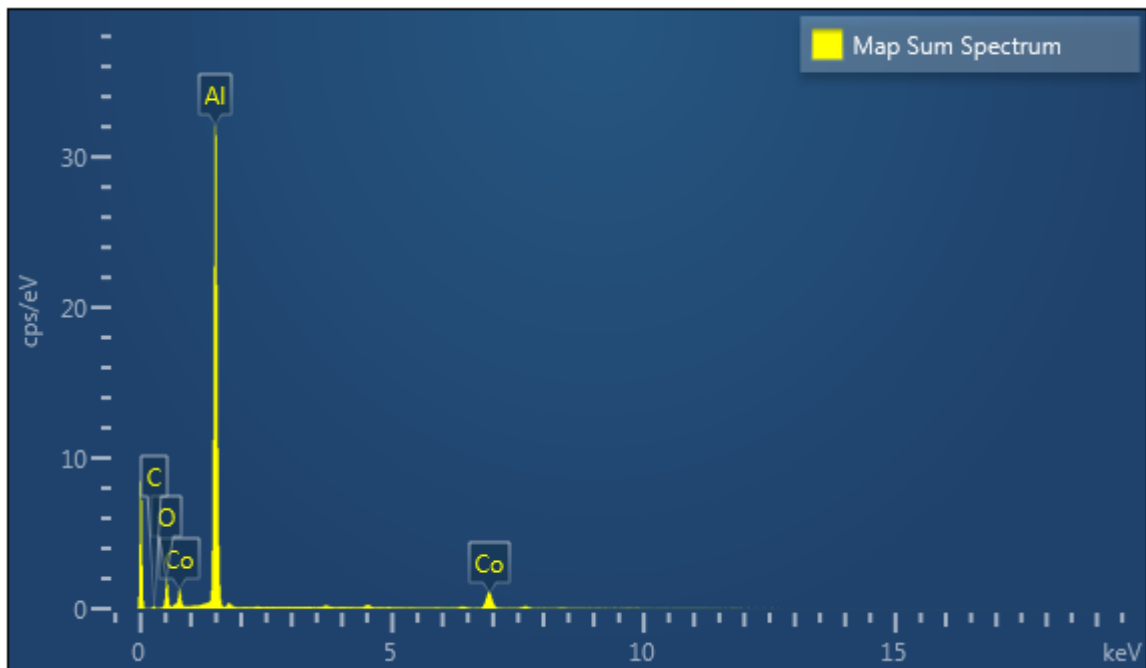
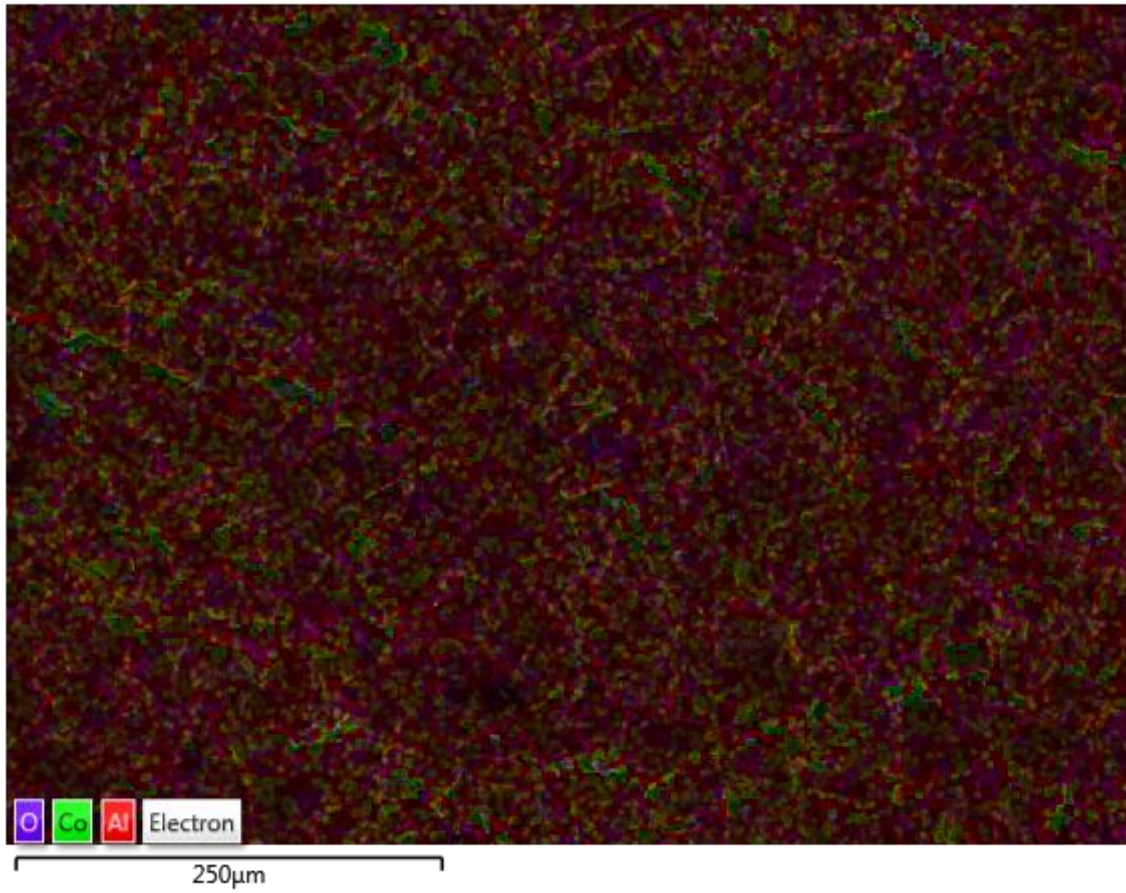


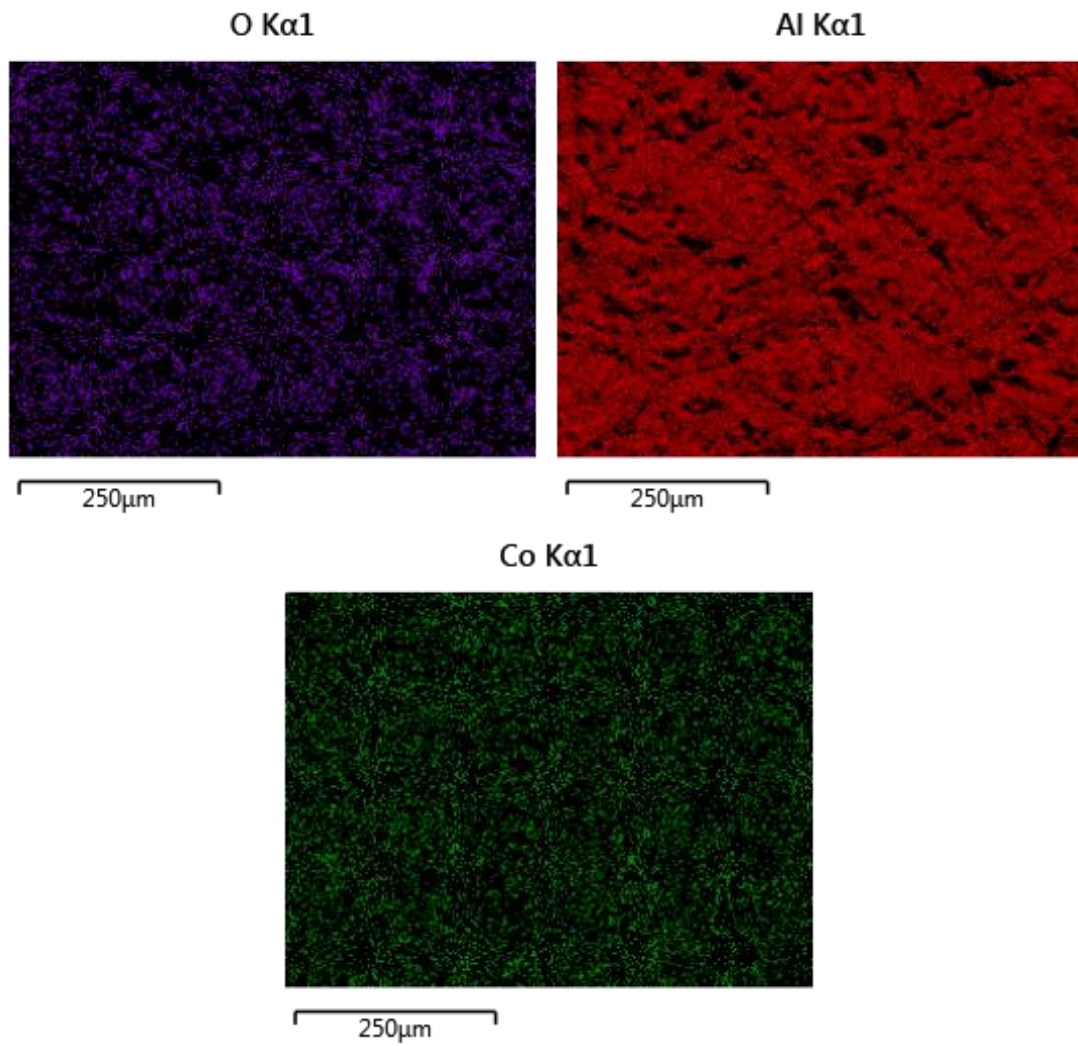
Εικόνα 19. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-10%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60°.



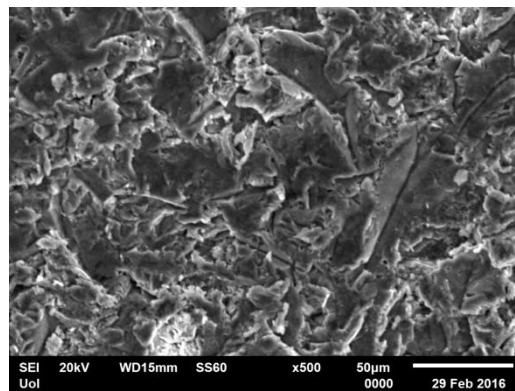
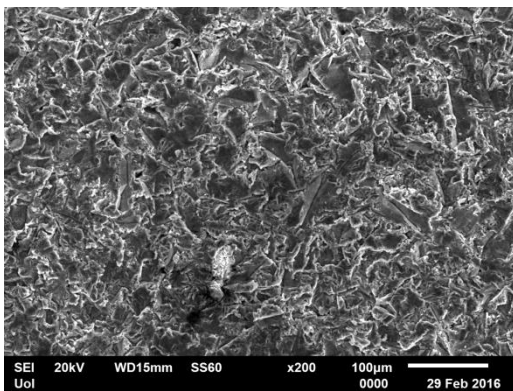
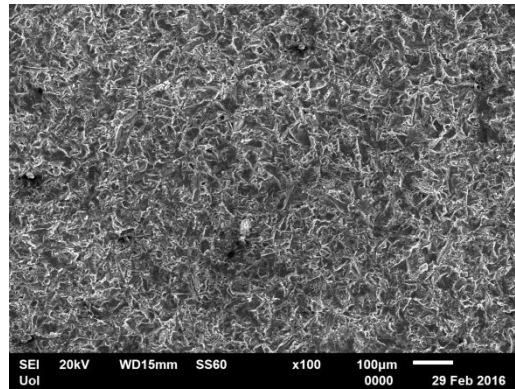
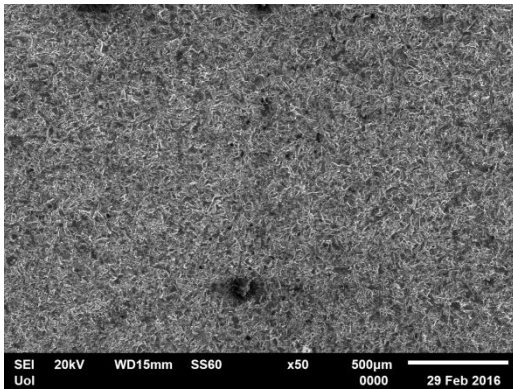
Εικόνα 20. Η μικροδομή του κραματος Al-15%Co μετά το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 4



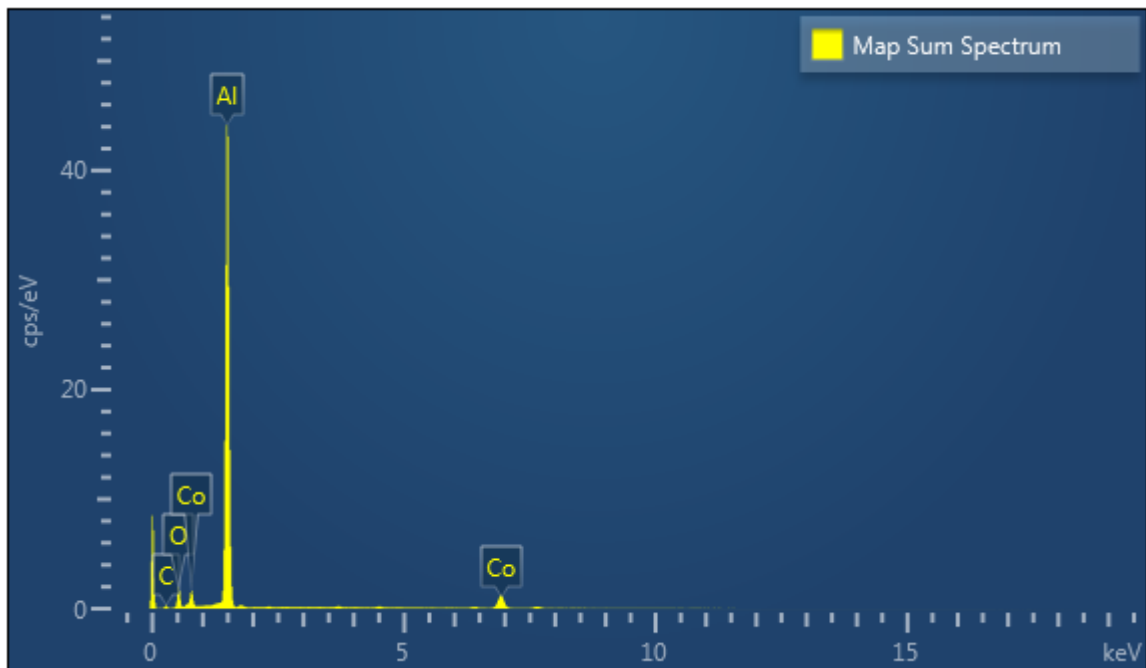
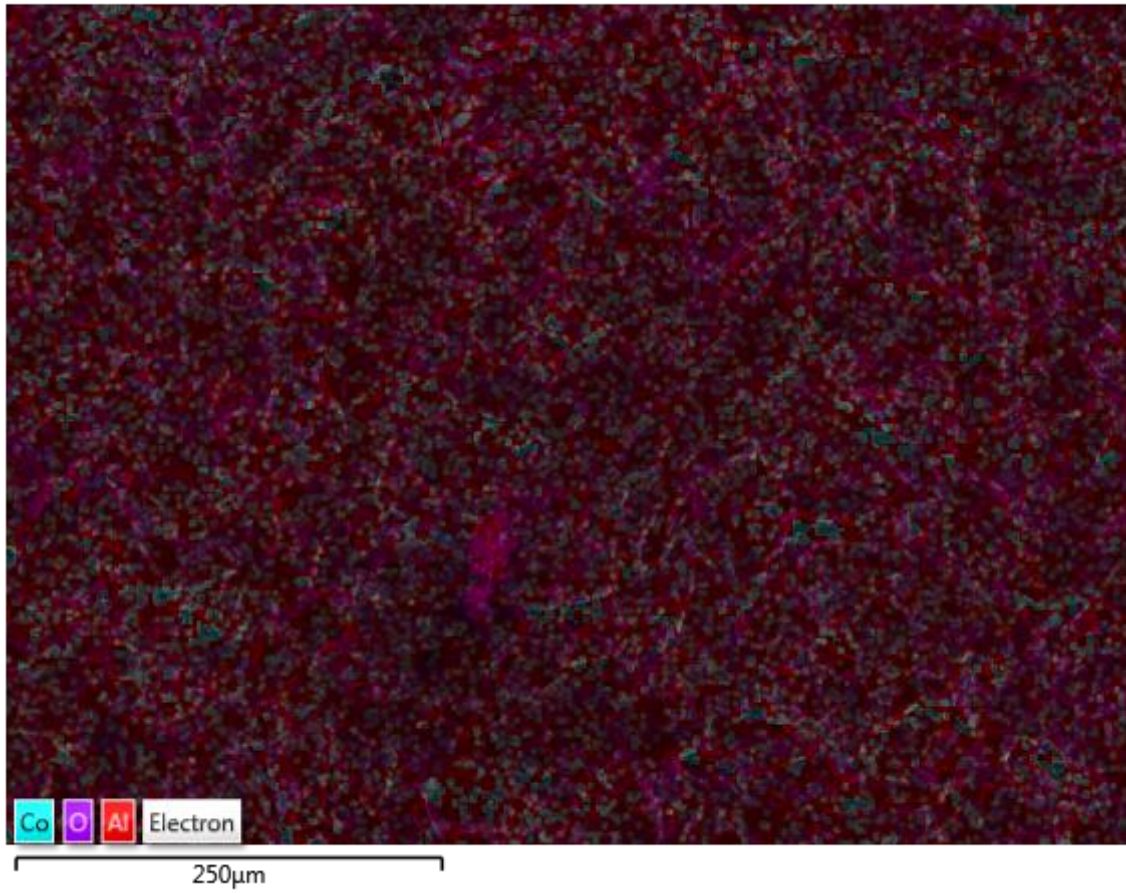


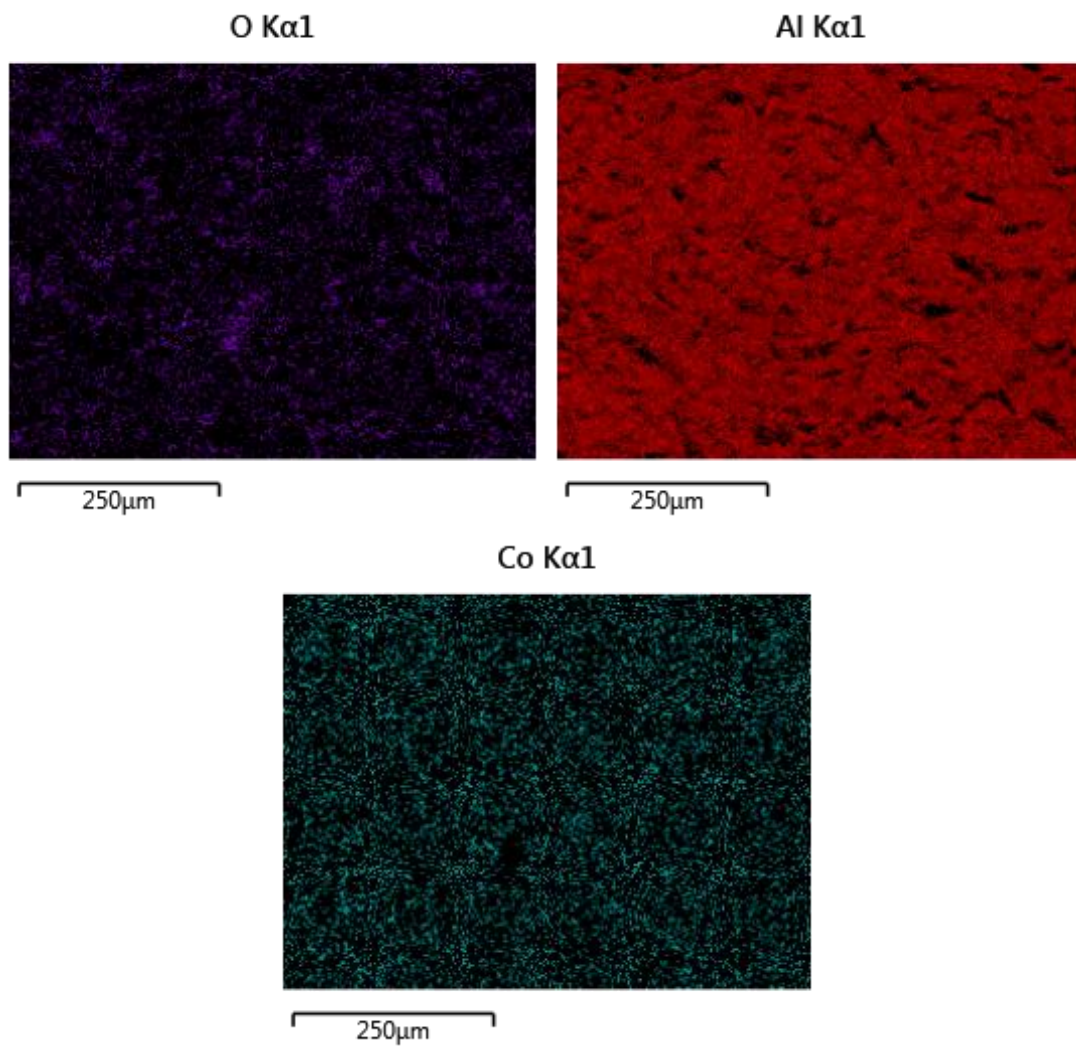
Εικόνα 21. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-15%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90°.



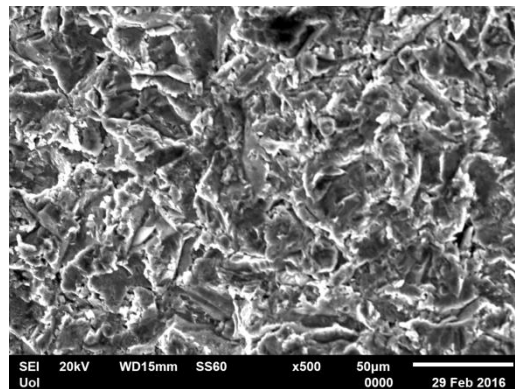
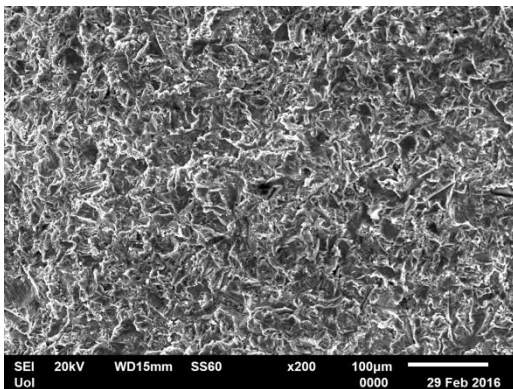
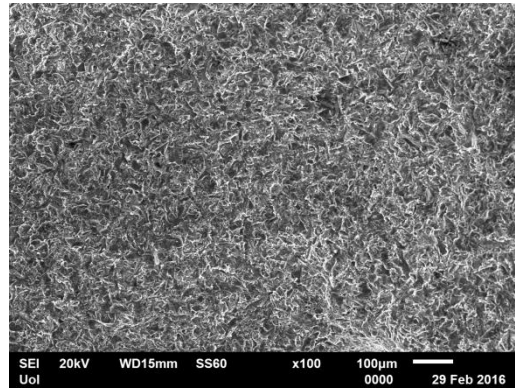
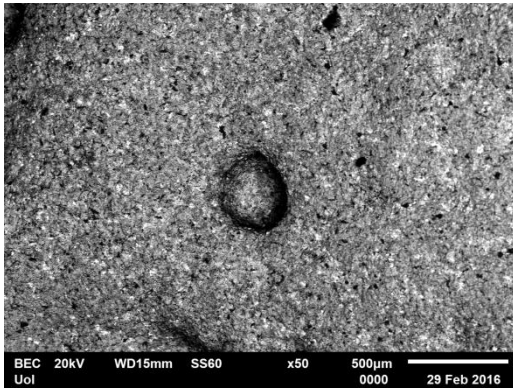
Εικόνα 22. Η μικροδομή του κραματος Al-15%Co μετά το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 3



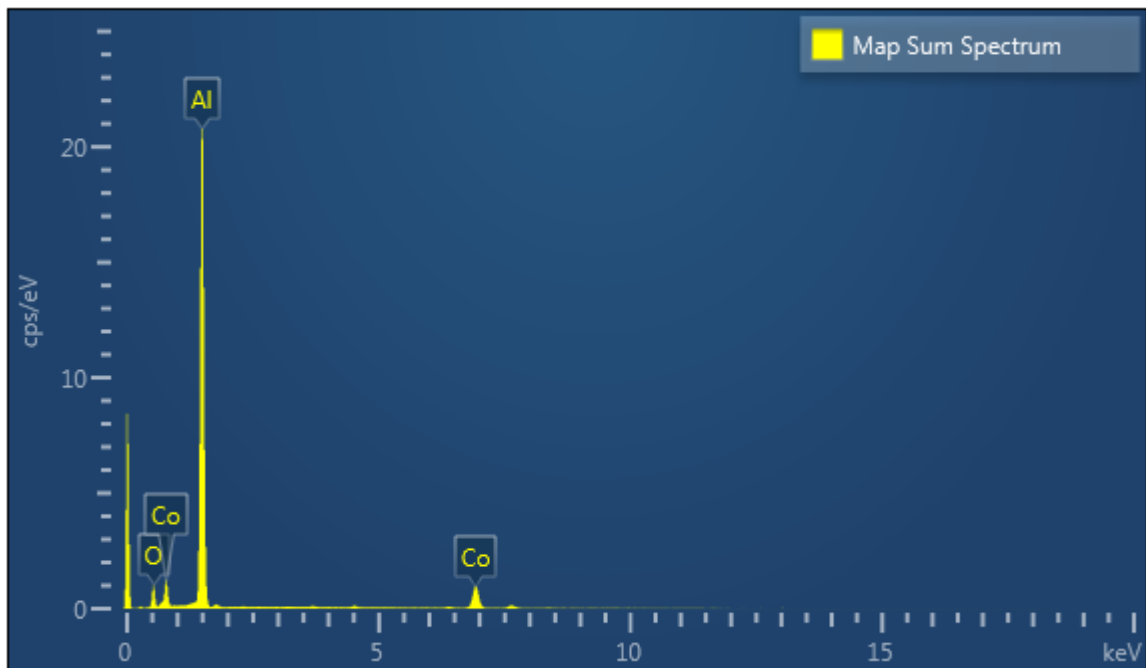
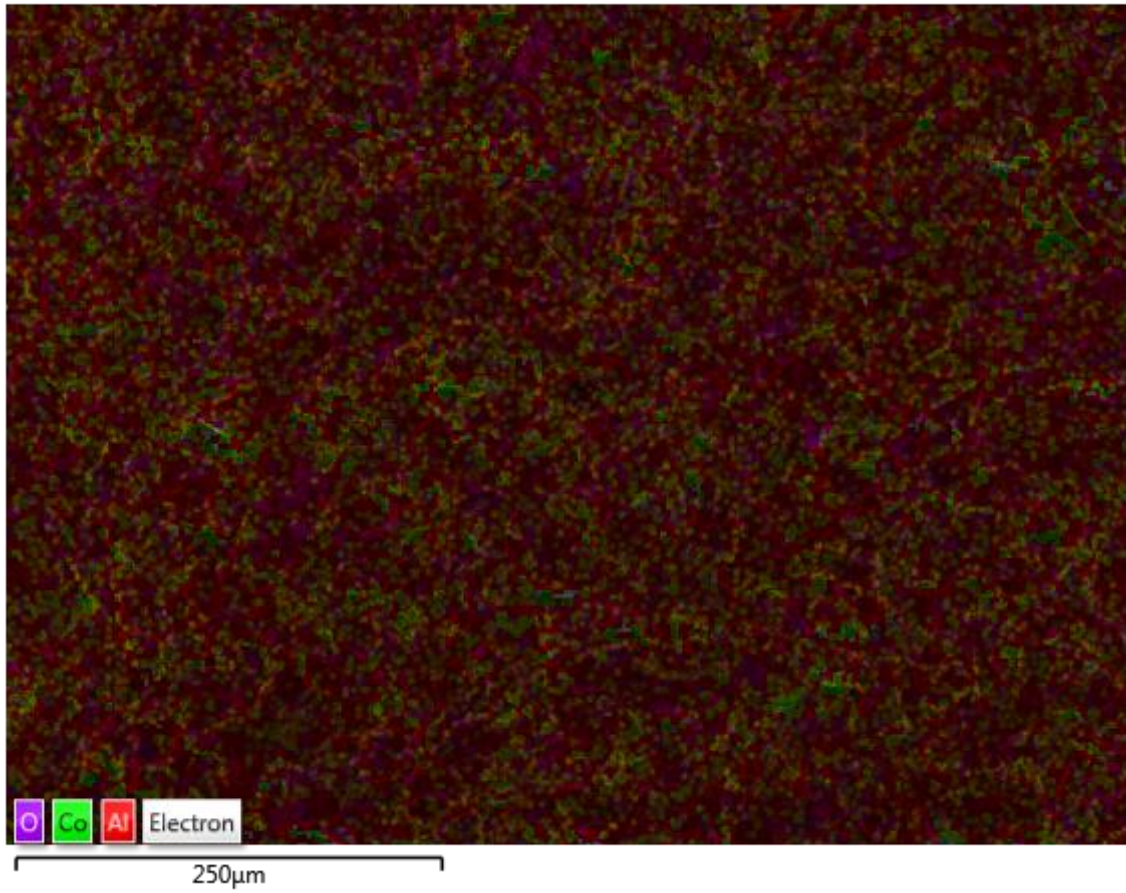


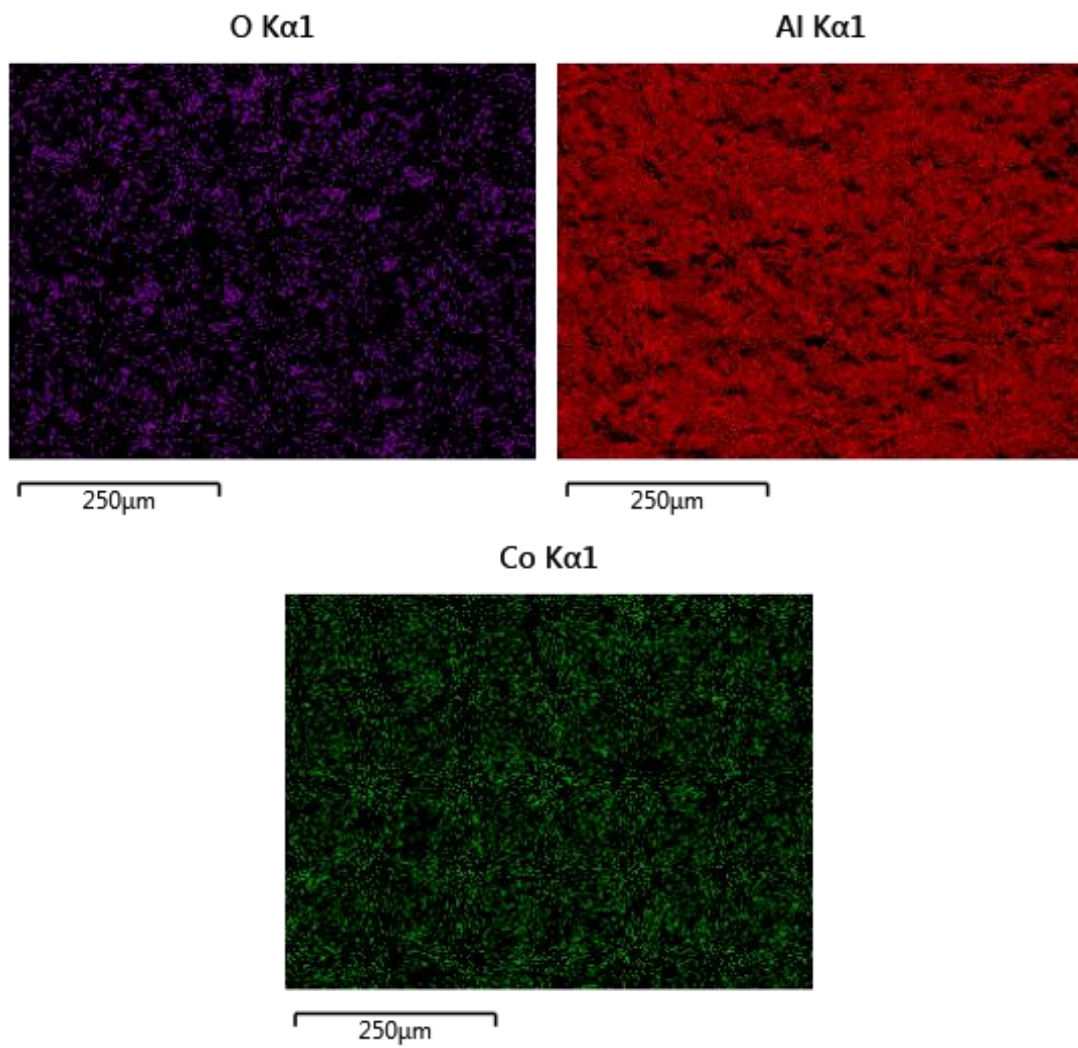
Εικόνα 23. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-15%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60°.



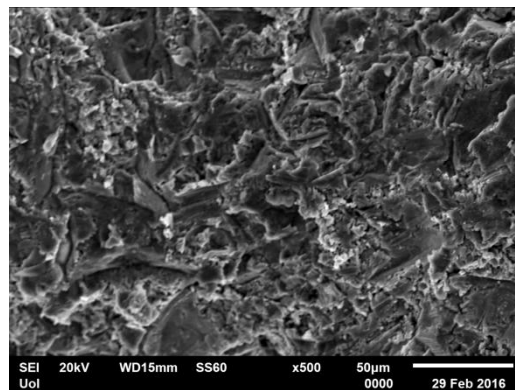
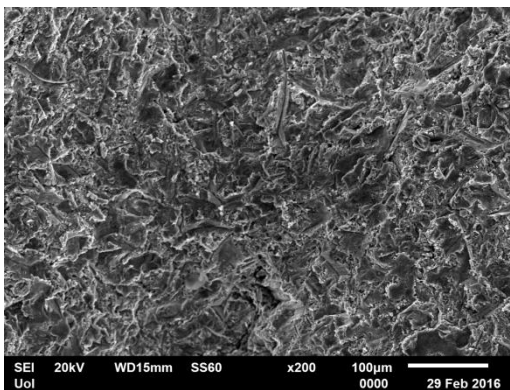
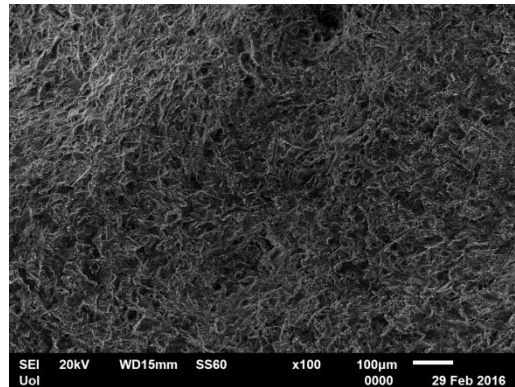
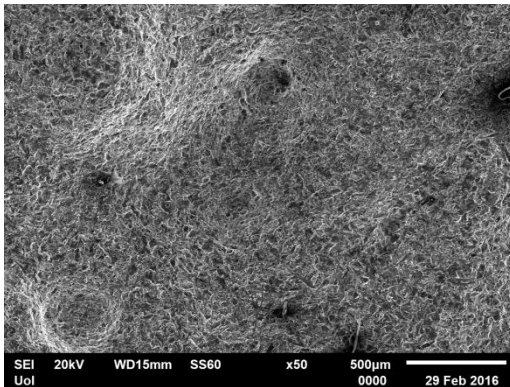
Εικόνα 24. Η μικροδομή του κραματος Al-20%Co μετά το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 90° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 2



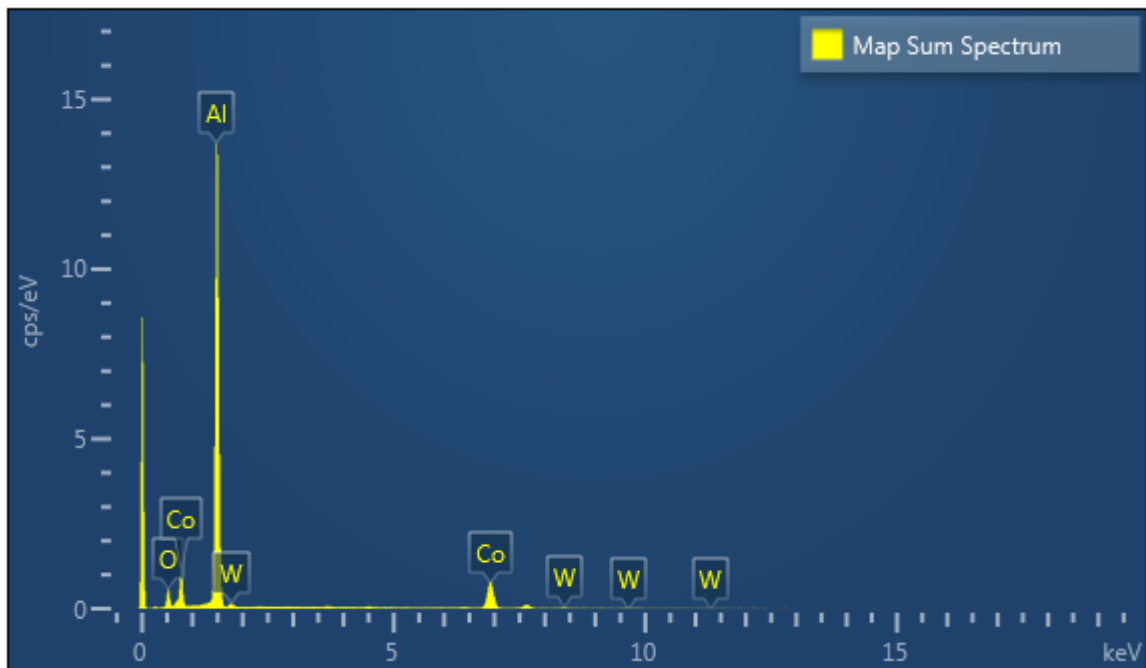
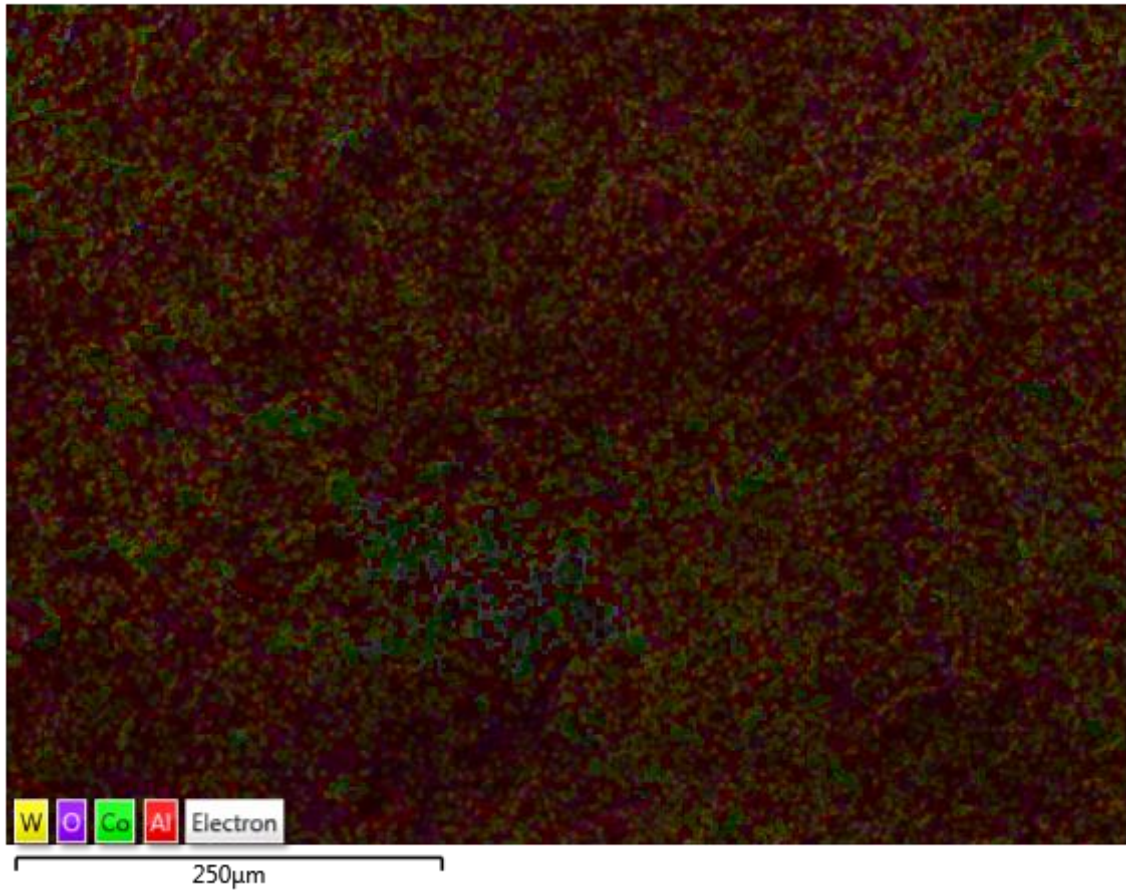


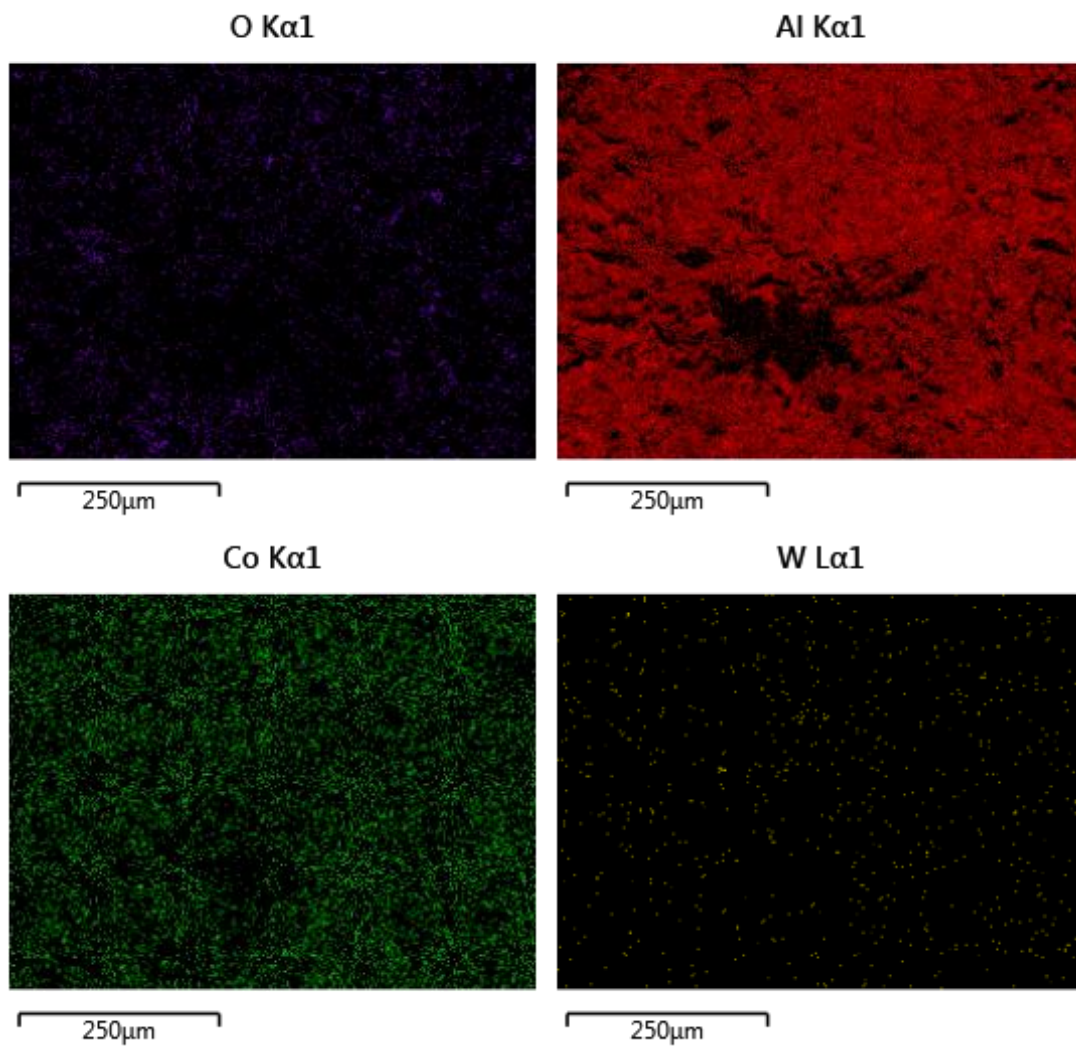
Εικόνα 25. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-20%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροη στερεών σωματιδίων σε γωνία 90°.



Εικόνα 26. Η μικροδομή του κραματος Al-20%Co μετά το πέρας της μηχανικής διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60° σε μεγέθυνση 50X, 100X, 200X, 500X.

EDS Layered Image 1





Εικόνα 27. EDX στοιχειακή χαρτογράφηση του κράματος Al-20%Co μετά το πέρας της μηχανική διάβρωσης με ροή στερεών σωματιδίων σε γωνία 60°.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Τα κράματα Al-Co σε διάφορες ποσοστώσεις 7,10,15,20 % κ.ο παρασκευαστήκαν με τήξη τόξου υπό κενό. Η μικροδομή τους είναι ευκτική με κατευθυνόμενη ανάπτυξη. Η μορφολογία είναι ευτυκτική παρά το γεγονός ότι οι συστάσεις είναι υπερευκτικές λόγω ταχείας στερεοποίησης
2. Τα κράματα αποτελούνται από σωματίδια Al_9Co_2 ομοιόμορφα κατανεμημένα σε μήτρα αλουμινίου.
3. Με την αύξηση του κοβαλτίου έχουμε και αύξηση της έκτασης του πολύπλοκου μεταλλικού κράματος Al_9Co_2 καθώς και το μέγεθος των λεπίδων ,σφηνών και πλακιδίων Al_9Co_2 .
4. Ο ρυθμός μηχανικής διάβρωσης στις ενενήντα μοίρες ήταν μεγαλύτερος από τις εξήντα μοίρες καθώς η κάθετη δύναμη κρούσης ήταν μεγαλύτερη.
5. Η προσθήκη Κοβαλτίου στο αλουμίνιο δημιουργεί βελτίωση στην αντίσταση φθοράς (ολίσθησης) σε ποσοστά 7-20% κοβαλτίου.
6. Περαιτέρω εργασίες ή μελέτες σε διάφορες ποσοστώσεις αλουμινίου κοβαλτίου θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση της μηχανικής φθοράς και φθορά τριβής

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Jacobs M.H, 1999. Introduction to Aluminium as an Engineering Material, TALAT Lecture 1201 EAA - European Aluminium Association
2. Davis, J. R., 1999 Corrosion of Aluminum and Aluminum alloys, Ohio,ASM International
3. Davis J.R., 2001 Alloying: Understanding the Basics, ASM International
4. Bud G., 1999. Resources and Production of Aluminium TALAT Lecture 1101 EAA - European Aluminium Association
5. Πέτσα Χριστίνα, Διπλωματική Εργασία Π.Ι., Συμπεριφορά σε επιφανειακή υποβάθμιση ταχέως στερεοποιούμενων κραμάτων Al-Co, Διπλωματική Εργασία
6. Γ.Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, Επιστήμης και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών, εκδόσεις Παπασωτηρίου.(Σελ 226-234)
7. ASM Metal Handbook Volume 3
8. M. Heggen , D.Deng, M. Feuberbacher (2011), Metadisllocation in the complex metallic alloys T-Al-Mn-(Pd,Fe) Vol 59 2011
9. Finkin EF. Speculations on the theory of adhesive wear. Wear 1972
10. Chawla N, Chawla KK. 2006. Metal Matrix Composites. Springer Science Business Media
11. Kayaba, T. and Kato, K. 1981, The adhesive transfer of the slip-tongue and the wedge, ASLE Trans 24,2, 164-174
12. Chen, L.H. and Rigney, D.A. 1985, Transfer during unlubricated sliding wear of selected metal systems, Wear, 105, 47-61
13. Hokkirigawa, K. and Kato, K. 1988, An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear, Tribology Int., 21, 1, 51-57
14. Hutchings IM. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Butterworth-Heinemann 1992:5-6.
15. Kandeve, M., Venci, A., Karastoyanov, D., 2016 Advanced Tribological Coatings For Heavy-Duty Applications: Case Studies Bulgarian Academy of Sciences, Institute of information and communication technologies Sofia 2016.
16. Evans, A.G. and Marshall, D.B. 1981, Wear mechanism in ceramics, in Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Rigney, D.A. (Ed.), ASM, 439
17. Buljan, S.T. and Sarin, V.K. (1985), The future of silicon nitride cutting tools, Carbide Tool J., May/June, 4-7

18. Heilmann P, Don J, Sun TC, Rigney DA, Glaeser WA. 1983. Sliding wear and transfer. *Wear* 91: 171-190
 19. Halme J, Anderson, P., 2014. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics – state of the art, ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology 1994-1996 (vols 208-210) · April 2010 377-393
 20. Sheldon G, Kanhere A. An investigation of impingement erosion using single particles. *Wear*. 1972;21:195-209.
 21. Shelton H, Sellen Jr John M. Accelerating structure for a charged particle accelerating system. Google Patents; 1963.
 22. Hutchings I, Winter R. Particle erosion of ductile metals: a mechanism of material removal. *Wear*. 1974;27:121-8.
 23. Ives L, Ruff A. Electron microscopy study of erosion damage in copper. *Erosion: Prevention and Useful Applications*: ASTM International; 1979.
 24. Grant G, Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles. *Journal of Aircraft*. 1975;12:471-8.
 25. <https://www.cobaltinstitute.org/critical-raw-material.html> (internet URL)
 26. K Lentzaris, AG Lekatou, A Ntoumazios, AE Karantzalis and AK Sfikas Solid Particle Erosion of Aluminum In-Situ Reinforced with a Cobalt Aluminide
 27. A.E Karantzalis, A Lekatou, K Tsirka, Solidification observations and sliding wear behavior of vacuum arc melting processed Ni-Al-TiC composites, *Materials Characterize* (2012)
 28. Σφήκας Αθανάσιος , Διδακτορική Διατριβή Π.Ι. Συστήματα βασισμένα σε πολύπλοκα μεταλλικά κράματα αλουμινίου: Ανάπτυξη , χαρακτηρισμός και επιφανειακές ιδιότητες, 2017. (<https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/44729#page/1/mode/2u>)
-