

## **1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο με ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς και αυτό οφείλεται στο χαμηλό του κόστος παραγωγής καθώς και στις πολύ καλές φυσικές του ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ μέταλλο με καλή αντοχή στη διάβρωση, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες όσο και στο νερό (συμπεριλαμβανομένου του θαλασσινού νερού), όπως και σε διάφορων τύπων χημικών ουσιών και λαδιών.

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων το αλουμίνιο και τα κράματα του βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή κτηρίων, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη ναυπηγική, στην αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία, στην κατασκευή στρατιωτικού υλικού, καθώς και στην παρασκευή συσκευασιών τροφίμων.

Το γεγονός ότι είναι τόσο διαδεδομένη η χρήση του αλουμινίου οδηγεί σε έρευνα για κατασκευή νέων κραμάτων ανάλογα με τις εκάστοτε επιθυμητές ιδιότητες. Συνεχίζεται η έρευνα για νέες μεθόδους θερμικών και μηχανικών κατεργασιών, οι οποίες μεταβάλλουν πολλές τεχνολογικές ιδιότητες και ιδιαίτερα την αντοχή σε διάβρωση των κραμάτων του αλουμινίου.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ

#### 2.1.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΟΥ

Το αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο που κρυσταλλώνεται στην εδροκεντρωμένη κυβική δομή και δεν υπόκειται σε κάποιο αλλοτροπικό μετασχηματισμό. Η σταθερά πλέγματος είναι 4,014 Å στους 25°C. Έχει ασημί χρώμα και είναι μη μαγνητικό. Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του, έτσι το αλουμίνιο καθαρότητας 99,996% έχει μηχανική αντοχή 49 MPa. Με κατάλληλες όμως κραματικές προσθήκες και θερμικές κατεργασίες το αλουμίνιο μπορεί να φτάσει τα 700 MPa αντοχή. Το καθαρό αλουμίνιο έχει υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Επίσης έχει πολύ καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά εξαιτίας ενός προστατευτικού φιλμ οξειδίων που δημιουργείται στην επιφάνειά του.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου:

Πυκνότητα (g/cm <sup>-3</sup> at 20 °C)	2,7
Σημείο τήξης ( °C )	660
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (Ω <sup>-1</sup> )	37.8 x 10 <sup>6</sup>
Θερμική αγωγιμότητα (cal/sec cm K)	0,5

Τα κράματα του αλουμινίου έχουν παραπλήσιες ιδιότητες με το καθαρό αλουμίνιο. Οι ιδιότητές των κραμάτων αλουμινίου εξαρτώνται από τις κραματικές τους προσθήκες. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η επίδραση των κραματικών προσθηκών στις ιδιότητες:

ΠΡΟΣΘΗΚΗ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
<b>Χαλκός</b>	Σε ποσοστό έως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
<b>Σίδηρος</b>	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα και, ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
<b>Μαγγάνιο</b>	Βελτιώνει την ολκιμότητα και, σε συνδυασμό με το σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
<b>Μαγνήσιο</b>	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
<b>Πυρίτιο</b>	Βελτιώνει, κατά πολύ, τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
<b>Ψευδάργυρο</b>	Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.
<b>Χαλκός</b>	Σε ποσοστό έως 12%, προκαλεί βελτίωση της μηχανικής αντοχής και της κατεργασιμότητας. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση.
<b>Σίδηρος</b>	Σε μικρά ποσοστά βελτιώνει την αντοχή και τη σκληρότητα και, ταυτόχρονα, μειώνει τις πιθανότητες θερμής ρωγμάτωσης κατά τη χύτευση.
<b>Μαγγάνιο</b>	Βελτιώνει την ολκιμότητα και, σε συνδυασμό με το σίδηρο, τη χυτευσιμότητα.
<b>Μαγνήσιο</b>	Βελτιώνει τη μηχανική αντοχή και την αντοχή σε διάβρωση. Σε ποσοστό μεγαλύτερο από 6%, προκαλεί σκλήρυνση με κατακρήμνιση.
<b>Πυρίτιο</b>	Βελτιώνει, κατά πολύ, τη χυτευσιμότητα και την αντοχή σε διάβρωση.
<b>Ψευδάργυρο</b>	Μειώνει τη χυτευσιμότητα, αλλά, σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία προσθήκης, βελτιώνει τη μηχανική αντοχή.

## 2.1.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΩΝ

Τα κράματα του αλουμινίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα χυτά και τα διαμορφωμένα. Η διαφορά των διαμορφωμένων κραμάτων από τα χυτά έγκειται στο ότι τα πρώτα μετά την διαδικασία της χύτευσης υποβάλλονται σε πλαστική παραμόρφωση από εν ψυχρώ ή εν θερμώ κατεργασίες ή ακόμα και συνδυασμό αυτών προκειμένου να αποκτήσουν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά..

### Χυτά κράματα

Για την κωδικοποίηση των χυτών κραμάτων αλουμινίου χρησιμοποιείται ένα σύστημα τεσσάρων ψηφίων .Το πρώτο ψηφίο υποδηλώνει το κύριο στοιχείο προσθήκης, όπως προκύπτει από τον ακόλουθο πίνακα:

<b>ΚΩΔΙΚΟΣ</b>	<b>ΚΥΡΙΑ ΠΡΟΣΘΗΚΗ</b>
1XX.X	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%
2XX.X	Χαλκός
3XX.X	Πυρίτιο και Χαλκός ή Μαγνήσιο
4XX.X	Πυρίτιο
5XX.X	Μαγνήσιο
6XX.X	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7XX.X	Ψευδάργυρος
8XX.X	Κασσίτερος
9XX.X	Άλλα στοιχεία

*Πίνακας 3*

Στον χαρακτηρισμό των κραμάτων της σειράς 1XX.X, το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δηλώνουν την ελάχιστη περιεκτικότητα του αλουμινίου (99,00% ή περισσότερο). Το τελευταίο ψηφίο χωρίζεται με υποδιαστολή από τα τρία πρώτα ψηφία και αφορά στη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης: με μηδέν (0), υποδηλώνεται ότι πρόκειται για χυτό, το οποίο έχει αποκτήσει την τελική του μορφολογία με κατευθείαν χύτευση, ενώ με ένα (1) υποδηλώνεται ότι πρόκειται για πλίνθωμα.

Στις σειρές 2XX.X μέχρι 8XX.X, τα δεύτερα και τρίτα ψηφία δεν έχουν αριθμητική σημασία, παρά μόνο ταυτοποιούν τα διάφορα κράματα. Το ψηφίο που βρίσκεται δεξιάτερα της υποδιαστολής δείχνει τον τύπο παραγωγής: το μηδέν (0) σημαίνει χύτευση,

το ένα (1) σημαίνει πρότυπο πλίνθωμα και το δύο (2) δηλώνει πλινθώματα με κοντινές περιεκτικότητες αυτών των πρότυπων πλινθωμάτων.

### Διαμορφωμένα κράματα

Τα κράματα αυτά χαρακτηρίζονται από έναν τετραψήφιο αριθμό (1XXX, 2XXX,...). Ο πρώτος αριθμός υποδεικνύει τη σειρά του κράματος όπως αυτή απεικονίζεται στον ακόλουθο πίνακα:

<b>Κράματα</b>	<b>Σειρά</b>
Αλουμίνιο >99%	1XXX
Χαλκός	2XXX
Μαγγάνιο	3XXX
Πυρίτιο	4XXX
Μαγνήσιο	5XXX
Μαγνήσιο + Πυρίτιο	6XXX
Ψευδάργυρος	7XXX
Άλλα στοιχεία	8XXX
Σειρές που δεν χρησιμοποιούνται	9XXX

Πίνακας 4

Για τα κράματα της κατηγορίας 1xxx ο δεύτερος αριθμός σχετίζεται με τις αλλαγές στην καθαρότητα του αρχικού κράματος. Τέλος το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο του τετραψήφιου αυτού αριθμού είναι ενδεικτικά του ποσοστού του αλουμινίου το οποίο είναι μεγαλύτερο του 99%, π.χ. σε ένα κράμα με περιεκτικότητα 99,7% σε αλουμίνιο το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο θα αντικατασταθούν από τον αριθμό 70, αν είναι 99,45% από 45 κ.ο.κ.

Αντιθέτως με τα κράματα της σειράς 1xxx σε όλες τις υπόλοιπες σειρές οι αριθμοί του τρίτου και τέταρτου ψηφίου δεν έχουν αριθμητική σημασία, απλά χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τα κράματα της ίδιας σειράς. Το δεύτερο ψηφίο είναι, όπως και στη σειρά 1xxx, ενδεικτικό των αλλαγών στην καθαρότητα του αρχικού κράματος (ο αριθμός 0 υποδεικνύει το αρχικό κράμα). Οι τρεις τελευταίοι αριθμοί σε όλες τις σειρές λαμβάνουν τιμές από το 1-9. Συνήθως τον τετραψήφιο αριθμό του κάθε κράματος που προαναφέραμε

ακολουθεί ένα από τα παρακάτω γράμματα F, H, O, W και T που είναι ενδεικτικά των βασικών κατεργασιών που υποβάλλεται το κράμα.

### 2.1.3 ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΩΝ

Τα κράματα αλουμινίου για να αποκτήσουν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες υποβάλλονται σε διάφορες κατεργασίες. Οι κατεργασίες μπορεί να είναι μηχανικές π.χ. ενδοτράχυνση ή θερμικές π.χ. ομογενοποίηση. Παρακάτω περιγράφονται και κωδικοποιούνται οι κατεργασίες κατά το Αμερικάνικο πρότυπο ANSI H35.1.

**F Προϊόν όπως παρήχθη.** Αναφέρεται σε προϊόντα που διαμορφώνονται με ψυχρή διαμόρφωση, θερμή διαμόρφωση ή με χύτευση χωρίς να υποστούν κάποια επιπλέον κατεργασία.

**O Ανόπτηση.** Εφαρμόζεται σε διαμορφωμένα προϊόντα ώστε να μειωθεί η αντοχή τους αλλά και σε χυτά για βελτίωση της ελαστικότητας (ductility) αλλά και της διαστασιακής σταθερότητας

**H Ενδοτράχυνση.** Εφαρμόζεται μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης. Μετά το H ακολουθεί από δύο αριθμητικά ψηφία. Το πρώτο ψηφίο από 1 έως 3 υποδηλώνει το είδος της κατεργασίας. Το δεύτερο ψηφίο από το 1 έως 8 υποδηλώνει το βαθμό ενδοτράχυνσης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός τόσο μεγαλύτερο ποσοστό σκλήρυνσης από ενδοτράχυνσης υποδηλώνει, με τον αριθμό 4 να υποδηλώνει ποσοστό σκλήρυνσης από ενδοτράχυνση 50% και τον αριθμό 8 να υποδηλώνει σκλήρυνση σε ποσοστό 100% και οι ενδιάμεσοι αριθμοί ενδιάμεσα ποσοστά σκληρότητας.

- **H1x Μόνο ενδοτράχυνση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που έχουν υποστεί μόνο ενδοτράχυνση, χωρίς καμία άλλη κατεργασία.

- **H2x Ενδοτράχυνση και μερική ανόπτωση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που έχουν υποστεί ενδοτράχυνση πάνω από τον επιθυμητό βαθμό και στη συνέχεια μειώνεται η μηχανική αντοχή στον επιθυμητό βαθμό με ανόπτωση.
- **H3x Ενδοτράχυνση και σταθεροποίηση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που έχουν ενδοτραχυνθεί και οι μηχανικές τους ιδιότητες σταθεροποιούνται με θερμική κατεργασία χαμηλής θερμοκρασίας.

**W Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης.** Είναι μια κατεργασία που εφαρμόζεται σε κράματα τα οποία παθαίνουν φυσική γήρανση μόλις εκτεθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετά από ομογενοποίηση.

**T Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση.** Είναι μια κατεργασία που εφαρμόζεται σε θερμικώς κατεργάσιμα χυτά και διαμορφωμένα κράματα και αποσκοπεί στην αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων.

Οι κατεργασίες **T** ακολουθούνται από ένα αριθμητικό ψηφίο από το 1 έως το 10 το οποίο υποδηλώνει μια συγκεκριμένη σειρά βασικών κατεργασιών. Παρακάτω δίνεται η κωδικοποίηση των κατεργασιών **T**:

- **T1 Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης και φυσική γήρανση.** Εφαρμόζεται σε προϊόντα που δεν μπορούν να υποβληθούν σε εν ψυχρώ κατεργασίες μετά από διαδικασία θερμής διαμόρφωσης π.χ. χύτευση ή διέλαση, γιατί οι μηχανικές ιδιότητες έχουν σταθεροποιηθεί με γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- **T2 Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης, εν ψυχρώ μηχανική κατεργασία και φυσική γήρανση.**  
Αναφέρεται σε προϊόντα που υποβάλλονται σε ψυχρή μηχανική κατεργασία για αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων μετά από θερμή διαμόρφωση.

- **T3 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, ψυχρή κατεργασία και φυσική γήρανση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που υπόκεινται σε ψυχρή κατεργασία για αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων μετά από θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και στη συνέχεια οι μηχανικές ιδιότητες σταθεροποιούνται με γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- **T4 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και φυσική γήρανση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που δεν υπόκεινται σε ψυχρή κατεργασία μετά την ομογενοποίηση και για αυτό οι μηχανικές ιδιότητες σταθεροποιούνται με γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- **T5 Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης και τεχνητή γήρανση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που δεν επιδέχονται ψυχρή κατεργασία μετά από διαδικασίες θερμής διαμόρφωσης όπως χύτευση ή διέλαση και οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται σημαντικά με θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με κατακρήμνιση.
- **T6 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και τεχνητή γήρανση.** Αναφέρεται σε προϊόντα τα οποία δεν επιδέχονται κατεργασίες ψυχρής διαμόρφωσης μετά από ομογενοποίηση και οι μηχανικές ιδιότητες τους βελτιώνονται σημαντικά με θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με κατακρήμνιση σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος (τεχνητή γήρανση).
- **T7 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και σταθεροποίηση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και στη συνέχεια σκλήρυνση με κατακρήμνιση σε βαθμό υπεργήρανσης.
- **T8 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, ψυχρή κατεργασία και τεχνητή γήρανση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που μετά την ομογενοποίηση υπόκεινται σε ψυχρή κατεργασία για βελτίωση της μηχανικής αντοχής και στη συνέχεια ακολουθεί τεχνητή γήρανση για περαιτέρω βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με σκλήρυνση με κατακρήμνιση.



- **T9 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, τεχνητή γήρανση και ψυχρή κατεργασία.** Αναφέρεται σε προϊόντα τα οποία μετά τη διαδικασία σκλήρυνσης με κατακρήμνιση υποβάλλονται σε ψυχρή κατεργασία για περαιτέρω βελτίωση της αντοχής.
- **T10 Ψύξη από τη θερμοκρασία θερμής διαμόρφωσης, ψυχρή κατεργασία και τεχνητή γήρανση.** Αναφέρεται σε προϊόντα που μετά την θερμή διαμόρφωση π.χ. έλαση,διέλαση, υποβάλλονται σε ψυχρή κατεργασία για βελτίωση της μηχανικής αντοχής και στη συνέχεια υποβάλλονται σε τεχνητή γήρανση για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της διαστασιακής σταθερότητας.

## **2.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ**

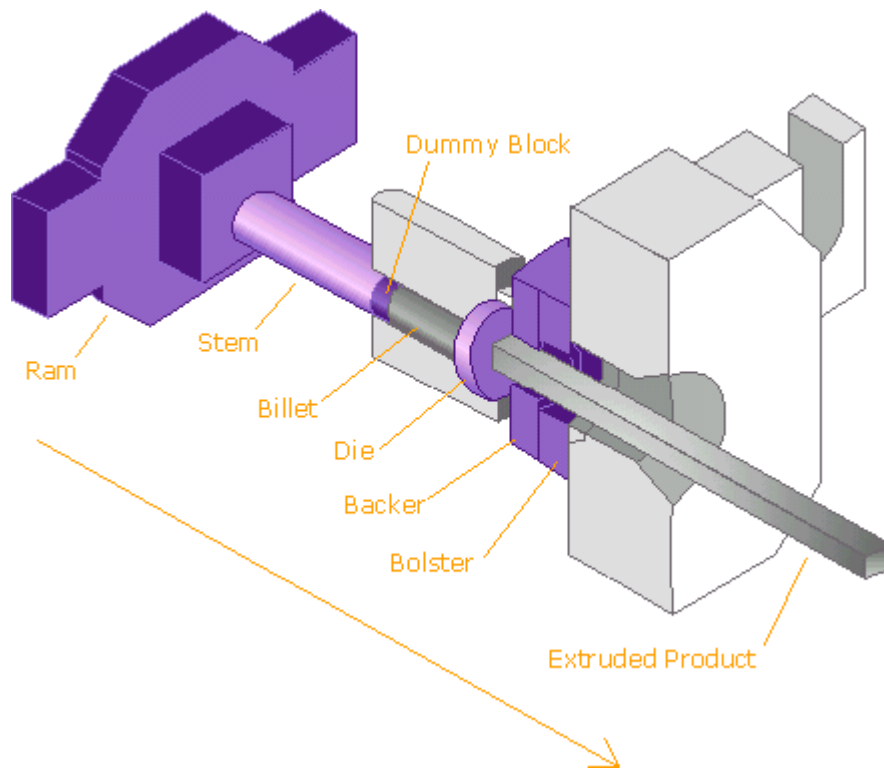
### **2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Τα διαμορφωμένα κράματα αλουμινίου προκύπτουν κυρίως από δύο διαδικασίες, την διέλαση και την έλαση. Η έλαση διαχωρίζεται σε θερμή και ψυχρή έλαση.

Με την διέλαση παίρνουμε διάφορες διατομές συμπαγείς ή κοίλες. Με την θερμή έλαση παίρνουμε πλάκες που μπορούν να έχουν πάχος έως 6 mm. Ενώ με ψυχρή έλαση μπορούμε να πάρουμε φύλλο μέχρι και 0,05 mm.

### **2.2.2 ΔΙΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΔΙΕΛΑΣΗΣ**

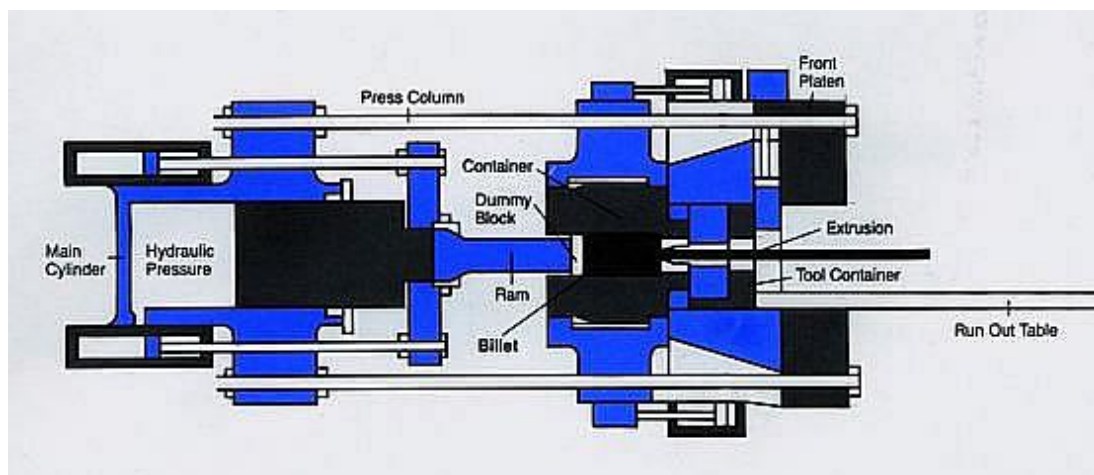
Η διέλαση είναι μια τεχνική διαμόρφωσης του αλουμινίου σύμφωνα με την οποία το υλικό αναγκάζεται να περάσει από μια μήτρα η οποία δίνει το τελικό σχήμα στο προϊόν. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαδικασία της διέλασης απλοποιημένη.



Σχήμα 1

Το κράμα αλουμινίου που θα υποστεί διέλαση είναι σε μορφή μπιγέτας που έχει προέλθει από χύτευση. Κατά τη διέλαση το κράμα, εάν και είναι σε στερεή μορφή, είναι έντονα θερμό και ως εκ τούτου αρκετά μαλακό, ώστε να διευκολύνεται η διέλαση. Η θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το κράμα είναι μεταξύ  $375^{\circ}\text{C}$  και  $500^{\circ}\text{C}$ . Αφού τοποθετηθεί η μπιγέτα στην πρέσα της διέλασης, ασκείται τάση της τάξεως των 500 έως 700 MPa, οπότε η μπιγέτα αναγκάζεται να διέλθει από την μήτρα και να πάρει το επιθυμητό σχήμα. Εάν θέλουμε να πάρουμε κοίλη διατομή τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια μπιγέτα η οποία έχει διατρηθεί και επιπλέον μια βελόνα να περνάει μέσα από την οπή αυτής, σε αντίθετη φορά με την κίνηση του εμβόλου που προωθεί την μπιγέτα. Ο ρυθμός παραγωγής της πρέσας διέλασης εξαρτάται από το πόσο σκληρό είναι το κράμα του αλουμινίου. Έτσι για ένα σκληρό κράμα με πολύπλοκη διατομή ο ρυθμός διέλασης μπορεί να είναι από 60 έως 80 cm το λεπτό, αντιθέτως για μαλακό κράμα και απλή διατομή ο ρυθμός διέλασης μπορεί να είναι έως και 60-70 μέτρα το λεπτό. Καθώς το τελικό διαμορφωμένο κράμα εξέρχεται από την μήτρα ψύχεται είτε φυσικά είτε με νερό ή αέρα. Το στάδιο της ψύξης είναι σημαντικό γιατί δίνει τις απαραίτητες μεταλλουργικές ιδιότητες στο κράμα.

Στο Σχήμα 2 φαίνεται μια πρέσα διέλασης. Η φορά διέλασης είναι από αριστερά προς τα δεξιά



Σχήμα 2

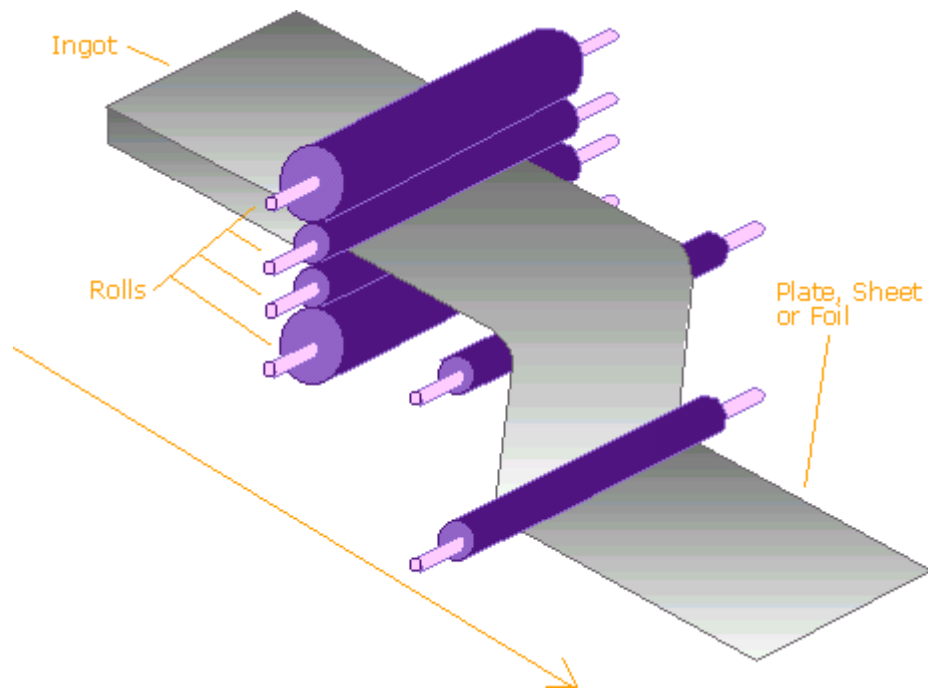
### 2.2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

Η έλαση είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης των μετάλλων με πλαστική παραμόρφωση. Η μηχανή που πραγματοποιεί την έλαση ονομάζεται έλαστρο και αποτελείται από κύλινδρους οι οποίοι περιστρέφονται με αντίθετη φορά και παρασύρουν το υλικό με τη βοήθεια της τριβής. Η απόσταση μεταξύ των δύο κυλίνδρων καθορίζει το πόσο θα μειωθεί το πάχος του υλικού.

Στα κράματα αλουμινίου εφαρμόζεται η θερμή έλαση όταν θέλουμε να πετύχουμε μεγάλες μειώσεις πάχους. Η θέρμανση γίνεται σε θερμοκρασία περίπου  $500^{\circ}\text{C}$  και το κράμα περνάει αρκετές φορές από τους κυλίνδρους. Το αρχικό κομμάτι κράματος μπορεί να έχει πάχος έως 600 mm και με διαδοχικές ελάσεις να φτάσει σε πάχος 6mm.

Για μεγαλύτερη μείωση πάχους και παρασκευή λεπτών φύλλων πάχους έως και 0,05 mm, χρησιμοποιείται η ψυχρή έλαση.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται απλοποιημένη η διαδικασία της έλασης



Σχήμα 3

## 2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

### 2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο θερμικές κατεργασίες, αναφερόμαστε σε κάθε διαδικασία που περιλαμβάνει θέρμανση και ψύξη ενός υλικού και αποσκοπεί στη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων, της μεταλλογραφικής δομής ή να επιφέρει αλλαγές στις υπολοιπούμενες τάσεις του υλικού. Όταν ο όρος αυτός αναφέρεται στα κράματα αλουμινίου, προσδιορίζει συνήθως θερμικές κατεργασίες που σαν στόχο έχουν να βελτιώσουν τη μηχανική αντοχή και της σκληρότητα των κραμάτων.

Τα κράματα του αλουμινίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το εάν επιδέχονται θερμικές κατεργασίες ή όχι. Έτσι διαχωρίζονται στα θερμικώς κατεργάσιμα

κράματα, τα οποία επιδέχονται θερμικές κατεργασίες και στα μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα, τα οποία δεν επιδέχονται θερμικές κατεργασίες.

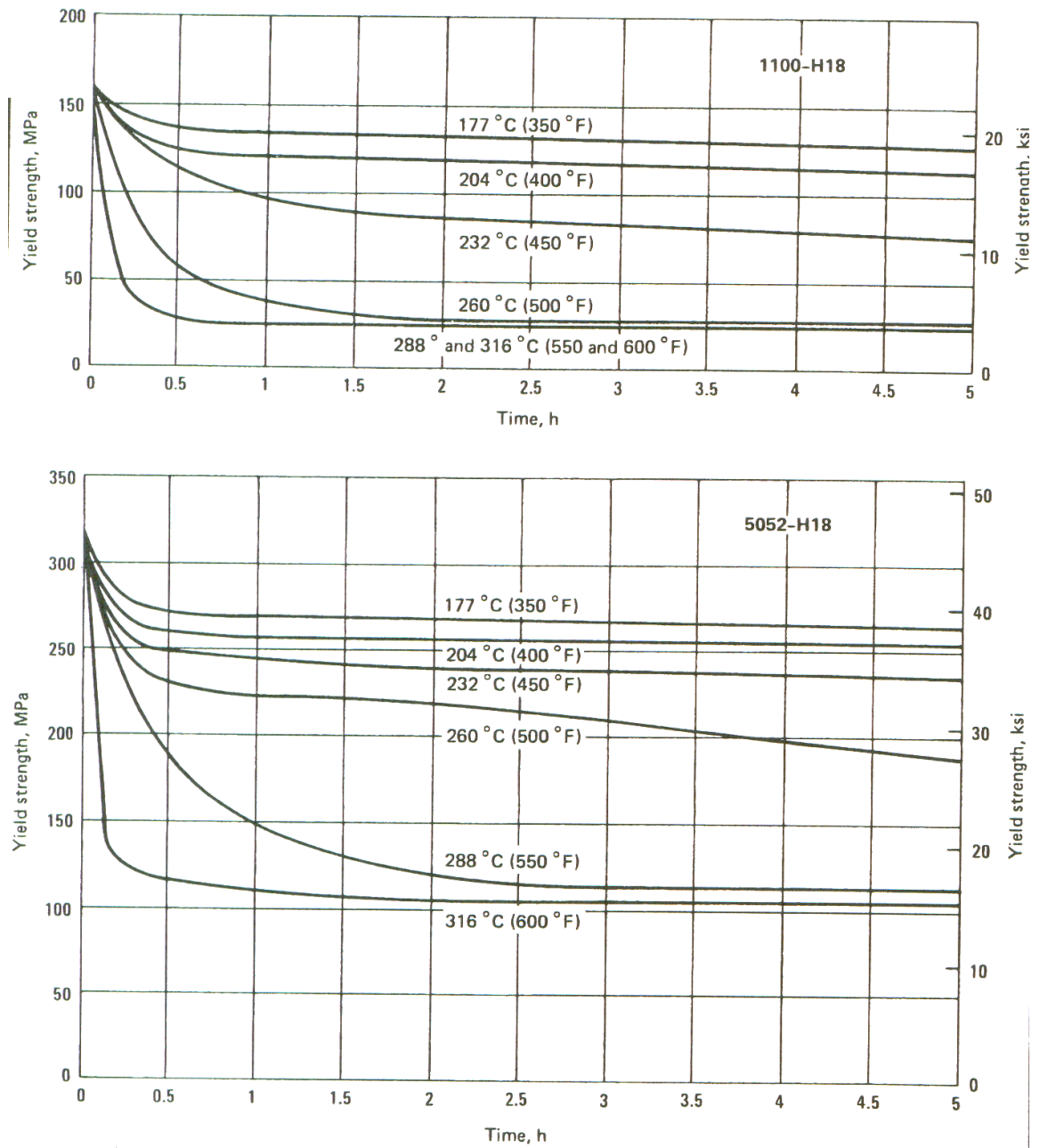
Στα κράματα αλουμινίου οι θερμικές κατεργασίες που εφαρμόζονται είναι η ανόπτηση και η σκλήρυνση με κατακρήμνιση. Στη συνέχεια θα εξεταστούν αναλυτικά αυτές οι δύο θερμικές κατεργασίες.

### 2.3.2 ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Η ανόπτηση είναι μιά θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται στα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα αλλά και στα μη θερμικώς κατεργάσιμα και σαν σκοπό έχει την μείωση των παραμενουσών τάσεων που δημιουργήθηκαν κατά την ψυχρή κατεργασία ή κατά την χύτευση. Επίσης η ανόπτηση μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η ανόπτηση γίνεται σε θερμοκρασίες της τάξης του  $1/3$  και του  $1/2$  του σημείου τήξης του υλικού. Πιο συγκεκριμένα στο αλουμίνιο η ανόπτηση γίνεται σε θερμοκρασίες από  $300^{\circ}\text{C}$  έως  $450^{\circ}\text{C}$ . Ο χρόνος καθώς και η θερμοκρασία της ανόπτησης παίζουν σπουδαίο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4) φαίνεται η επίδραση του χρόνου αλλά και της θερμοκρασίας ανόπτησης σε δύο κράματα αλουμινίου.

### Representative isothermal annealing curves for 1100-H18 and 5052-H18



Σχήμα 4

Είναι εμφανές ότι θερμοκρασία στην οποία γίνεται η ανόπτηση επιδρά σημαντικά στο όριο διαρροής σε αντίθεση με τον χρόνο ο οποίος έχει μικρότερη επίδραση. Επίσης συνδυάζοντας τις κατάλληλες θερμοκρασίες με τον κατάλληλο χρόνο, μπορούμε να πάρουμε κράματα με μηχανικές ιδιότητες ενδιάμεσες του ψυχρά διαμορφωμένου υλικού και του πλήρως ανοπτημένου υλικού.

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των διάφορων ειδών ανόπτησης:

- **Ολική ανόπτηση.** Η ολική ανόπτηση εφαρμόζεται σε θερμικώς και μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα και δίνει προϊόντα τα οποία έχουν τη μέγιστη κατεργασιμότητα και ολκιμότητα. Επίσης το υλικό μετά την ανόπτηση είναι ανακρυσταλλωμένο. Οι θερμοκρασίες στις οποίες γίνεται αυτή η κατεργασία είναι της τάξεως των 345° C έως 415° C και ο χρόνος 2-3 ώρες. Στα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα, οι φάσεις που δημιουργούνται από τα κραματικά στοιχεία και το αλουμίνιο, μετά από την κατεργασία της ολικής ανόπτησης κατακρημνίζονται και έτσι σταθεροποιούνται και αποτρέπεται η φυσική γήρανση.
- **Μερική ανόπτηση.** Η μερική ανόπτηση εφαρμόζεται σε ψυχρά κατεργασμένα, μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα. Σκοπό έχει να παράγει προϊόντα με μηχανικές ιδιότητες ενδιάμεσες του υλικού που έχει ενδοτράχυνση στο μέγιστο βαθμό ( H18 ) και του υλικού που έχει υποστεί ολική ανόπτηση. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται είναι χαμηλότερες από αυτές που δημιουργούν εκτεταμένη ανακρυστάλλωση. Τα κράματα που έχουν υποβληθεί σε μερική ανόπτηση χαρακτηρίζονται από τον κωδικό H2.
- **Αποτακτική ανόπτηση.** Η αποτακτική ανόπτηση εφαρμόζεται σε θερμικώς κατεργάσιμα, διαμορφωμένα κράματα. Σκοπό έχει την απαλλαγή του υλικού από μηχανικές τάσεις που εφαρμόστηκαν κατά την ενδοτράχυνση. Η αποτακτική ανόπτηση γίνεται σε θερμοκρασίες μέχρι 345° C. Κατά την αποτακτική ανόπτηση το υλικό ενδέχεται να υποστεί μερική ή ακόμα και ολική ανακρυστάλλωση.
- **Ανόπτηση των χυτών κραμάτων αλουμινίου.** Η ανόπτηση αυτή γίνεται σε θερμοκρασίες της τάξεως των 315° C έως 345° C και σκοπό έχει αφορά την απαλλαγή των χυτών από τις παραμένουσες τάσεις. Επίσης αυτή η ανόπτηση προσδίδει στα χυτά μεγάλη διαστασιακή σταθερότητα σε βαθμιαίες θερμάνσεις.

## 2.3.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ

### 2.3.3.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

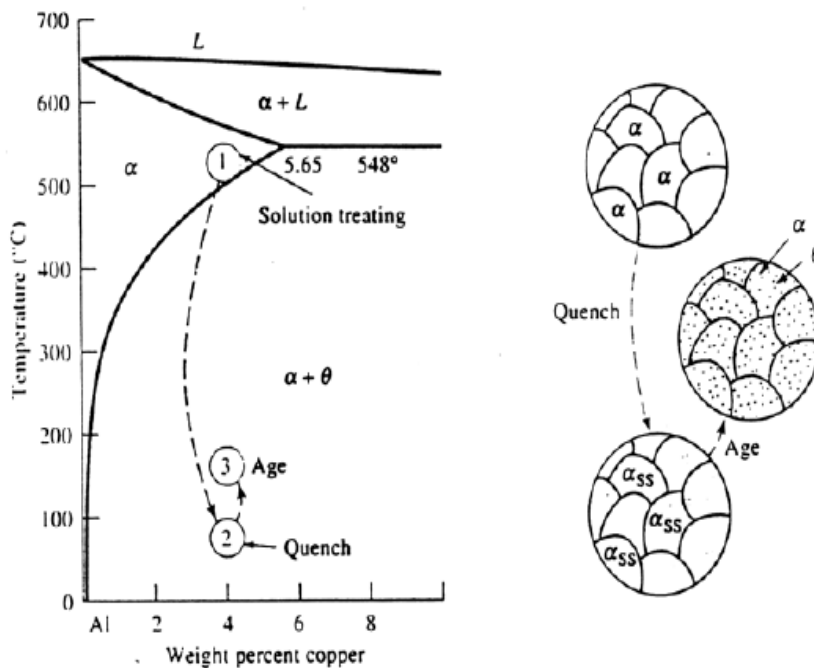
Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση είναι μια διαδικασία με την οποία δημιουργούμε μια λεπτομερή διασπορά σωματιδίων δεύτερης φάσης (κατακρημνίσματα), εντός του μητρικού υλικού. Τα κατακρημνίσματα αυτά δρουν ανασταλτικά ως προς την κίνηση των διαταραχών έτσι έχουμε αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Πιο συγκεκριμένα οι διαταραχές αναγκάζονται να τμήσουν τα κατακρημνίσματα ή να τα παρακάμψουν όποτε οι κίνηση των διαταραχών μέσα στο υλικό παρεμποδίζεται.

Η σκλήρυνση με κατακρήμνιση πραγματοποιείται σε τρία στάδια, τα οποία είναι **1.Ομογενοποίηση, 2.Βαφή, 3.Γήρανση**. Η διαδικασία αυτή βρίσκει εφαρμογή στα θερμικώς κατεργάσιμα κράματα. Αντίθετα στα μη θερμικώς κατεργάσιμα κράματα η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με κατακρήμνιση έχει ελάχιστη έως μηδενική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες.



### 2.3.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ 3 ΣΤΑΔΙΩΝ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΗ.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με κατακρήμνιση πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται παραστατικά τα 3 στάδια της θερμικής κατεργασίας σκλήρυνσης με κατακρήμνιση:



Σχήμα 5

- $\alpha_{ss}$  είναι το υπέρκορο στερεό διάλυμα
- $\alpha$  είναι το στερεό διάλυμα σε κατάσταση ισορροπίας
- $\theta$  είναι τα κατακρημνίσματα

Το πρώτο στάδιο είναι η **ομογενοποίηση**. Στην ομογενοποίηση έχουμε θέρμανση του υλικού κοντά στη θερμοκρασία solidus. Με την θέρμανση αυτή προσπαθούμε να επιτύχουμε τη διάλυτοποίηση των κραματικών στοιχείων στη μητρική φάση του αλουμινίου. Έτσι δημιουργείται ένα υπερεκορεσμένο, σε κραματικά στοιχεία, στερεό διάλυμα.

Η θερμοκρασία ομογενοποίησης είναι σημαντικός παράγοντας αφού σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό διάχυσης των κραματικών στοιχείων. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερα κραματικά στοιχεία διαχέονται στο στερεό διάλυμα και το στερεό διάλυμα γίνεται πιο ομογενές οπότε θα έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στα

επόμενα στάδια της θερμικής κατεργασίας. Οπότε για την ομογενοποίηση θα πρέπει να εκλέγεται η ανώτερη θερμοκρασία η οποία θα επιτρέπει τον μέγιστο βαθμό διάχυσης αλλά και να μην προκαλεί επανάτηξη του κράματος.

Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στην ομογενοποίηση είναι ο χρόνος. Ο χρόνος πρέπει να είναι αρκετός ώστε να γίνει πλήρης διάχυση όλων των κραματικών στοιχείων σε όλη τη μάζα του μητρικού υλικού και να δημιουργηθεί ένα ομογενές στερεό διάλυμα. Έτσι ο χρόνος μπορεί να είναι από μερικά λεπτά για λεπτά φύλλα έως και 20 ώρες για μεγάλα χυτά αντικείμενα.

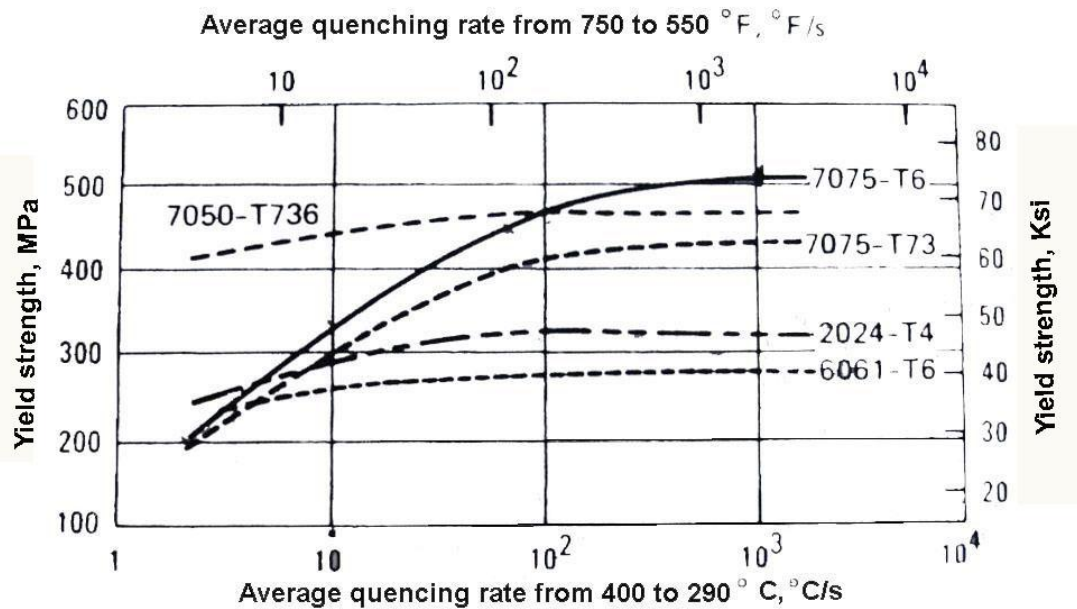
Το δεύτερο στάδιο είναι η **βαφή**. Σκοπός της βαφής είναι η διατήρηση του υπέρκορου στερεού διαλύματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό επιτυγχάνεται με ταχεία ψύξη του κράματος σε κάποιο ψυκτικό μέσο. Παραδείγματα ψυκτικών μέσων είναι το νερό, το λάδι, το υγρό άζωτο, η ακόμη και το ρεύμα αέρα. Κάθε ψυκτικό μέσο έχει και διαφορετικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας οπότε κάθε ψυκτικό μέσο προσφέρει και διαφορετικό ρυθμό ψύξης. Η ψύξη κατά τη βαφή γίνεται με συναγωγή θερμότητας. Ο ρυθμός ψύξης δίνεται από την παρακάτω σχέση η οποία είναι γνωστή και σαν «Νόμος της Ψύξεως του Newton» :

$$q = \bar{h}A(T_w - T_\infty)$$

Από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι στον ρυθμό ψύξης επιδρά ο συντελεστής συναγωγής θερμότητας **h** και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ψυχόμενου υλικού και του ψυκτικού μέσου

Ο ρυθμός ψύξης επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες καθώς και στην αντοχή των κραμάτων σε διάβρωση. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο πιο αργός είναι ο ρυθμός ψύξης, τα διαλυτοποιημένα κραματικά στοιχεία προλαβαίνουν να διαχυθούν και έτσι μειώνεται ο αριθμός των διαλυτοποιημένων κραματικών στοιχείων που θα δώσουν στη συνέχεια κατακρημνίσματα. Αντίθετα όσο πιο γρήγορος είναι ο ρυθμός ψύξης, τα διαλυτοποιημένα κραματικά στοιχεία δε διαχέονται οπότε μεγαλώνει ο αριθμός των κατακρημνισμάτων και συνεπώς βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6) φαίνεται πως επιδρά ο ρυθμός ψύξης στο όριο διαρροής σε τρία διαφορετικά κράματα:

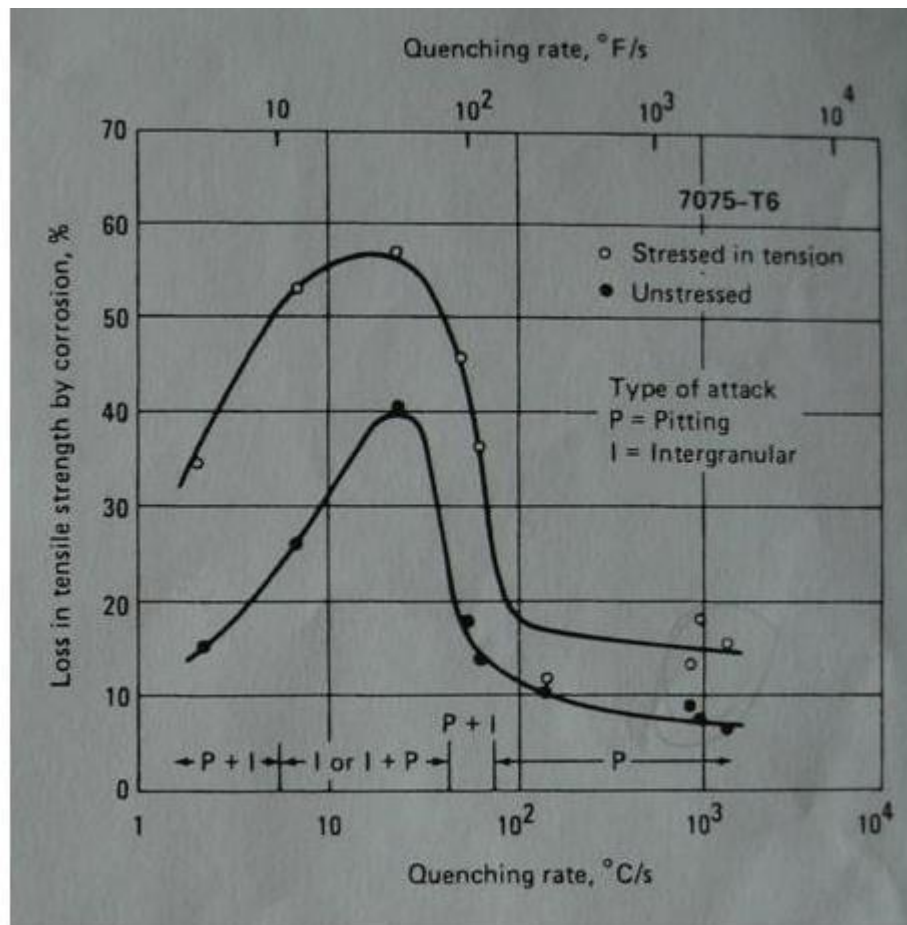


Σχήμα 6

Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ψύξης, αυξάνεται το όριο διαρροής σε κράματα τα οποία είναι ευαίσθητα στις αλλαγές του ρυθμού ψύξης. Τέτοια κράματα είναι της σειράς 7xxx. Αντίθετα για κράματα που δεν είναι ευαίσθητα σε αλλαγές του ρυθμού ψύξης, όπως σειρά 2xxx και η σειρά 6xxx, η αύξηση του ρυθμού ψύξης δεν έχει σημαντική επίδραση στο όριο διαρροής. Αυτό επιβαιβεώνεται από το παραπάνω διάγραμμα.

Στο κράμα 7075 για να επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή απαιτείται ρυθμός ψύξης 330° C/sec και άνω. Επίσης για μέγιστη αντοχή σε διάβρωση απαιτείται ρυθμός ψύξης όχι κατώτερος από 280 C/sec.

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 7) φαίνεται η επίδραση του ρυθμού ψύξης στην αντοχή σε διάβρωση και στη μείωση του ορίου θραύσεως κράμα Al 7075 T6.



Σχήμα 7

Επίσης σημαντικό ρόλο στη βαφή παίζει και ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της ομογενοποίησης και της ταχείας ψύξης. Εάν επιδιώκεται αυξημένο όριο διαρροής ή αντίσταση σε διάβρωση, θα πρέπει να μεσολαβεί όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα μεταξύ ομογενοποίησης και βαφής ώστε να αποφευχθεί πιθανή ψύξη στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τη μεταφορά από τον φούρνο στο ψυκτικό μέσο.

Το τρίτο στάδιο είναι η **γήρανση**. Η γήρανση είναι η διαδικασία με την οποία δημιουργείται μία ομοιόμορφη διασπορά κατακρημνισμάτων από τα από το υπέρκορο στερεό διάλυμα. Επειδή το υπέρκορο στερεό διάλυμα δε βρίσκεται σε ισορροπία, κατά τη διάρκεια της γήρανσης μεταπίπτει σε πιο σταθερή θερμοδυναμική μορφή με ταυτόχρονο σχηματισμό κατακρημνισμάτων. Πιο συγκεκριμένα στο αρχικό στάδιο της γήρανσης δημιουργούνται οι ζώνες G.P.(Guinier-Preston). Οι ζώνες αυτές αποτελούνται

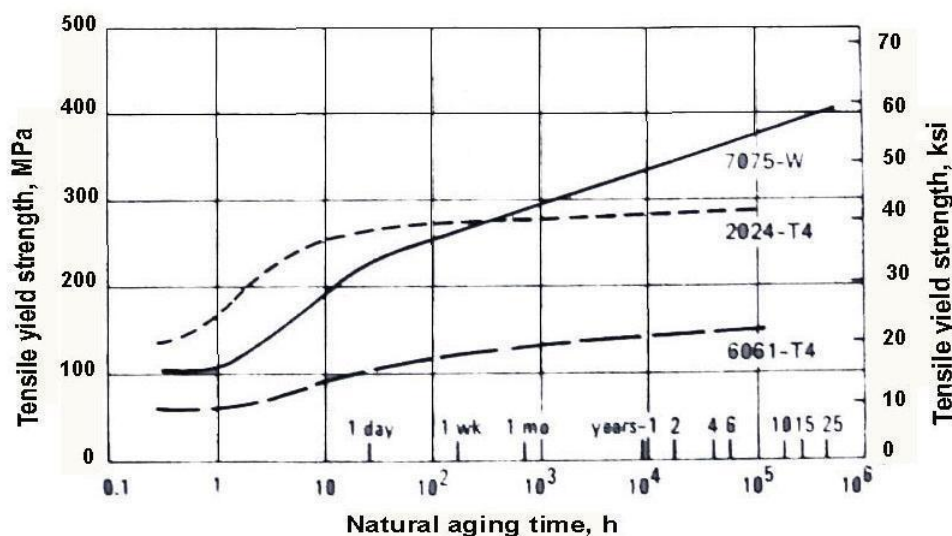
από άτομα διαλελυμένων κραματικών στοιχείων (π.χ .Cu,Mg, Zn), που έχουν συσσωματωθεί. Στη συνέχεια οι ζώνες G.P. αυξάνουν σε μέγεθος και δημιουργούν τα κατακρημνίσματα. Η γήρανση είναι δύο ειδών α) **φυσική** και β) **τεχνητή**. Η φυσική γήρανση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σε αντίθεση με την τεχνητή η οποία πραγματοποιείται σε υψηλότερη θερμοκρασία (120° C– 200° C).

### Φυσική γήρανση

Κράματα τα οποία έχουν υποστεί ομογενοποίηση και βαφή στη συνέχεια εάν αφεθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος παθαίνουν φυσική γήρανση. Τέτοια κράματα είναι της σειράς 6xxx με μεγάλο ποσοστό κραμάτωσης, της σειράς 7xxx που περιέχουν χαλκό και όλα τα κράματα της σειράς 2xxx.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως επιδρά ο χρόνος της φυσικής γήρανσης στο όριο διαρροής.

#### Natural aging curves for three solution heat treated wrought aluminum alloys

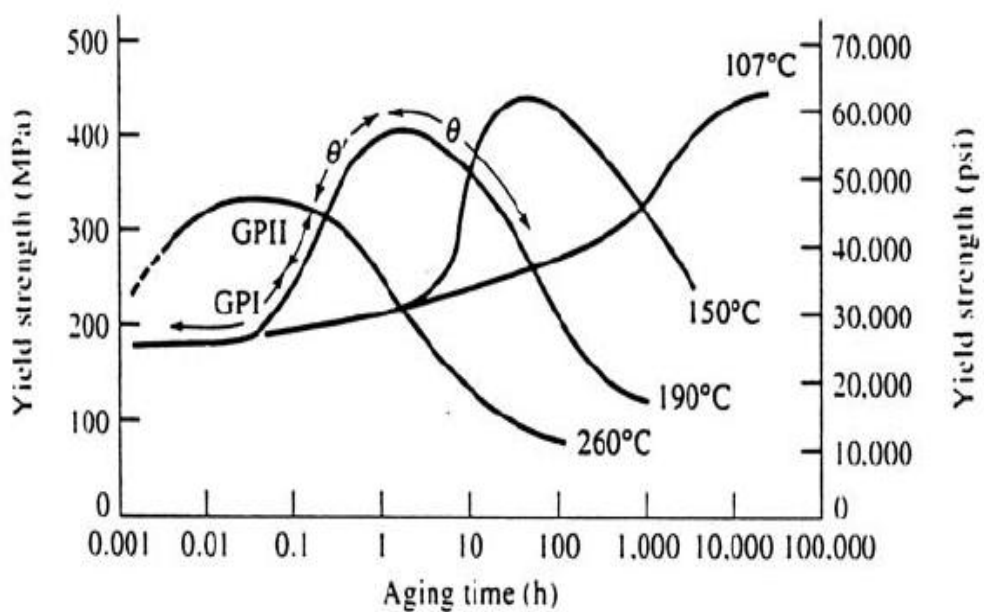


Σχήμα 7

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα (Σχήμα 7) το κράμα της σειράς 2xxx σε διάστημα μερικών ημερών φτάνει σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή δεν υπάρχει μεταβολή στο όριο διαρροής, αντίθετα το κράμα της σειράς 6xxx και το κράμα της σειράς 7xxx σε μεγαλύτερο βαθμό εμφανίζει σημαντικές μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες με την πάροδο του χρόνου, για αρκετά χρόνια.

## Τεχνητή γήρανση

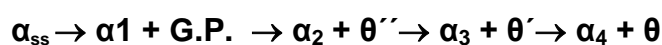
Οι δύο παράγοντες που επιδρούν στην τεχνητή γήρανση είναι η θερμοκρασία και ο χρόνος. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της γήρανσης, οι μηχανικές ιδιότητες μειώνονται και όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος της γήρανσης οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται. Παρακάτω φαίνεται η επίδραση του χρόνου και της θερμοκρασίας γήρανσης, στο όριο διαρροής σε ένα κράμα αλουμινίου χαλκού.



Σχήμα 8

Ένα τυπικό παράδειγμα όπου μπορεί να μελετηθεί η τεχνητή γήρανση είναι το κράμα Al-4,0% κ.β. Cu. Το κράμα υποβάλλεται σε γήρανση στους 130° C. Στο πρώτο στάδιο έχουμε τη συσσωμάτωση ατόμων Cu σε επίπεδα κατά μήκος των επιπέδων {111} της μήτρας αλουμινίου. Αυτά τα συσσωματώματα είναι οι ζώνες GP που έχουν τη μορφή κυκλικών δίσκων και είναι συνεκτικές με τη μήτρα του αλουμινίου. Στο δεύτερο στάδιο έχουμε τον μετασχηματισμό των ζωνών GP σε κατακρημνίσματα θ' τα οποία έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από τις ζώνες GP και έχουν σύσταση  $\text{CuAl}_2$ . Στο τρίτο στάδιο η φάση θ' μετασχηματίζεται σε θ' η οποία είναι ημισυνεκτική με την μήτρα του αλουμινίου. Στο τελικό στάδιο έχουμε τον σχηματισμό της φάσης ισορροπίας θ ( $\text{CuAl}_2$ ) η οποία είναι μη συνεκτική με την μήτρα του αλουμινίου.

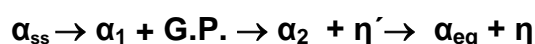
Η παραπάνω διαδικασία δίνεται παρακάτω με συμβολισμούς :



$\alpha_{ss}$  είναι το υπέρκορο στερεό διάλυμα

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ , είναι τα στερεά διαλύματα σε ισορροπία με τις G.P., την  $\theta''$ , την  $\theta'$  και την  $\theta$  φάση αντίστοιχα.

Για το κράμα Al 7075 ισχύει ένας παρόμοιος μηχανισμός γήρανσης με το παραπάνω κράμα και τα κατακρημνίσματα που δημιουργούνται έχουν σύσταση  $Mg(Zn,Cu,Al)_2$ . Παρακάτω περιγράφεται με συμβολισμούς αυτός ο μηχανισμός.



$\alpha_{ss}$  είναι το υπέρκορο στερεό διάλυμα

$\alpha_1, \alpha_2$  είναι τα στερεά διαλύματα με ενδιάμεσες διαλυτότητες και βρίσκονται σε ισορροπία με τις ζώνες G.P. και τη φάση  $\eta'$

$\alpha_{eq}$  είναι το στερεό διάλυμα σε ισορροπία με την  $\eta'$  φάση.

## **2.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

### **2.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου. Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό. Στις ηλεκτροχημικές δράσεις παίρνει μέρος ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο προέρχεται είτε από αυθόρμητη λειτουργία γαλβανικών στοιχείων, είτε από εξωτερική επιβολή τάσης. Σε όλες τις χημικές δράσεις υπάρχει οξειδοαναγωγικό στάδιο, που σε αυτό ανταλλάσσονται ηλεκτρόνια ή ιόντα ανάμεσα στο κράμα ή το μέταλλο και το περιβάλλον του.

## 2.4.2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο και τα κράματά του παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και αυτό οφείλεται στο λεπτό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του υλικού. Το οξείδιο αυτό έχει την ιδιότητα να σχηματίζεται ταχύτατα μόλις το υλικό έρθει σε επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης εάν αυτό το προστατευτικό οξείδιο καταστραφεί, εύκολα αναγεννάται. Το πάχος του οξειδίου είναι της τάξεως του 1 nm, αλλά παρα το γεγονός ότι είναι αρκετά λεπτό, παρέχει αποτελεσματική προστασία από τη διάβρωση. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται όταν το αλουμίνιο είναι σε κανονική ατμόσφαιρα έχει αρκετά μεγαλύτερο πάχος. Αυτό αποτελείται από δύο ζώνες. Η πρώτη ζώνη, αυτή που βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο, έχει άμορφη κρυσταλλική δομή και πάχος το οποίο καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από την θερμοκρασία. Η δεύτερη ή εξωτερική ζώνη έχει μεγαλύτερο πάχος και αυξημένο πορώδες και αποτελείται από ένυδρα οξείδια.

Το προστατευτικό στρώμα χαρακτηρίζεται σαν μια λεπτή ισορροπία μεταξύ των δυο αντικρουόμενων δυνάμεων, εκείνων που τείνουν να σχηματίσουν την πρώτη συμπυκνωμένη ζώνη οξειδίου και αυτών που θέλουν να την καταστρέψουν. Εάν δεν υπάρχουν καταστρεπτικές δυνάμεις, όπως όταν το υλικό βρίσκεται σε θερμό αέρα, θα σχηματιστεί μόνο η εξωτερική ζώνη των οξειδίων που γρήγορα θα φτάσει το μέγιστο πάχος. Αντιθέτως εάν οι καταστροφικές δυνάμεις είναι πολύ υψηλές τότε η προστατευτική ζώνη των οξειδίων θα ενυδατώνεται πολύ πιο γρήγορα από ότι θα σχηματίζεται, με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή του. Στις περισσότερες περιπτώσεις που συναντούμε υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα σε αυτές τις δυο τάσεις, που καθορίζονται πάντα από το διαβρωτικό περιβάλλον.

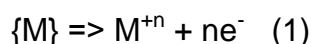
## 2.4.3 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι κυρίως ηλεκτροχημικό και προκύπτει όταν τα άτομα των μετάλλων οξειδώνονται και φεύγουν από το υλικό με την μορφή ιόντων. Κατά την διαδικασία αυτή έχουμε την μεταφορά ηλεκτρονίων από τα άτομα του υλικού προς

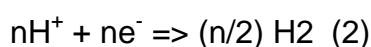


το διάλυμα του ηλεκτρολύτη και στην συνέχεια την αποχώρησή των ατόμων από το υλικό με τη μορφή θετικά φορτισμένων ιόντων. Οπότε η άνοδος είναι το αλουμίνιο αφού από αυτό φεύγουν τα ηλεκτρόνια και έχουμε διάβρωση και η κάθοδος είναι το ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Παρακάτω δίνονται οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο κατά τη διάβρωση ενός μετάλλου.

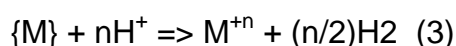
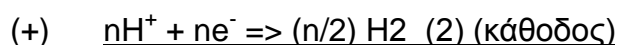
Στην άνοδο έχουμε :



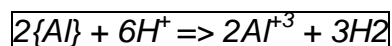
Στην κάθοδο όταν δεν υπάρχει διαλυμένο οξυγόνο έχουμε :



Το άθροισμα των δύο παραπάνω αντιδράσεων δίνει

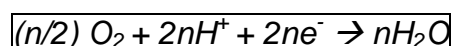


οπότε για το αλουμίνιο έχουμε :

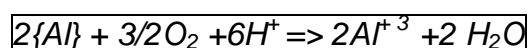


Όπως φαίνεται από την αντίδραση, δύο άτομα αλουμινίου δίνουν τα τρία ηλεκτρόνια της εξωτερικής τους στοιβάδας (ηλεκτρόνια σθένους) και μετατρέπονται σε ιόντα  $Al^{+3}$ . Τα ιόντα υδρογόνου  $H^{+}$ , προσλαμβάνουν τα έξι ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται και σχηματίζουν τρία άτομα υδρογόνου.

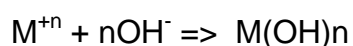
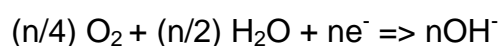
Αν το διάλυμα περιέχει διαλυμένο οξυγόνο, ναι μεν η ανοδική αντίδραση παραμένει η ίδια, αλλά η καθοδική μετασχηματίζεται στην ακόλουθη:



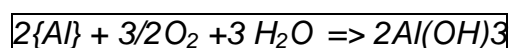
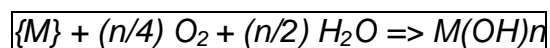
επομένως παίρνουμε :



Τέλος στην περίπτωση που το διάλυμα είναι ουδέτερο (PH=7) τότε η διαδικασία της διάβρωσης του μετάλλου θα αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:



επομένως παίρνουμε :



#### 2.4.4 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά τη διάβρωση έχουμε στην άνοδο περίσσεια ηλεκτρονίων και στην κάθοδο έλλειμα ηλεκτρονίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού δυναμικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το δυναμικό διάβρωσης το υλικό έχει την τάση να μη διαβρώνεται, αντιθετα όσο μικρότερο είναι το δυναμικό διάβρωσης το υλικό έχει την τάση να διαβρώνεται ευκολότερα.

Συνήθως το δυναμικό διάβρωσης μετριέται σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς που είναι το ηλεκτρόδιο καλομέλινα (calomel half-cell reference electrode). Η χρήση του παραπάνω ηλεκτροδίου σαν σημείο αναφοράς μας δίνει τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τα δυναμικά διάβρωσης διαφορετικών υλικών μεταξύ τους και να εξάγουμε συμπεράσματα για την τάση που έχουν να διαβρωθούν.

## 2.4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας παρουσιάζει την καλύτερη αντοχή σε διάβρωση επειδή έχει μικρότερες πιθανότητες να έχει ατέλειες στο στρώμα του προστατευτικού οξειδίου, εξαιτίας ετερογένειας στη μικροδομή του.

Τα κραματικά στοιχεία και οι προσμίξεις ενώ αυξάνουν τις μηχανικές ιδιότητες ταυτόχρονα επιδρούν στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Η επίδραση στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά οφείλεται στο διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης που παρουσιάζουν σε σχέση με το μητρικό υλικό αλουμινίου.

Τα κραματικά στοιχεία και οι προσμίξεις κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αυτά που είναι σχετικά διαλυτά και είτε κατακρατούνται στο στερεό διάλυμα είτε κατακρημνίζονται σαν δεύτερες φάσεις. Στην δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται αυτά που είναι αδιάλυτα ή σχηματίζουν ενδομεταλλικές ενώσεις.

### **Διαλυτά στοιχεία**

Ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το μαγνήσιο έχουν σημαντική στερεά διαλυτότητα. Το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος κάνουν το στερεό διάλυμα πιο ηλεκτροχημικά ενεργό. Αντίθετα ο χαλκός κάνει το στερεό διάλυμα λιγότερο ηλεκτροχημικά ενεργό.

### **Αδιάλυτα στοιχεία**

Αδιάλυτα στοιχεία είναι το πυρίτιο, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το χρώμιο, το ζirkόνιο, το βανάδιο, το τιτάνιο και το νικέλιο. Αυτά βρίσκονται στα κράματα αδιάλυτα σε στοιχειακή μορφή ή πιο συχνά σχηματίζουν ενδομεταλλικές ενώσεις οι οποίες είναι διασπαρμένες στο υλικό. Οι ενδομεταλλικές ενώσεις παρουσιάζουν διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης σε σχέση με τη μητρική φάση του αλουμινίου και έτσι δρουν ως κάθοδοι ή άνοδοι δημιουργώντας τοπικά γαλβανικά στοιχεία. Για παράδειγμα, ενδομεταλλικές ενώσεις όπως  $FeAl_3$ ,  $MnAl_6$  έχουν την τάση να αυξάνουν τη συχνότητα εμφάνισης βελονοειδούς διάβρωσης.

## 2.4.6 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Κατά τη διάβρωση του αλουμινίου και των κραμάτων του παρατηρούνται διάφορες μορφές διάβρωσης που αναλύονται παρακάτω :

**Βελονοειδής διάβρωση (pitting corrosion):** Η βελονοειδής διάβρωση παρατηρείται όταν το αλουμίνιο βρίσκεται στην παθητική του περιοχή και είναι μια μορφή διάβρωσης όπου έχουμε τον σχηματισμό τυχαιών βελονών (pits). Στα κράματα αλουμινίου η βελονοειδής διάβρωση δημιουργείται από τα διαβρωτικά ιόντα (halide ions), από τα οποία τα χλωρίδια είναι αυτά που συναντούνται πιο συχνά. Η διαδικασία σχηματισμού των βελονών έχει ως εξής :

Πρώτα αποροφώνται χλωριόντα στις ατέλειες του λεπτού στρώματος οξειδίου που προστατεύει το αλουμίνιο. Στη συνέχεια δημιουργείται χημική αντίδραση των χλωριόντων με τα ιόντα του αλουμινίου και δημιουργείται  $Al(OH)_2Cl$ . Τέλος απομακρύνονται τα προϊόντα που σχηματίστηκαν από την παραπάνω αντίδραση και έτσι το προστατευτικό οξείδιο αδυνατίζει με αποτέλεσμα να μη προστατεύεται το υλικό από το οξείδιο και να διαβρώνεται δημιουργώντας μια οπή.

**Γαλβανική διάβρωση (galvanic corrosion):** Η γαλβανική διάβρωση εξηγείται ως εξής : Εάν δυο διαφορετικά μέταλλα (π.χ αλουμίνιο και χαλκός) βυθιστούν σε έναν ηλεκτρολύτη και ενωθούν με ένα καλώδιο τότε ένα ρεύμα θα διατρέξει τον ηλεκτρολύτη από το υλικό με το μικρότερο δυναμικό διάβρωσης προς το υλικό με το μεγαλύτερο δυναμικό διάβρωσης δηλαδή από το αλουμίνιο προς τον χαλκό. Το αλουμίνιο λειτουργεί ως άνοδος και ο χαλκός ως κάθοδος.

Η γαλβανική διάβρωση μπορεί να εμφανιστεί σε μακροσκοπική κλίμακα, για παράδειγμα σε μια κατασκευή όπου συνυπάρχουν δύο υλικά με διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης, αλλά και σε μικροσκοπική κλίμακα όπως για παράδειγμα στα όρια κόκκων ενός κράματος αλουμινίου, μπορεί να υπάρχουν κατακρημνίσματα πλούσια σε χαλκό που ευνοούν τη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων.

**Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion):** Η περικρυσταλλική διάβρωση συμβαίνει λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων στα όρια κόκκων ενός υλικού. Τα γαλβανικά στοιχεία δημιουργούνται εξαιτίας διαφόρων φάσεων που καταρηνμίζονται στα όρια κόκκων. Οι φάσεις που κατακρημνίζονται έχουν διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης από το εσωτερικό του κόκκου με αποτέλεσμα την επιλεκτική διάβρωση των φάσεων αυτών. Στην περικρυσταλλική διάβρωση παρατηρούμε πως η διάβρωση εμφανίζεται στα όρια των κόκκων, σε αντίθεση με τις περιοχές εντός των κόκκων που δεν προσβάλλονται από τη διάβρωση.

**Σπηλαιώδης διάβρωση (crevice corrosion):** Η σπηλαιώδης διάβρωση δημιουργείται κυρίως σε σημεία όπου υπάρχουν εγχοπές και κενά. Εκεί παραμένουν λιμνάζοντα διαλύματα που παρεμποδίζουν τη διάχυση του οξυγόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός διαφορετικού περιβάλλοντος διάβρωσης από το εξωτερικό περιβάλλον. Έτσι η οξειδωση του οξυγόνου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με αποτέλεσμα να αποκτά ανοδικό χαρακτήρα η σπηλαιώδης περιοχή, σε αντίθεση με τον καθοδικό χαρακτήρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Οπότε έχουμε διάβρωση του υλικού. Κατά τη διάβρωση στην σπηλαιώδη περιοχή υπάρχει έκλυση θετικού φοτίου το οποίο δημιουργεί ένα όξινο περιβάλλον το οποίο οπεία ελκύει αρνητικά φορτισμένα ιόντα (κυρίως χλωριόντα) με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η διάβρωση

Το βάθος της διάβρωσης είναι τόσο μικρό που ορισμένες φορές δεν μπορεί καν να μετρηθεί. Ωστόσο η θολή όψη του κράματος στο σημείο της σπηλαιώδους διάβρωσης σε αντίθεση με την γυαλιστερή και ανοιχτόχρωμη υπόλοιπη επιφάνειά του δίνει ένα άσχημο οπτικό αποτέλεσμα. Για αυτό τα κράματα του αλουμινίου και των υπολοίπων μετάλλων πρέπει να φυλάσσονται υπό καλές συνθήκες για να αποφεύγονται φαινόμενα σπηλαιώδους διάβρωσης.

**Διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking):** Η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί μια ταχεία δημιουργία και διάδοση ρωγμών κάτω από την επίδραση διαβρωτικού μέσου και εφελκυστικής δύναμης. Ο μηχανισμός της διάβρωσης υπό καταπόνηση πραγματοποιείται σε τρία στάδια :

- 1) Τον σχηματισμό εγκοπών από την αργή διαδικασία της περικρυσταλλικής διάβρωσης.
- 2) Τοπική πλαστική παραμόρφωση στη ρίζα του εγκοπών , η οποία αφενός μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές στο υλικό και αφετέρου παρεμποδίζει τον σχηματισμό προστατευτικού στρώματος αφήνοντας εκτεθειμένο το μέταλλο – κράμα.
- 3) Ταχεία φθορά του μετάλλου – κράματος από διάβρωση.

Ο ρυθμός φθοράς σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση εξαρτάται κατά μείζονα λόγο από την ένταση της δύναμης που εφελκεί το σώμα και από την διεύθυνσή της, ως προς την ανάπτυξη των κρυστάλλων του κράματος. Για αυτό πάντα οι αξονικές καταπονήσεις θεωρούνται μικρότερης σημασίας από ότι οι κάθετες που φθείρουν με πολύ μεγαλύτερη ένταση το υλικό. Η φθορά λόγω της διάβρωσης υπό καταπόνηση εντείνεται όταν στο υλικό υπάρχουν παραμένουσες τάσεις λόγω κάποιας κατεργασίας του υλικού π.χ. έλαση, συγκόλληση κτλ.

## **2.5 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΑΙ 7075**

### 2.5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το κράμα ΑΙ 7075 ανήκει στη σειρά 7xxx. Η τυπική του χημική σύσταση σύμφωνα με το ASTM Handbook of Metals είναι η ακόλουθη :

Zn	5.1 – 6.1	wt%
Mg	2.1 – 2.9	wt%
Cu	1.2 – 2.0	wt%
Fe	0.5 max	wt%
Mn	0.3 max	wt%
Si	0.4 max	wt%
Cr	0.18 – 0.28	wt%
Ti	0.05 max	wt%
Al	Υπόλοιπο	

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος 7075 :

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	
		T (°C)	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
Πυκνότητα ( $\times 1000 \text{ kg/m}^3$ )	2.8	25	
Λόγος Poisson	0.33	25	
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	70 – 80	25	
Όριο θράυσης (MPa)	220	25	
Όριο διαρροής (MPa)	95	25	O (as fabricated)
Επιμήκυνση (%)	17	25	O (as fabricated)
Σκληρότητα (HB500)	60	25	O (as fabricated)
Διατμητική αντοχή (MPa)	150	25	O (as fabricated)
Αντοχή σε κόπωση (MPa)	160	25	T6

Η συχνότερη θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται το συγκεκριμένο κράμα είναι η T6. Η κατεργασία T6 περιλαμβάνει την ομογενοποίηση σε θερμοκρασία 480° C στη συνέχεια βαφή σε νερό και τέλος γήρανση για 24 ώρες στου 120° C. Η θερμική κατεργασία T6 δίνει στο κράμα τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες. Παρά τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες του κράματος, όταν αυτό υποβάλλεται σε εφελκυστικές τάσεις κάθετα προς τους κόκκους, εμφανίζει διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση. Η ενδεδειγμένη θερμική κατεργασία για την αποφυγή αυτού του φαινομένου είναι η κατεργασία T73 που περιλαμβάνει την ομογενοποίηση σε θερμοκρασία 480° C στη συνέχεια βαφή στο νερό και τέλος γήρανση σε δύο στάδια, πρώτα στους 105° C για 6 ώρες και στη συνέχεια γήρανση στους 160° C για 24 ώρες. Με αυτή την κατεργασία βελτιώνουμε την αντοχή σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση αλλά ταυτόχρονα έχουμε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων.

## 2.5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 7075

Το κράμα αλουμινίου 7075 παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια στη μικροδομή του και αυτό οφείλεται στον σχετικά μεγάλο αριθμό κραματικών στοιχείων που περιέχει. Έτσι η μικροδομή του κράματος 7075 μπορεί να περιέχει μικροσκοπικά κατακρημνίσματα της τάξεως των μερικών nm τα οποία μπορεί να είναι **MgZn<sub>2</sub>** (η' φάση), ή ζώνες G.P. Επίσης ο χαλκός σχηματίζει ενδομεταλλικές ενώσεις όπως **Al<sub>2</sub>CuMg** (S φάση) με τάξη μεγέθους ~3μm αλλά εμφανίζεται και σε μέγεθος 0,5-10μm. Ακόμη εξαιτίας του χαλκού σχηματίζεται **Al<sub>2</sub>Cu** (θ φάση). Επίσης παρατηρούνται σωματίδια **Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe** συσσωματωμένα σε επιμηκυσμένους σχηματισμούς με τάξη μεγέθους ~ 15 μm. Ο σίδηρος λόγω της ελάχιστης του διαλυτότητας στο αλουμίνιο σχηματίζει αδιάλυτα σωματίδια όπως FeAl<sub>3</sub>. Ακόμη στα όρια των κόκκων σχηματίζονται ενδομεταλλικές ενώσεις με χημικό τύπο **Mg(ZnCuAl)<sub>2</sub>** με μέγεθος 50-100 nm. Τέλος στη μικροδομή του κράματος συναντάται πυρίτιο αδιάλυτο ή σωματίδια **Mg<sub>2</sub>Si**.

Οι ενδομεταλλικές ενώσεις που δημιουργούνται επιδρούν σημαντικά στη διάβρωση αφού έχουν διαφορετικό δυναμικό διάβρωσης από το μητρικό υλικό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τοπικά μικρογαλβανικά στοιχεία. Επίσης η φάση S έχει βρεθεί από προηγούμενες μελέτες, ότι έχει αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος.



### **3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της διαβρωσης στις δοκιμες εφελκυσμου σε διαμορφωμενο κραμα Al 7075 T6, και σε προσωπικο επιπεδο, η εκμαθηση χειρισμου οργανων, τεχνικων, διαδικασιων και θεωριας που να οδηγουν σε ενα εγκυρο και επιστημονικα τεκμηριωμενο αποτελεσμα.

Η διαβρωση εγινε σε υδατικο διαλυμα NaCl 0,01 M και τιμης pH ιση με 7,5. Οι αλλαγές που έγιναν στις συνθηκες διαβρωσης, ήταν στη μεταβολή του χρονου διαβρωσης καθως και στα δυναμικα, στα οποια εγινε αυτη. Τα κριτηρια επιλογης ηταν η μεταβολη της διαβρωτικης δρασης με την παροδο διαφορετικων χρονικων περιοδων αλλα και η μεταβολη για διαφορετικες τιμες δυναμικου της ποτενσιοδυναμικης καμπυλης, που να δινουν πληροφοριες και για το ανοδικο, αλλα και για το καθοδικο κομματι της καμπυλης. Ως προς τους χρονους διαβρωσης ειχαμε 3,6, και 9 ωρες εντος του διαλυματος, ενω ως προς την επιλογη δυναμικου, επιλέχτηκαν χαρακτηριστικες τιμες στο ανοδικο και καθοδικο κομματι της ποτενσιοδυναμικης καμπυλης, καθως και σε αυτη του OCP. Οι δοκιμες εφελκυσμου γινονται αμεσως μετα το περας των διαβρωσεων.

## **4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι διαμορφωμένο κράμα αλουμινίου 7075 και προμηθεύτηκε υπό την μορφή τυποποιημένων δοκιμιών ακριβών διαστάσεων  $10 \times 1 \times 0,024 \text{ cm}^3$ . Η κοπή τους είχε γίνει με πριονοκορδέλλα και χρήση ψυκτικού υγρού προς αποφυγή αλλοίωσης της δομής και συσσωρευσης τάσεων.

### **4.1 Κοπή των δοκιμίων**

Από φύλλο αλουμινίου ίδιου πάχους πραγματοποιήθηκε κοπή με τη βοήθεια δισκοτομou, δοκιμίων διαστάσεων  $2 \times 1 \times 0,024 \text{ cm}^3$ . Τα δοκίμια αυτά χρησιμοποιήθηκαν, μετά από την λείανση και την χημική προσβολή, για την μελέτη της δομής (μεταλλογραφία) του υλικού, τις μετρήσεις μικροσκληρότητας και την παρατήρηση τους στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκοπιο, καθώς και στις μετρήσεις του XRD.

Για τις δοκιμές ποτενσιοστατικής διάβρωσης καθώς και εφελκυσμού, που αποτέλεσαν το επίκεντρο της διπλωματικής αυτής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τα τυποποιημένα δοκίμια που προαναφεραμε.

### **4.2 Λείανση**

Η λείανση είναι η διεργασία με την οποία εξαφανίζονται διάφορες ανωμαλίες που τυχόν υπάρχουν στην επιφάνεια των μετάλλων. Ουσιαστικά, με την λείανση, μειώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας του υλικού μας και είναι δυνατόν να αποκαλυφθεί η δομή του έπειτα από στίλβωση και κατάλληλη χημική προσβολή. Επιπλέον, οι χαμηλές τιμές τραχυτητας είναι ομοιες για το σύνολο των δοκιμιών.

Η λείανση πραγματοποιήθηκε σε ειδικό οριζόντιο περιστρεφόμενο λειαντικό τροχό με μια σειρά από λειαντικά χαρτιά που αντιστοιχούν σε διαφορετικό μέγεθος κόκκων του χαρτιού, ώστε με κάθε πέρασμα να βελτιώνεται η ποιότητα της επιφάνειας των υλικών. Τα λειαντικά χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα επωνομαζόμενα

Waterproof abrasive papers – Smirdex με διαστάσεις 23 x 28 cm<sup>2</sup>. Τα λειαντικά χαρτιά κόπηκαν με ψαλίδι σε κυκλικό σχήμα προκειμένου να προσαρμοστούν στο τροχό.

Τα λειαντικά χαρτιά αποτελούνται από καρβίδιο του πυριτίου. Το καρβίδιο του πυριτίου αποτελεί ένα πολύ καλό λειαντικό μέσο διότι είναι αδρανές, πολύ σκληρό και παρουσιάζει υψηλή αντοχή.

Κατά την διάρκεια της λείανσης στον περιστροφικό δίσκο, υπάρχει κατάλληλη τροφοδοσία νερού ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αύξησης της θερμοκρασίας λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής. Επίσης, η τροφοδοσία νερού συμβάλει στη ψύξη του δοκιμίου και στην απομάκρυνση των υπολειμμάτων της τριβής (υπολείμματα υλικού και κόκκων καρβιδίου του πυριτίου), που θα μπορούσαν να προκαλέσουν χαρακιές στην επιφάνεια των δοκιμίων.

Για την διεργασία της λείανσης χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα λειαντικά χαρτιά:

- 220 grid
- 400 grid
- 600 grid
- 800 grid
- 1000 grid
- 1200 grid
- 2000 grid

Οι γραμμές που σχηματίζονται από την λείανση "εξαφανίζονται" με κάθε νέο χαρτί αν τοποθετήσουμε το δοκίμιο κάθετα ως προς τις προηγούμενες γραμμές.

### **4.3 Αποτατική ανόπτηση**

Πριν ολοκληρωθεί η διεργασία της λείανσης, τα δοκίμια έπρεπε να υποστούν αποτατική ανοπτηση. Ο σκοπός της θερμικής αυτής κατεργασίας είναι η μείωση των μηχανικών τάσεων που μπορεί να δημιουργήθηκαν κατά την μηχανική κατεργασία του κράματος (π.χ. έλαση, κοπή). Οι παραμένουσες μηχανικές τάσεις μπορεί να προκαλέσουν εύκολα ρωγμές σε ενδεχόμενη φόρτιση του υλικού.

Η αποτατική ανόπτηση πραγματοποιείται με την θέρμανση του υλικού στο 1/2 ή στο 1/3 του σημείου τήξεως και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Εν συνεχεία, το υλικό αποψύχεται με αργό ρυθμό.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε στους 410°C σε κλίβανο αδρανούς αερίου (Ar) για δυο ωρες και στην συνέχεια ακολούθησε απόψυξη με αργό ρυθμό εντός του κλιβάνου. Η κατεργασία αυτή γινόταν κάθε φορά που φτανάμε στη λείανση με χαρτί 800 και με το πέρας της, συνεχίζοταν η λείανση με τα υπολοιπα χαρτια.

#### 4.4 Στίλβωση

Η στίλβωση είναι μια μέθοδος βελτίωσης της ποιότητας της επιφάνειας ενός υλικού και λαμβάνει χώρα μετά την λείανση.

Μετά την λείανση το δοκίμιο είναι αρκετά λείο όμως παραμένουν σε αυτό μικρές γραμμές που προήλθαν από την απόξεση του υλικού από τους κόκκους του λειαντικού χαρτιού. Με την στίλβωση αυτές οι χαραγές απομακρύνονται και το δοκίμιο φαίνεται στιλπνό και λαμπερό ενώ παρουσιάζει μεγάλη ανακλαστικότητα, σαν καθρέφτης.

Μετά την αποτατική ανόπτηση και κατοπινη λείανση , τα δοκίμια στιλβώθηκαν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε ειδικό περιστρεφόμενο δίσκο. Η διαδικασία είναι όμοια με αυτή της λείανσης, μόνο που αντί για λειαντικό χαρτί πάνω στον δίσκο υπάρχει κατάλληλο ύφασμα, στην επιφάνεια του οποίου έχουμε απλώσει αδαμαντόπαστα. Η πάστα αυτή έχει πολύ μικρό μέγεθος κόκκων ~3μm. Ως μέσο ψύξης χρησιμοποιήθηκε οινόπνευμα ώστε να πάρουμε όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα επιφάνειας.

Μετά την στίλβωση, βελτιστοποιήθηκε η ποιότητα της επιφάνειας των δοκιμίων, ενώ απομακρύνθηκαν και τυχόν σχηματιζόμενα οξειδία.

#### 4.5 Χημική Προσβολή

Μετά την στίλβωση ακολουθεί χημική προσβολή με καταλληλο χημικο αντιδραστήριο. Με τη χημική προσβολή επιδιώκεται η εμφάνιση της μικροδομής του εξεταζόμενου υλικού. Η προσβολή πραγματοποιείται με εμβάπτιση του δοκιμίου αντιδραστήριο.

Στα εξεταζόμενα δοκίμια αλουμινίου 7075 T6, σκοπός της χημικής προσβολής είναι η διάκριση φασεων .

Το αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν διάλυμα Kellers, περιεχομενου:

2ml HF ; 3ml HCl ; 5ml HNO<sub>3</sub> ; 190ml H<sub>2</sub>O.

Η προσβολή των δοκιμίων έγινε με την χρήση μπατονέτας που είχε εμποτιστεί με το διάλυμα. Μετά τη χημική προσβολή η επιφάνεια του δοκιμίου γίνεται θαμπή και χρησιμοποιείται οινόπνευμα ώστε να σταματήσει η επίδραση του αντιδραστηρίου. Εν συνεχεία, το δοκίμιο ξεπλένεται με νερό.

Μετά από δοκιμές που έγιναν, το καλύτερο αποτέλεσμα επιτεύχθηκε με χρόνο προσβολής 45 sec.

#### **4.6 Εξέταση των δοκιμίων στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο**

Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο δίνει πολλές πληροφορίες για το υλικό που μελετάμε, αφού μας δίνει την δυνατότητα να πάρουμε μια εικόνα του τρόπου με τον οποίο αναπτύσσονται οι κόκκοι ή οι διάφορες δομές στα μέταλλα και τα κράματα.

Ένα απλό μικροσκόπιο είναι ένας φακός ή σύστημα φακών που προκαλεί τη σύγκλιση των φωτεινών ακτίνων υπό μια μικρή εστιακή απόσταση. Τα σύνθετα μικροσκόπια περιλαμβάνουν τον αντικειμενικό φακό και τον προσοφθάλμιο, που αποτελούν διπλό σύστημα για τη μεγέθυνση της εικόνας. Η μεγεθυντική ικανότητα του μικροσκοπίου είναι το γινόμενο της μεγεθυντικής ικανότητας των δύο φακών.

Βασικό γνώρισμα του μεταλλογραφικού μικροσκοπίου είναι ο ανακλαστήρας. Το φως που προέρχεται από την πηγή, περνά μέσα από αυτόν και οδηγείται μέσω του αντικειμενικού φακού στο αντικείμενο που βρίσκεται πάνω στη τράπεζα του μικροσκοπίου. Έτσι, το φως ανακλάται και περνώντας πάλι μέσα από τον αντικειμενικό φακό φθάνει στον προσοφθάλμιο φακό για την παρατήρηση. Το φως που χρησιμοποιείται είναι πολωμένο γι' αυτό το σύστημα συμπληρώνεται από έναν πολωτή.

Τα εξεταζόμενα δοκίμια τοποθετούνται στην τράπεζα του μικροσκοπίου και με μετακίνηση της τράπεζας με ειδικούς μοχλούς μπορούμε να δούμε διάφορες περιοχές του αντικειμένου μας. Οι αντικειμενικοί φακοί είναι προσαρμοσμένοι σε ειδική περιστρεφόμενη διάταξη (revolver) για να μπορούν να παρεμβάλλονται εύκολα στην πορεία των ακτίνων και έχουν διάφορες μεγεθύνσεις για να προσφέρουν καλύτερη παρατήρηση. Έτσι με απλή περιστροφή του revolver μπορούμε να παρεμβάλλουμε στην πορεία των ακτίνων τον αντικειμενικό φακό με την επιθυμητή μεγέθυνση. Επίσης, υπάρχουν ειδικά φίλτρα που προσαρμόζονται στην πορεία του φωτός και βοηθούν την παρατήρηση σε ορισμένες περιπτώσεις.

Στο μικροσκόπιο μπορεί να προσαρμοστεί με ειδικό τρόπο φωτογραφική μηχανή ή κάμερα για την παρατήρηση της εικόνας που φαίνεται στο μικροσκόπιο. Έτσι λοιπόν

μας δίνεται η δυνατότητα να βγάλουμε φωτογραφίες που δείχνουν την εικόνα που βλέπει ο παρατηρητής στο μικροσκόπιο. Στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο λοιπόν μπορούμε να παρατηρήσουμε τα δοκίμια και να βγάλουμε συμπεράσματα για το είδος των μεταβολών που έλαβαν χώρα στη δομή τους. Η πραγματική μεγέθυνση του μικροσκοπίου ισούται με το γινόμενο του αριθμού της μεγέθυνσης όλων των φακών συνολικά, δηλαδή είναι για παράδειγμα:  $2 \times 3,2 \times 12,5$ .

Το οπτικό μικροσκόπιο που υπάρχει στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας και στο οποίο έγινε η παρατήρηση των δοκιμίων είναι του τύπου Karl FRANK GMBH και ονομάζεται ορθής παρατήρησης διότι η παρατηρούμενη πλευρά είναι προσανατολισμένη προς τα πάνω. Αποτελείται από την πηγή φωτός, το διάφραγμα, τους φακούς που κατευθύνουν την δέσμη, τον αντικειμενικό και προσοφθάλμιο φακό, το ημιανακλαστικό κάτοπτρο και την τράπεζα του μικροσκοπίου.

#### **4.7 Image Analysis**

Το Image Analysis είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας που βοηθά στην ποσοτική μεταλλογραφία. Έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγεθος των κόκκων σε ένα υλικό καθώς και τα ποσοστά των διάφορων φάσεων που εμφανίζονται στο μικροσκόπιο. Συνήθως, η μητρική φάση παρουσιάζει διαφορετικό χρώμα από τις άλλες φάσεις. Ουσιαστικά, κάθε εικόνα που εισάγεται στο Image Analysis εμφανίζεται ασπρόμαυρη ενώ εμφανίζονται και όλοι οι τόνοι του γκριζου χρώματος. Το πρόγραμμα μπορεί να μετρήσει το ποσοστό κάθε τόνου και συνεπώς το ποσοστό κάθε φάσης.

#### **4.8 Καθαρισμός με υπερήχους**

Τα δοκίμια είναι πιθανόν να έχουν στην επιφάνειά τους διάφορες ακαθαρσίες, όπως λάδια, οξείδια, σκόνη και άλλες. Ο καθαρισμός της επιφάνειάς τους μπορεί να γίνει με τη χρήση υπερήχων. Ο καθαρισμός γίνεται ως εξής:

Σε ένα δοχείο τοποθετείται ο κατάλληλος διαλύτης και το αντικείμενο που πρέπει να καθαριστεί. Εν συνεχεία, τίθεται σε λειτουργία η συσκευή και αναπτύσσονται εντός του δοχείου ακουστικά κύματα υψηλής συχνότητας τα οποία μπορούν να καθαρίσουν το αντικείμενο απομακρύνοντας σκουπιδάκια και ακαθαρσίες που τυχόν υπάρχουν στην επιφάνειά του. Συνήθως, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον τελικό καθαρισμό του αντικείμενου μας αφού αυτό έχει καθαριστεί ήδη με τις προηγούμενες μεθόδους.

Τα δοκίμια μας υποβλήθηκαν σε καθαρισμό με υπερήχους προτού χρησιμοποιηθούν σε πειραματικές κατεργασίες. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια βυθίζονται σε ποτήρι που περιέχει ακετόνη, το οποίο με τη σειρά του αφήνεται για 15-20min. σε μια συσκευή παραγωγής υπερήχων. Στην συνέχεια αφήνονται να στεγνώσουν και είναι έτοιμα για οποιαδήποτε πειραματική κατεργασία. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι η METASON 120.

#### 4.9 Περίθλαση ακτίνων-Χ (X-Ray Diffraction)

Η τεχνική της περίθλασης ακτίνων-Χ είναι μια χρήσιμη μέθοδος για την ανάλυση των διαφόρων ορυκτών και μεταλλευμάτων. Πρόκειται για μέθοδο που στηρίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη και πραγματοποιείται με την εκπομπή δέσμης ακτίνων-Χ και την ανάκλαση αυτών των ακτίνων. Στα κρυσταλλικά υλικά η απόσταση μεταξύ των πλεγματικών επιπέδων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, οπότε κατά την πρόσπτωση δέσμης ακτίνων-Χ συγκεκριμένου μήκους κύματος  $\lambda$  σε ένα κρυσταλλικό στερεό μπορούν να συμβούν δύο πράγματα. Είναι δυνατόν να έχουμε ενίσχυση της έντασης της ακτινοβολίας στην περίπτωση που οι ανακλώμενες δέσμες δεν είναι ομοφασικές ή να παρατηρείται ενίσχυση της εξερχόμενης ακτινοβολίας αν οι ανακλώμενες δέσμες συμβάλλουν, για κάποια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ , που λέγεται γωνία Bragg.

Η γωνία  $\theta$  συνδέεται με το μήκος κύματος  $\lambda$  και την διαπλεγματική απόσταση  $d$  με την παρακάτω εξίσωση Bragg:

$$n\lambda = 2d\eta\mu\theta$$

όπου  $n$  είναι η τάξη της περίθλασης (συνήθως  $n=1$ ).

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων-Χ, γνωστού μήκους κύματος  $\lambda$ , πάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων ενώσεων. Ακολουθεί στη συνέχεια ο προσδιορισμός των διαστημάτων  $d$  (σταθερά πλέγματος) των επιπέδων.

Όταν μια δέσμη ακτίνων-Χ βάλλει υπό κάποια γωνία  $\theta$  ένα κρυσταλλικό σώμα, τότε η δέσμη αυτή σκεδάζεται από τα κρυσταλλικά επίπεδα του σώματος κατά γωνία  $\theta$ . Επειδή ένα κρυσταλλικό σώμα αποτελείται από περισσότερα από ένα κρυσταλλικά επίπεδα, θεωρείται ότι το πρώτο τμήμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σκεδάζεται από το πρώτο κρυσταλλικό επίπεδο, το δεύτερο τμήμα σκεδάζεται από το δεύτερο και τα υπόλοιπα κατά όμοιο τρόπο. Κατά τη μελέτη των προσπίπτουσών ακτινοβολιών, έχει

παρατηρηθεί ότι το δεύτερο τμήμα της ακτινοβολίας που προσκρούει στο δεύτερο κρυσταλλικό επίπεδο διανύει μεγαλύτερη απόσταση από αυτή που έχει διανύσει το πρώτο ανακλώμενο τμήμα της δέσμης. Η διαφορά της διαδρομής των δύο αυτών τμημάτων ακτινοβολίας ισούται με  $2d\sin\theta$ . Όταν η διαφορά της διαδρομής των δύο διαδοχικών τμημάτων της ακτινοβολίας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$  της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τότε εφαρμόζοντας τον παραπάνω νόμο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της απόστασης των κρυσταλλικών επιπέδων του σώματος. Το μήκος κύματος  $\lambda$  των ακτίνων-Χ είναι γνωστό και έτσι η μόνη άγνωστη παράμετρος στην εξίσωση Bragg είναι η ζητούμενη πλεγματική απόσταση  $d$ .

Μια τυπική διάταξη περίθλασης ακτίνων-Χ αποτελείται από πηγή ακτίνων-Χ με συγκεκριμένο μήκος κύματος, γωνιόμετρο και ανιχνευτή των ακτίνων (απαριθμητής). Με τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται η καταγραφή της έντασης της περιθλώμενης ακτινοβολίας ως συνάρτηση της γωνίας  $2\theta$ , οπότε από την προηγούμενη εξίσωση υπολογίζονται οι πλεγματικές αποστάσεις ( $hkl$ ). Συνήθως, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πρότυπα ακτινοδιαγράμματα ορυκτο-διαγνωστικής και μεταλλογνωσίας και έτσι προσδιορίζεται το είδος των φάσεων του εκάστοτε υλικού.

Τα προσδιορισθέντα  $d$  είναι χαρακτηριστικά για κάθε κρυσταλλική ένωση και με τον προσδιορισμό τους γίνεται αναγνώριση της ένωσης ή των ενώσεων που συνιστούν την εξεταζόμενη ουσία (ποιοτική ανάλυση). Με αυτόν τον τρόπο έγινε ποιοτική ανάλυση στα δοκίμια. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το D5000 της εταιρίας SIEMENS.

#### **4.10 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM)**

Η τεχνική της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 και αποτέλεσε επανάσταση στους τομείς των φυσικών και ιατρικών επιστημών, αφού παρείχε τη δυνατότητα εξέτασης και επεξεργασίας μεγάλου πλήθους δειγμάτων.

Σε αντίθεση με το οπτικό μικροσκόπιο, που χρησιμοποιεί φακούς για την εστίαση των φωτεινών ακτίνων σε κάποιο δείγμα, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης κάνει χρήση ηλεκτρομαγνητών για την καθοδήγηση μιας δέσμης ηλεκτρονίων, η οποία παράγει την εικόνα του δοκιμίου σε μια οθόνη. Με την χρήση των ηλεκτρομαγνητών και της δέσμης ηλεκτρονίων ο χρήστης μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη ακρίβεια στο μέγεθος εστίασης και μεγαλύτερη καθαρότητα στην παραγόμενη εικόνα. Ο τρόπος δημιουργίας του ειδώλου του δείγματος παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την αρχή



λειτουργίας μιας τηλεόρασης. Η μεγέθυνση που μπορεί να επιτύχει ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι πάρα πολύ μεγαλύτερη από εκείνη ενός οπτικού.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων που σαρώνει την επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου ενώ τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται δημιουργούν ένα οπτικό σήμα μετά τη συλλογή και την ενίσχυσή τους. Η διάταξη αποτελείται από πηγή ηλεκτρονίων που δημιουργεί την αρχική δέσμη που εστιάζεται και οδεύει προς την επιφάνεια του υλικού. Η στήλη της παραγωγής των ηλεκτρονίων λειτουργεί σε συνθήκες κενού ( $<10^{-3}$  Pa) τόσο για τη σωστή καθοδήγηση της πρωτογενούς ακτινοβολίας και την αποφυγή συγκρούσεων με τα μόρια του αέρα, όσο και για την ικανοποιητική ποιότητα του εμφανιζόμενου στην οθόνη ειδώλου.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων παράγεται στο ανώτερο μέρος του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, ύστερα από τη θέρμανση (φαινόμενο Joule) λεπτού νήματος βολφραμίου. Στη συνέχεια ακολουθεί μια κατακόρυφη πορεία, διαμέσου της οπτικής στήλης του μικροσκοπίου και εστιάζεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών φακών στο παρατηρούμενο δείγμα. Μετά την αλληλεπίδραση της δέσμης με το δοκίμιο, παράγονται δευτερογενή ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται από ειδικούς ανιχνευτές και μετατρέπονται σε σήμα που μπορεί να ληφθεί από το σύστημα.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εξέταση ενός αντικειμένου στο SEM είναι η ηλεκτρική του αγωγιμότητα. Εάν το προς εξέταση δείγμα έχει μονωτικό χαρακτήρα συνήθως επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα αγωγίμου υλικού (π.χ. χρυσού επιστρώματος).

Η διακριτική ικανότητα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου φτάνει μέχρι και τις 300000 φορές μεγέθυνση και τα δοκίμια δεν απαιτούν ιδιαίτερη προετοιμασία για την παρατήρησή τους. Η εκπεμπόμενη - δευτερογενής ακτινοβολία μπορεί να είναι:

- **Ηλεκτρόνια Auger**

Προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τις υποστοιβάδες των επιφανειακών ατόμων, μέχρι βάθος 1nm και το φάσμα που προκύπτει χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιφανειών.

- **Δευτερογενή ηλεκτρόνια**

Προκύπτουν από την σύγκρουση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα της επιφανειακής στοιβάδας και δίνουν πληροφορίες για την τοπογραφία της επιφάνειας.

- **Οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια**

Από τις ελαστικές συγκρούσεις ανάμεσα στα επιφανειακά άτομα και τα πρωτογενή ηλεκτρόνια μπορούν να παραχθούν τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, με ενέργειες ανάμεσα στα 5 και 50 eV. Αυτά δίνουν πληροφορίες για την σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της επιφάνειας.

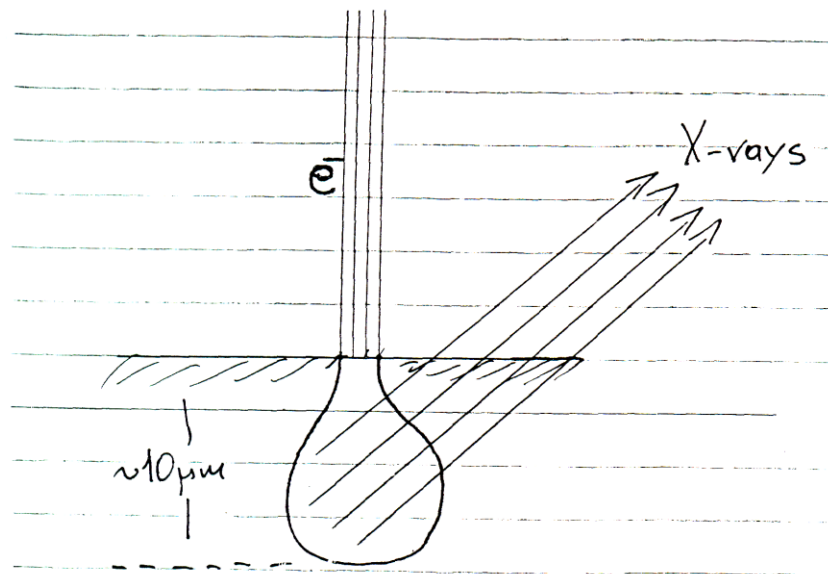
- **Ακτίνες-Χ**

Παράγονται από το στρώμα της επιφάνειας του δοκιμίου μέχρι το βάθος του 1μm και εξαρτώνται από το είδος των ατόμων που βρίσκονται στην επιφάνεια.

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου αυτού στηρίζεται στο εξής φαινόμενο: Όταν ηλεκτρόνια προσπίπτουν στις επιφανειακές στοιβάδες ενός υλικού τότε αυτό εκπέμπει ακτινοβολία Χ (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Έτσι από το μικροσκόπιο σάρωσης εκπέμπονται ηλεκτρόνια που προσπίπτουν στην επιφάνεια του προς εξέταση υλικού.

#### **4.11 Ηλεκτρονικός Μικροαναλυτής Στοιχείων (EDAX)**

Σύμφωνα με το παραπάνω φαινόμενο εκπέμπονται ακτίνες Χ, των οποίων οι ενέργειες συλλέγονται και καταγράφονται. Από τις ενέργειες αυτές και με πολύπλοκους υπολογισμούς προκύπτει τόσο η ποσοτική όσο και η ποιοτική σύσταση του δείγματος. Χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι ότι τα ηλεκτρόνια εισχωρούν σε βάθος 10 μm, ενώ το ελεγχόμενο δείγμα έχει την μορφή 'αχλαδιού' όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι παρατηρήσεις στη μικροδομή των δοκιμίων έγιναν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης JEOL 6400 το οποίο είχε προσαρμοσμένο και μικροαναλυτή EDAX. Με τον μικροαναλυτή έγιναν στοιχειακές αναλύσεις στη μητρική φάση του υλικού, σε ενδομεταλλικές ενώσεις καθώς και σε προϊόντα διάβρωσης.

#### 4.12 Μέτρηση της σκληρότητας των δοκιμίων

Η σκληρότητα ενός μετάλλου είναι η αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση κατά την επιβολή ενός φορτίου στην επιφάνεια του. Είναι μια από τις πιο σπουδαίες ιδιότητες των τεχνολογικών υλικών. Η δοκιμή της σκληρότητας χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις διότι είναι μια μη καταστρεπτική δοκιμή ενώ πρόκειται για απλή και σύντομη διαδικασία.

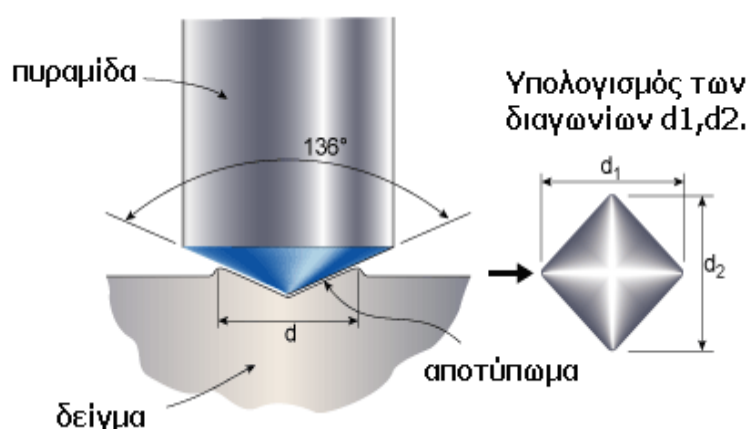
Η σκληρότητα διακρίνεται σε μακροσκληρότητα και μικροσκληρότητα. Η πρώτη δοκιμή αναφέρεται στην μέτρηση της σκληρότητας σε μακροσκοπική κλίμακα ενώ η δεύτερη μας δίνει την δυνατότητα να μετρήσουμε την σκληρότητα σε μικροσκοπική κλίμακα (π.χ. σε κλίμακα κόκκων).

Γενικά, για τον υπολογισμό της σκληρότητας υπάρχουν τρεις τύποι μέτρησης, οι οποίοι είναι η μέτρηση της σκληρότητας κατά Brinell, Rockwell και Vickers.

Στη σκληρότητα Vickers μια πυραμίδα από διαμάντι πιέζεται στην επιφάνεια ενός δοκιμίου. Γενικά, η σκληρότητα Vickers προκύπτει αν διαιρέσουμε το φορτίο με την επιφάνεια της κοιλότητας του αποτύπωματος, με διαγώνιο  $d$ , που προέκυψε. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η σκληρότητα από την σχέση:

$$HV=1,8544 P/d^2.$$

Ουσιαστικά, από το σχηματιζόμενο αποτύπωμα υπολογίζεται το μέγεθος της διαγωνίου και μέσω ειδικού πίνακα υπολογίζεται η τιμή της σκληρότητας.



**Σκληρότητα Vickers.**

#### 4.13 Μικροσκληρότητα

Για την μέτρηση της μικροσκληρότητας χρησιμοποιούμε μικροσκληρόμετρο. Αυτό αποτελείται από εγκοπέα από διαμάντι, οποίος έχει τη μορφή πυραμίδας. Η βάση της πυραμίδας (εγκοπέα) είναι τετραγωνική και οι απέναντι έδρες της πυραμίδας σχηματίζουν γωνία  $136^\circ$ . Το δοκίμιο στερεώνεται σε κατάλληλη βάση του οργάνου και με τη βοήθεια του μικροσκοπίου μπορούμε να εστιάσουμε στη περιοχή που θέλουμε να κάνουμε τη μέτρηση. Επιλέγουμε το φορτίο και το χρονικό διάστημα που αυτό θα εφαρμοστεί πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου μας και πραγματοποιούμε τη δοκιμή. Από το αποτύπωμα, μετρώντας τις διαγωνίους, μπορεί να προσδιοριστεί η μικροσκληρότητα. Προφανώς πρόκειται για δοκιμή σκληρότητας Vickers.

Στα δοκίμια που εξετάστηκαν χρησιμοποιήθηκε φορτίο 100gr, ενώ το χρονικό διάστημα εφαρμογής του φορτίου ήταν 15sec.

Το μικροσκληρόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Shimadzu HMV-2000.

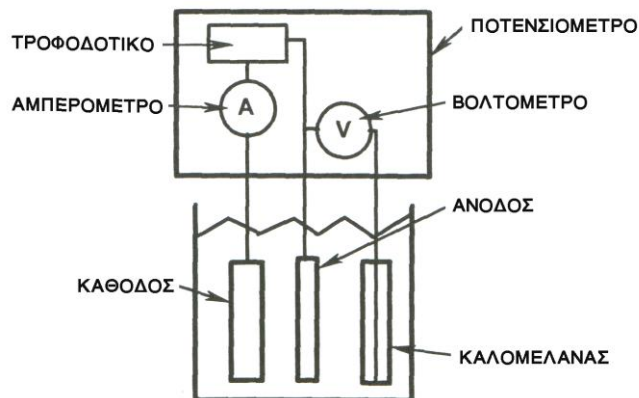
#### 4.14 Μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων

Η τραχύτητα μιας επιφάνειας οφείλεται σε ανωμαλίες που μπορεί να έχει η επιφάνεια από τη προέλευσή της ή λόγω διάφορων διεργασιών που έχει υποστεί. Ένα υλικό που δεν έχει υποστεί λείανση παρουσιάζει μεγαλύτερη τραχύτητα από ένα λειασμένο, ενώ αν το υλικό έχει σιλιβωθεί η τραχύτητα του είναι αμελητέα και η ποιότητα της επιφάνειας εξαιρετικά καλή.

Η τραχύτητα των δοκιμίων μετρήθηκε με ειδικό όργανο, το τραχύμετρο που διαθέτει ακίδα που ακουμπά στην επιφάνεια και δίνει την τραχύτητά της σε  $\mu\text{m}$ .

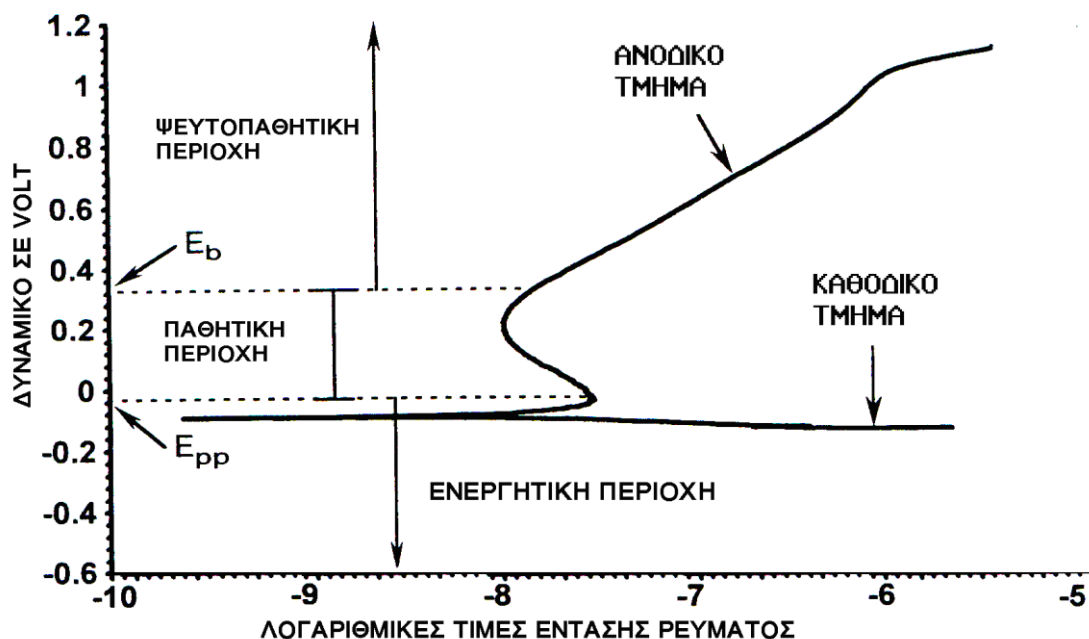
#### 4.15 Δοκιμή διάβρωσης (Ποτενσιοδυναμική)

Για την πραγματοποίηση της διάβρωσης μπορούμε να χρησιμοποιούμε την ακόλουθη διάταξη, που είναι ευρύτερα γνωστή ως γαλβανικό κελί.



Αυτή η διάταξη αποτελείται από τρία ηλεκτρόδια. Το ένα είναι το ηλεκτρόδιο που θα αποτελέσει την άνοδο (δοκίμιο που πρόκειται να διαβρωθεί), το δεύτερο είναι η κάθοδος (χρησιμοποιείται για να επιταχύνει την διάβρωση) και το τρίτο είναι το ηλεκτρόδιο αναφοράς (ηλεκτρόδιο καλομέλανα -  $241,5\text{mV}$ ). Με την βοήθεια του ποτενσιοστάτη καταγράφουμε την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην άνοδο και το ηλεκτρόδιο αναφοράς, καθώς και το ρεύμα που δημιουργείται λόγω διαφοράς δυναμικού ανάμεσα σε άνοδο και κάθοδο. Τα δεδομένα επεξεργάζονται από ειδικά

προγράμματα (softcorr III) στον υπολογιστή και σχηματίζεται μια ποτενσιοδυναμική καμπύλη όπως η ακόλουθη:



Στην καμπύλη παρατηρούμε τα ακόλουθα τμήματα :

- **ΑΝΟΔΙΚΟ ΤΜΗΜΑ:** Το δοκίμιο σε αυτό το κομμάτι της καμπύλης διαβρώνεται , λειτουργεί δηλαδή ως άνοδος (δότης ηλεκτρονίων).
- **ΚΑΘΟΔΙΚΟ ΤΜΗΜΑ:** Το δοκίμιο σε αυτό το κομμάτι της καμπύλης λειτουργεί ως κάθοδος (δέκτης ηλεκτρονίων) και δεν διαβρώνεται.
- **ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Κατά αυτό το στάδιο το δοκίμιο διαβρώνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Η ένταση του ρεύματος αυξάνεται με την αντίστοιχη αύξηση του δυναμικού.
- **ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Η ταχύτητα διάβρωσης του δοκιμίου στο κομμάτι αυτό της καμπύλης γίνεται αμελητέα. Η ερμηνεία αυτής της συμπεριφοράς έγκειται στο γεγονός ότι το ρεύμα διάβρωσης του μετάλλου μέσα στο διαβρωτικό περιβάλλον, π.χ. πυκνό διάλυμα οξέος, φθάνει σε πολύ υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα το σχηματισμό στην επιφάνεια του, ενός στρώματος προϊόντων διάβρωσης που εμποδίζουν την περαιτέρω διάλυση του μετάλλου. Με τον τρόπο αυτό το μέταλλο παθητικοποιείται και η

παραμονή του στο πυκνό ή σε αραιό διάλυμα του οξέος δεν επιφέρει περαιτέρω διάβρωση. Η παθητική περιοχή χαρακτηρίζεται πάντα από την μείωση της έντασης του ρεύματος διάβρωσης με αντίστοιχη αύξηση της τάσης.

- **ΨΕΥΤΟΠΑΘΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Σε αυτό το κομμάτι της καμπύλης το προστατευτικό στρώμα που είχε σχηματιστεί σπάει και η διάβρωση συνεχίζεται με αυξανόμενο ρυθμό (με την αύξηση του δυναμικού αυξάνεται και το ρεύμα διάβρωσης).
- **ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΘΗΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ  $E_{pp}$  (primary passivation potential):** για τιμές δυναμικού μεγαλύτερες από αυτήν ο ρυθμός διάβρωσης είτε σταθεροποιείται είτε μειώνεται με αντίστοιχη αύξηση του δυναμικού (αρχή της παθητικής περιοχής).
- **ΔΥΝΑΜΙΚΟ  $E_{br}$ :** για τιμές δυναμικού μεγαλύτερες από αυτήν ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται με αντίστοιχη αύξηση του δυναμικού (τέλος παθητικής περιοχής).
- **OPEN CIRCUIT POTENTIAL (OCP):** είναι η τιμή εκείνη του δυναμικού για την οποία το προς διάβρωση δοκίμιο μετατρέπεται από κάθοδο σε άνοδο, αρχίζει δηλαδή το φαινόμενο της διάβρωσης. Η τιμή του O.C.P. αρχικά μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου, όταν το δοκίμιο βυθιστεί στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη. Αυτό οφείλεται στο ότι χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα προκειμένου να μεταβληθεί το προστατευτικό στρώμα του υλικού που είχε σχηματιστεί στις ατμοσφαιρικές συνθήκες και να σχηματιστεί καινούριο που να ανταποκρίνεται στις καινούριες πλέον συνθήκες. Ο χρόνος που χρειάζεται για να “προσαρμοστεί” το υλικό στις νέες συνθήκες σχηματίζοντας νέο προστατευτικό στρώμα καθορίζει την τιμή του O.C.P. Το χρονικό διάστημα αυτό ήταν 30 min. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Versa Stat II και οι παραμετροί για τη δοκιμή διάβρωσης είναι οι εξής :

- Εύρος της επιφάνειας που θα πραγματοποιηθεί η διάβρωση. Στα δοκίμια που είχαν προορισμό τη μεταλλογραφία πριν και μετά τη διάβρωση, το εύρος της επιφάνειας είναι  $2 \times 1 \text{ cm}^2$ . Στα δοκίμια που θα εφελκωνταν, το εύρος της επιφάνειας
- Εύρος του δυναμικού που θα σαρώσει ο ποτενσιοστάτης. Το εύρος σάρωσης σε όλες τις διαβρώσεις ήταν από  $-0,25\text{V}$  ως  $1,6\text{V}$ .
- Τύπος ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκε. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο καλομέλανα (S.C.E.).
- Τον ρυθμό με τον οποίο θα σαρώνει ο ποτενσιοστάτης την επιφάνεια του δείγματος,  $0,2 \text{ mV/sec}$ .
- Το pH του διαλύματος NaCl  $0,01 \text{ M}$  ήταν  $7,5$ .

#### 4.16 Ποτενσιοστατική διάβρωση

Κατά τη δοκιμή αυτή επιλέχθηκε σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ του δοκιμίου αλουμινίου και του ηλεκτροδίου αναφοράς (καλομέλανα) και καταγράφεται η ένταση του ρεύματος που διέρχεται μεταξύ ανόδου (αλουμινίο) και καθόδου (γραφίτης). Επιπλέον, επιλέγεται ένα σαφές χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η διάβρωση. Οι καμπύλες που προκύπτουν παρουσιάζουν τη μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει του χρόνου. Η ποτενσιοστατική διάβρωση έγινε σε μια διάταξη παρόμοια με την ποτενσιοδυναμική, αλλά χωρίς τον ποτενσιοστάτη. Το δοκίμιο ήταν η άνοδος, για κάθοδο χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο γραφίτη και για ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε καλομέλανα. Ανάμεσα στον γραφίτη και το δείγμα συνδέθηκε αμπερόμετρο όπου ανά 5 λεπτά καταγράφονταν η ένταση του ρεύματος. Ανάμεσα στον καλομέλανα και το δείγμα συνδέθηκε βολτόμετρο που ανά 5 λεπτά καταγράφονταν η τάση. Η όλη διαδικασία μέτρησης πραγματοποιήθηκε για διαστήματα 3,6 και 9 ωρών για τις τιμές που επελεγήσαν στο ανοδικό και καθοδικό κομμάτι της ποτενσιοδυναμικής καμπύλης, καθώς και σε αυτή του OCP. Επιπλέον, έγιναν και επαναληπτικές μετρήσεις.

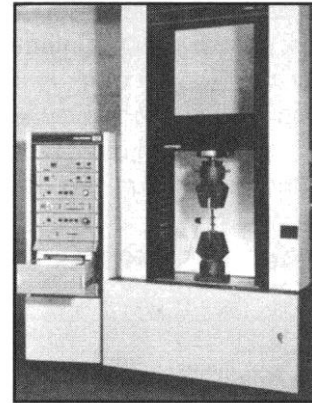
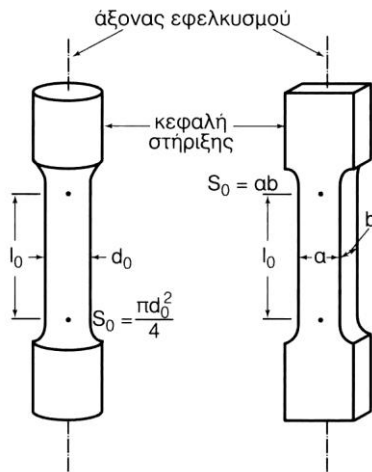
Από αυτές τις μετρήσεις προήλθαν διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή του δυναμικού διάβρωσης και του ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου.

#### 4.17 Η δοκιμή εφελκυσμού

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η συνιθεστερή μηχανική δοκιμή και συνιστάται στην εφελκυστική καταπόνηση των προς χαρακτηρισμό δοκιμίων. Κατά τη διάρκεια της καταπόνησης η προκαλούμενη επιμηκυνση  $\Delta l$ .

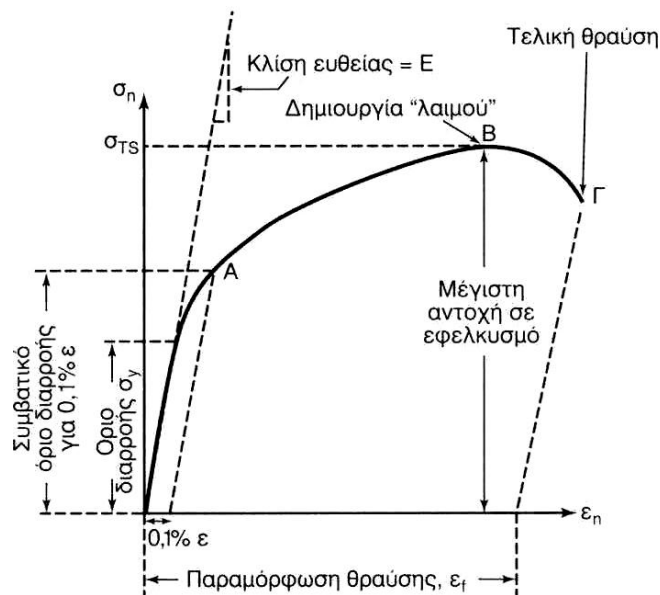
Για την παρούσα εργασία, τα δοκίμια αλουμινίου είχαν κατασκευαστεί σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 8M-99 και η ταχύτητα απομακρυνσης των αρπαγών τέθηκε στα 0,5mm/min. Η επιμηκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου ( $l_0$ ). Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία αυτό θα συγκρατηθεί στις αρπαγές της μηχανής εφελκυσμού, έχουν μεγαλύτερη διατομή.





Απο καθε δοκιμη εφελκυσμου εξαγεται η καμπυλη  $F = f(\Delta l)$  ή  $\sigma = f(\epsilon)$ , οπου " $\sigma$ " ειναι το μεγαθος επιβαλλομενης τασης απο τη μηχανη του εφελκυσμου και " $\epsilon$ " το μεγαθος παραμορφωσης. Τα μεγαθη αυτα υπολογιζονται ως προς τις αρχικες διαστασεις των δοκιμιων και συγκεκριμενα απο τους τυπους  $\sigma = F/A_0$  και  $\epsilon = \Delta l/l_0$ , οπου " $A_0$ " η αρχικη διατομη και " $l_0$ " το αρχικο μηκος του δοκιμιου.

Η καμπυλη που ακολουθει ειναι ενα χαρακτηριστικο διαγραμματος τασης-παραμορφωσης, οπως αυτο προκυπτει απο τη δοκιμασια εφελκυσμου. Η δοκιμασια εφελκυσμου εγινε σε δοκιμιο χαλκου και το ακολουθο διαγραμμα θα λειτουργησει μοναχα σαν αναφορα.



Ερμηνευοντας το διαγραμμα, μετα απο ενα αρχικο συντομο διαστημα, το δοκιμιο του χαλκου παραμορφωνεται πλαστικα, αυξανοντας το μηκος του και μειωνοντας το πλατος του. Μετα το περασμα απο το μεγαιστο φορτιο, το δοκιμιο αρχιζει να εμφανιζει

τοπική ελαττώση της διατομής που είναι γνωστή και ως φαινόμενο δημιουργίας "λαιμού". Αυτή η ανομοιομορφία στην παραμόρφωση οδηγεί γρήγορα το υλικό σε θραύση μέσα στη περιοχή του λαιμού.

Στο διάγραμμα επίσης φαίνονται και τα μεγέθη που ορίζονται ως ακολούθως:

- $\sigma_y$ , **το όριο διαρροής**: Η τάση πάνω από την οποία εμφανίζεται η πλαστική παραμόρφωση.
- $\sigma_{Ts}$ , **μεγίστη αντοχή σε εφελκυσμό**: Η μέγιστη τάση κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, πάνω από την οποία εμφανίζεται ο "λαιμός".
- $\epsilon_f$ , **παραμόρφωση θραύσης**: Η παραμόρφωση που παρουσιάζεται μετά τη θραύση του υλικού.
- **E, το μέτρο ελαστικότητας**

Για τιμές μικρότερες του ορίου διαρροής, οι παραμορφώσεις του υλικού είναι ελαστικές, ενώ για μεγαλύτερες τιμές, οι συνολικές παραμορφώσεις του υλικού είναι το άθροισμα των ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων.

Από το σημείο διαρροής και μετά, απαιτείται αύξηση της επιβαλλομένης τάσης για περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Στη δεύτερη αυτή περιοχή, συντελείται το φαινόμενο της ενδοτραχυνσης, το οποίο περιγράφεται από καμπύλη παραβολικής μορφής. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που οφείλεται στην παρεμποδιζόμενη, από άλλες διαταραχές, κίνηση διαταραχών, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την σκλήρυνση του υλικού. Το στάδιο της ενδοτραχυνσης καλείται και στάδιο ομοιομορφής παραμόρφωσης και στο διάγραμμα αφορά το τμήμα **(AB)**.

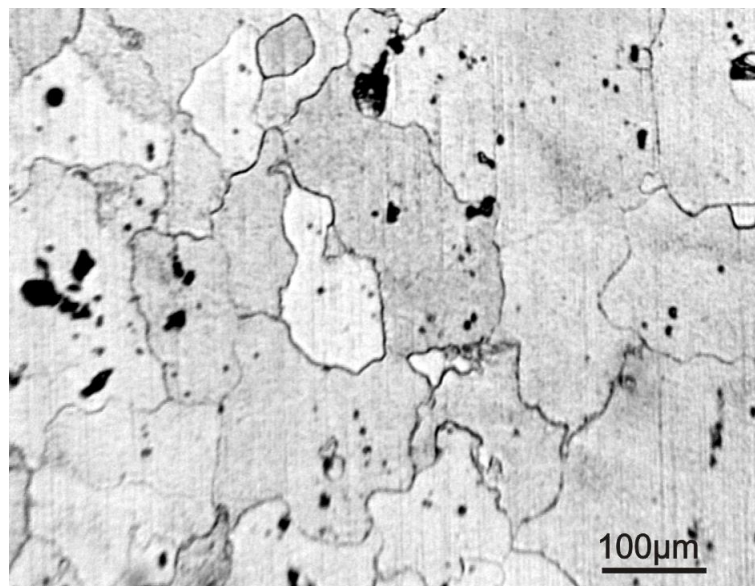
Από το σημείο **(B)** ως τη θραύση του υλικού **(Γ)**, παρατηρείται το τελευταίο στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία χαρακτηρίζεται ως ανομοιομορφή παραμόρφωση ή πλαστική ασταθία και αφορά το τμήμα **(BΓ)**.

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΕ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

#### 5.1.1 ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

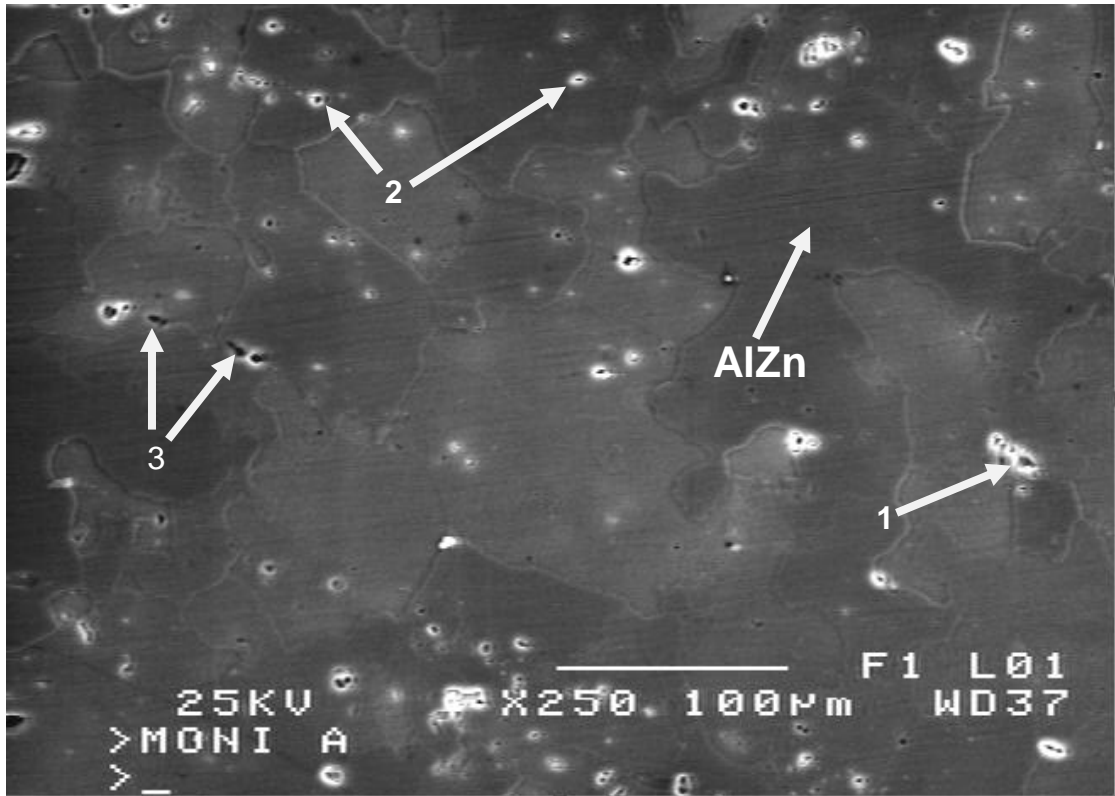
Πριν απο την παρατηρηση τους στο οπτικο μικροσκοπιο, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε χημική προσβολή με Kellers, όπως προαναφερθηκε στο θεωρητικο μερος.



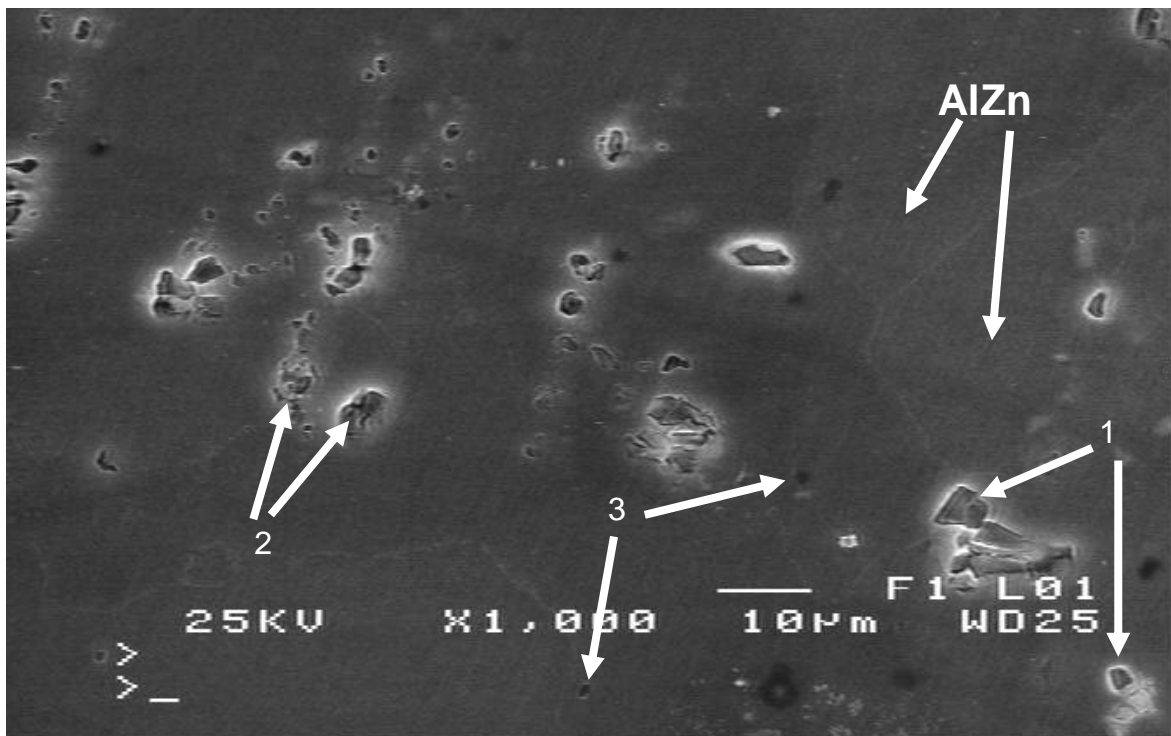
Παρατηρούνται κόκκοι διαφορετικού σχετικά μεγέθους και τυχαίου προσανατολισμού καθώς και κατακρημνίσματα εντος, αλλα και στα ορια των κόκκων. Με τη χρήση του λογισμικού Image Analysis υπολογίστηκε το μέσο μέγεθος των κόκκων και βρέθηκε να είναι **148 μm**, καθώς και το ποσοστό των κατακρημνισμάτων στο κράμα και βρέθηκε να είναι περίπου **9%** της μετρούμενης επιφάνειας. Οι ενδομεταλλικές ενώσεις που παρατηρούνται θα ταυτοποιηθούν παρακατω με χρήση XRD και SEM.

#### 5.1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Στη φωτογραφία που ακολουθει, εικονίζονται οι μικροδομές του θερμικά κατεργασμένου κράματος αλουμινίου 7075 T6. Παρατηρειται η μητρική φάση του κραματος, καθώς και οι ενδομεταλλικές ενώσεις (κατακρημνίσματα).



1. Ενδομεταλλική ένωση  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$
2. Ενδομεταλλική ένωση  $\text{Al}_2\text{CuMg}$
3. Ενδομεταλλική ένωση  $\text{Mg}(\text{ZnCu})_2$

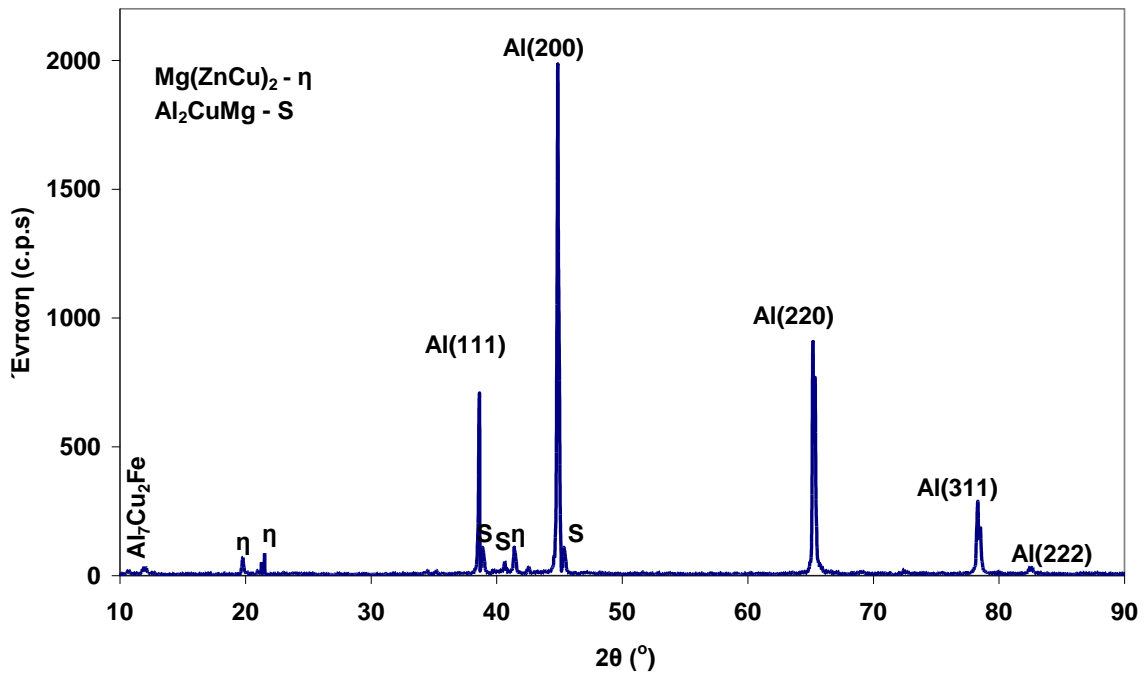


Για την ταυτοποίηση των προαναφερθέντων ενδομεταλλικών ενώσεων, έγινε η ακολουθία κ.β(%) στοιχειακή χημική ανάλυση EDAX σε συνδυασμό με περιθλασιμετρο ακτίνων Χ. Τα ακτινοδιαγράμματα ακτίνων Χ θα παρατεθούν μετά τα αποτελέσματα του EDAX.

Με τη χρήση συσκευής Στοιχειακής Μικροανάλυσης EDAX συνδεδεμένης με το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) είχαμε τα εξής αποτελέσματα σε μορφή πίνακα:

Al 7075 T6	Χημική Σύσταση		
<b>Μητρική φάση κ.β(%)</b>	<b>Al 92%</b>	<b>Zn 4.6%,</b>	<b>Mg 1.5%</b>
	<b>Cu 1.4%</b>	<b>Fe 0.2%</b>	<b>Cr 0.3%</b>
<b>Περιοχή 1 κ.β(%)</b>	<b>Al 79,8%</b>	<b>Zn 1%</b>	
	<b>Cu 13.4%</b>	<b>Fe 5.8%</b>	
<b>Περιοχή 2 κ.β(%)</b>	<b>Al 70.8%</b>	<b>Zn 1.34%</b>	<b>Mg 13.4%</b>
	<b>Cu 14.4%</b>	<b>Fe 0.06%</b>	
<b>Περιοχή 3 κ.β(%)</b>	<b>Al 80%</b>	<b>Zn 8.1%</b>	<b>Mg 7.4%</b>
	<b>Cu 7.4%</b>	<b>Fe 0.3%</b>	

Ακολουθεί το ακτινοδιάγραμμα του XRD, που βοήθησε στην ταυτοποίηση φάσεων και ενδομεταλλικών ενώσεων. Δυστυχώς, η ταυτοποίηση όλων των ενδομεταλλικών ενώσεων του κράματος δεν είναι δυνατή, λόγω του μικρού ποσοστού των ενώσεων αυτών.



Ανακεφαλαιωνοντας, στη φωτογραφια του SEM διακρίνεται η μητρική φάση του κράματος που είναι το στερεό διάλυμα **AlZn**.

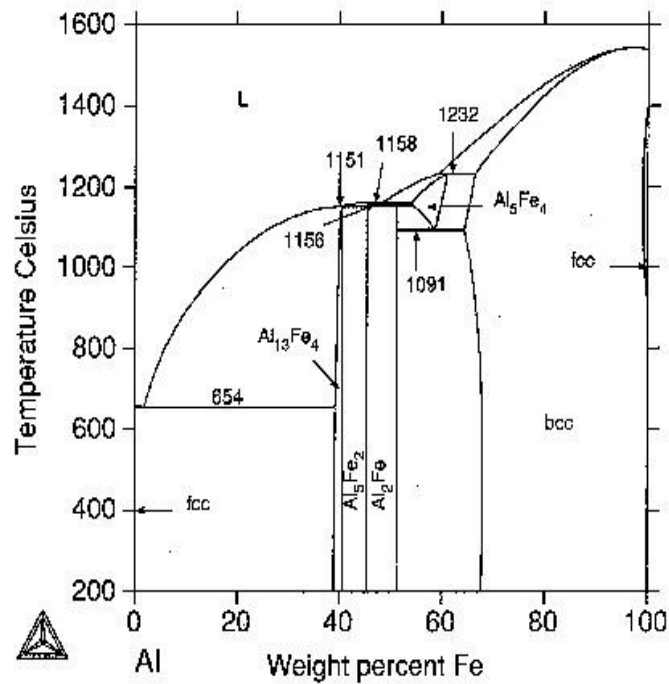
Η ένωση **η - Mg(ZnCu)<sub>2</sub>** κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό σύστημα και είναι τάξης μεγέθους μερικών μμ. Σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας T6, όταν η σχηματιζόμενη φάση **MgZn<sub>2</sub>** διαλυτοποιεί ένα ποσοστό **Cu** κατά τη τεχνητή γήρανση.

Στη χημική ανάλυση ανιχνεύθηκε αυξημένο ποσοστό αλουμινίου αλλά και κάποιο μικρό ποσοστό μαγνησίου και ψευδαργύρου. Καθώς γίνεται η χημική ανάλυση σε ενδομεταλλικές ενώσεις, η δέσμη ηλεκτρονίων έχει τη μορφή "αχλαδιού", οπότε γίνεται ανάλυση και στο παρακείμενο μητρικό υλικό αλλά και σε μητρικό υλικό που μπορεί να βρίσκεται κάτω από την ενδομεταλλική ένωση, αφού το βάθος διείσδυσης των ηλεκτρονίων είναι περίπου 10μμ. Έτσι η χημική σύσταση του μητρικού υλικού επιδρά στα αποτελέσματα των αναλύσεων των ενδομεταλλικών ενώσεων.

Ο λόγος της κατά βάρος περιεκτικότητας **Mg/Zn** στο μητρικό υλικό είναι μεγαλύτερος του 1:2 οπότε είναι πιθανόν να σχηματίζονται κατακρημνίσματα της φάσης "**η**" που έχει στοιχειομετρία **MgZn<sub>2</sub>**. Η ανίχνευση των κατακρημνισμάτων δεν είναι δυνατή μέσω του SEM και XRD λόγω του πολύ μικρού μεγέθους που έχουν.

Ο σίδηρος έχει πολύ μικρή διαλυτότητα στο αλουμίνιο οπότε παραμένει αδιάλυτος και σχηματίζει ενδομεταλλικές ενώσεις όπως την **Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe** η οποία

εντοπίστηκε στην EDAX. Παρακάτω φαίνεται το διμερές διάγραμμα φάσεων του Al-Fe. και η μικρή διαλυτοτητα του Fe στο αλουμινιο.



## 5.2 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ

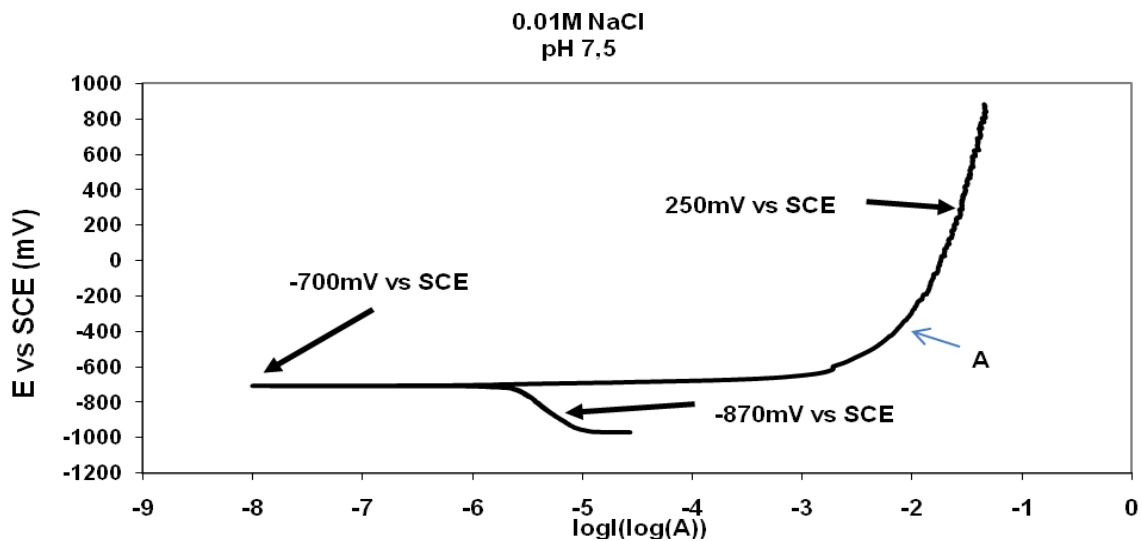
Με την βοήθεια του μικροσκληρόμετρου Vickers, μετρήθηκαν προσεγγιστικά οι μέσες τιμές της σκληρότητας δοκιμίων του κράματος αλουμινίου. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι μέσες τιμές 20 μετρήσεων με επιβαλλόμενο φορτίο 100g και χρονικό διάστημα επιβολής φορτίου 15 sec.

Σκληροτητα (HVN)									
142	146	144	151	147	158	153	161	144	146
149	139	156	150	156	154	153	150	154	147
Μεσος ορος = $150 \pm 5$ HVN									

## 5.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

### 5.3.1 ΠΟΤΕΝΣΙΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η ποτενσιοδυναμική διαβρωση των δοκιμιων πραγματοποιηθηκε οπως αναφεραμε στην παραγραφο 5.15 του πειραματικου μερους. Παρακατω παρατιθεται η ποτενσιοδυναμικη καμπυλη :



Απο τη μορφη της ποτενσιοδυναμικης καμπυλης του γραφηματος μπορουν να εξαχθουν τα ακολουθα συμπερασματα :

- 1) Η τιμη δυναμικου **-700mV vs. SCE** ειναι η τιμη του **OCP** για το υλικο μας. Αυτο σημαινει πως για χαμηλοτερες τιμες δυναμικου, το δοκιμιο θα αποτελει καθοδο, ενω για μεγαλυτερες τιμες λειτουργει ως ανοδος.
- 2) Στο καθοδικο τμημα της καμπυλης το δοκιμιο λειτουργει ως καθοδος, δηλαδη γινεται δεκτης ηλεκτρονιων και δε διαβρωνεται.
- 3) Στο ανοδικο τμημα της καμπυλης, μεχρι περιπου στο σημειο **"A"** εχουμε μεγαλη αυξηση των τιμων πυκνοτητας του ρευματος για μικρο ευρος τιμων δυναμικου, το οποιο σημαινει πως για εκεινο το ευρος τιμων δυναμικου στο δοκιμιο συντελειται εντονη διαβρωση.
- 4) Στο ανοδικο κομματι της καμπυλης, απο το σημειο **"A"** και για αυξανομενες τιμες δυναμικου, εχουμε μικρη αυξηση των τιμων πυκνοτητας ρευματος για μεγαλο



ευρος τιμών δυναμικού, το οποίο σημαίνει πως για εκείνο το εύρος τιμών δυναμικού, στο δοκίμιο συντελείται διαβρωση με σταθερό ρυθμό.

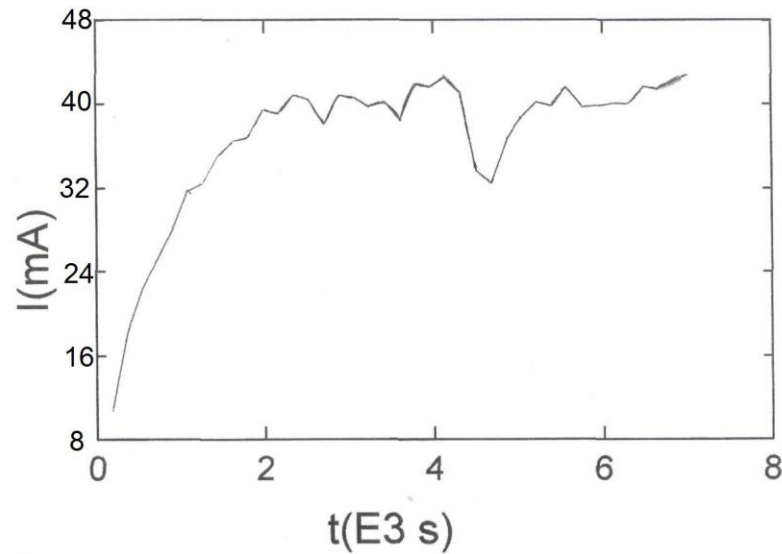
- 5) Επιπροσθέτως, για το παραπάνω κομμάτι της καμπύλης, παρατηρείται ότι δεν είναι σταθερή η μεταβολή του ρεύματος, αλλά παρουσιάζει αυξομειώσεις οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο της βελονοειδούς διαβρώσης, όπως αυτό έχει περιγραφεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας (σελ.28).

Εφόσον παρατηρήθηκε η διαβρωτική συμπεριφορά του δοκιμίου για μεγάλο εύρος τιμών δυναμικού, επελέγησαν συγκεκριμένες τιμές δυναμικού, αντιπροσωπευτικές για τη διαβρωτική συμπεριφορά του υλικού σε ανοδικό και καθοδικό κομμάτι. Οι τιμές αυτές, όπως φαίνονται και στην ποτενσιοδυναμική καμπύλη, είναι οι **250mV vs SCE** για το ανοδικό κομμάτι και οι **-870 mV vs SCE** για το καθοδικό κομμάτι. Στις τιμές αυτές του δυναμικού έγιναν ποτενσιοστατικές διαβρώσεις.

### 5.3.2 ΠΟΤΕΝΣΙΟΣΤΑΤΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

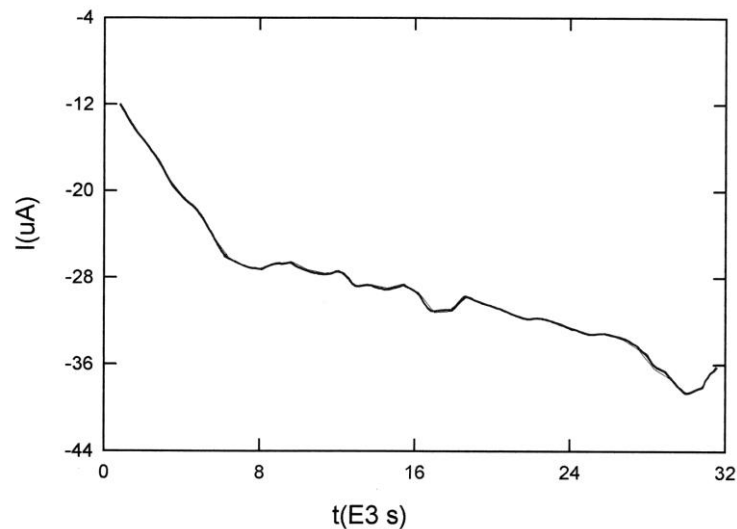
Οι ποτενσιοστατικές διαβρώσεις πραγματοποιήθηκαν όπως προαναφέρθηκε στην παραγραφο 5.16 για τιμή δυναμικού **250mV vs SCE** στο ανοδικό τμήμα και διάρκειας 3,6 και 9 ωρών, τιμής OCP **-700mV vs SCE** διάρκειας 9 ωρών και τιμής **-870 mV vs SCE** στο καθοδικό τμήμα της καμπύλης και διάρκειας 3,6 και 9 ωρών. Επίσης έγιναν και επαναληπτικές μετρήσεις, όπου αυτές κρίθηκαν αναγκαίες.

Στη συνέχεια, ενδεικτικά, παρατίθενται οι πιο χαρακτηριστικές καμπύλες μεταβολής της έντασης του ρεύματος με τη παροχή του χρόνου για τις τιμές δυναμικού που προαναφέρθηκαν.



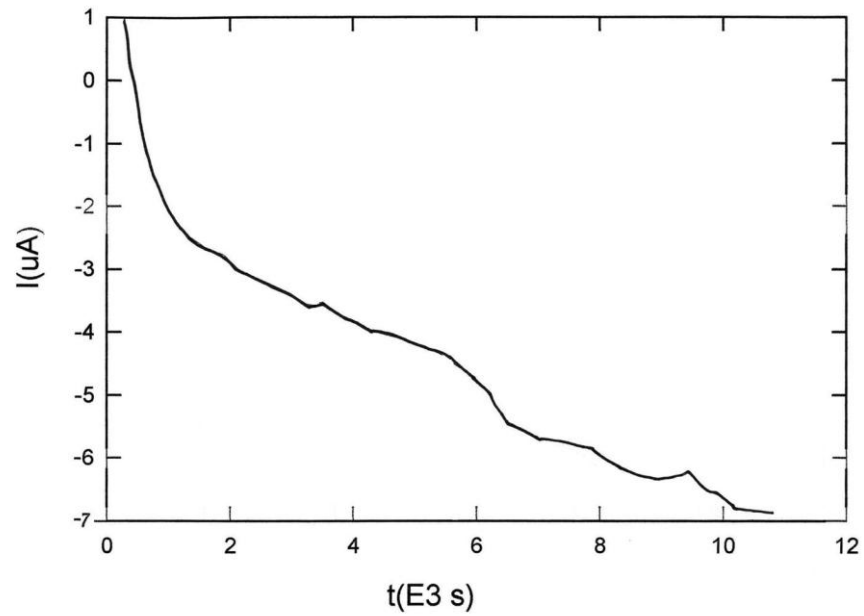
### 250mV vs SCE, 9 ωρες

Το διαγραμμα αφορά δοκιμιο που υπεστη ποτενσιοστατικη διαβρωση για 9 ωρες. Η ενταση του πνευματος αυξανεται σημαντικα σε αυτό το χρονικο διαστημα, γεγονός που υποδηλωνει φαινομενο εντονης διαβρωσης. Η απωλεια υλικου και ο σχηματισμος πορων και ρωγμων, εχουν αυξησει την ειδικη επιφανεια του κραματος και με συνεπεια την αυξηση της ανταλλαγης ιοντων με το ηλεκτρολυτικο διαλυμα, δηλαδη αυξηση της εντασης του διερχομενου ρευματος

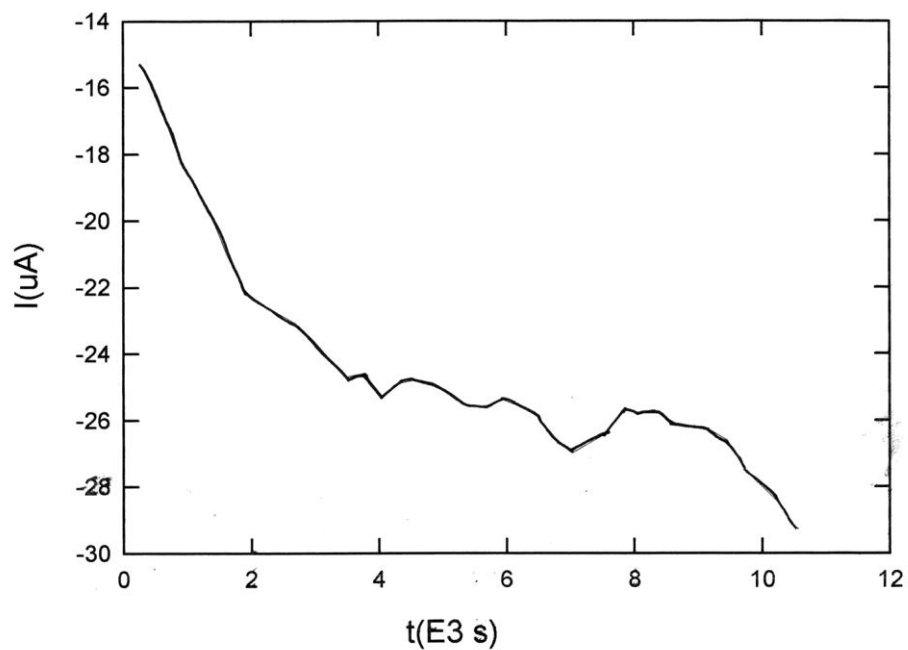


### OCP (-700mV vs SCE), 9 ωρες

Στο διαγραμμα φαινεται πως η μεταβολη ρευματος ειναι σχετικα μικρη με τη παροδο του χρονου, το οποιο και σημαινει πως το δοκιμιο διαβρωνεται λιγο, αλλα με σταθερο ρυθμο.



**-870mV vs SCE, 3 ωρες**



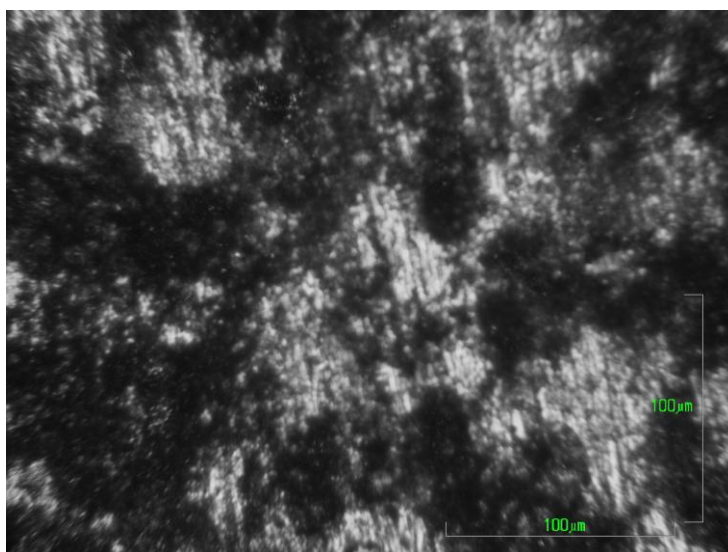
**-870mV vs SCE, 9 ωρες**

Τα διαγράμματα αυτά αφορούν δοκιμία που υπεστησαν ποτενσιοστατική διαβρωση στην καθοδική περιοχή για 3 και 9 ώρες. Η πτώση του ρεύματος σε πιο ηλεκτραρνητικές τιμές δηλώνει μείωση της διαβρώσης. Σε αυτή την περιοχή έχουμε εισδοχή κατιόντων υδρογόνου στις επιφανειακές στοιβάδες του κραματος. Τα ιόντα αυτά εισέρχονται στο

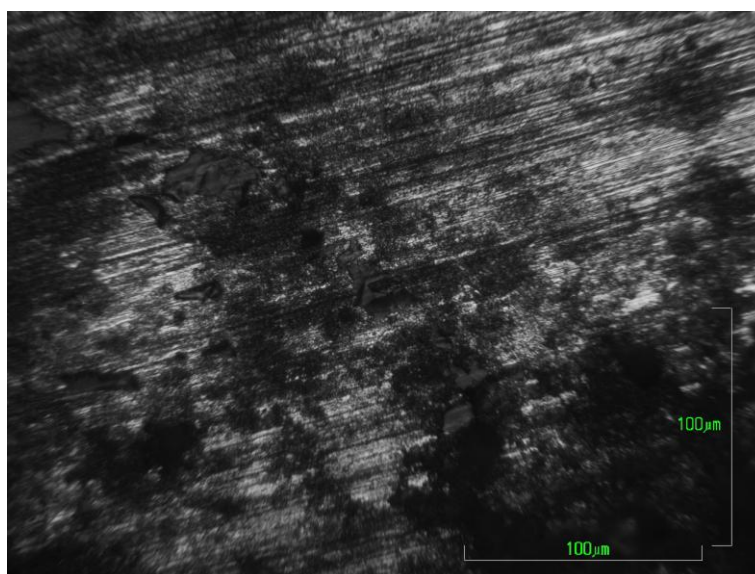
πλεγμα σε θέσεις παρεμβολής και μειώνουν την ελεύθερη κίνηση των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό υλικού.

### 5.3.3 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΩΝ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα διαβρωμένα δοκίμια παρατηρήθηκαν αρχικά στο οπτικό και κατοπιν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σαρώσης για μεταλλογραφική παρατήρηση. Ακολουθούν χαρακτηριστικές φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο:



*Ανοδικό τμήμα 250mV vs SCE, 9ωρες*

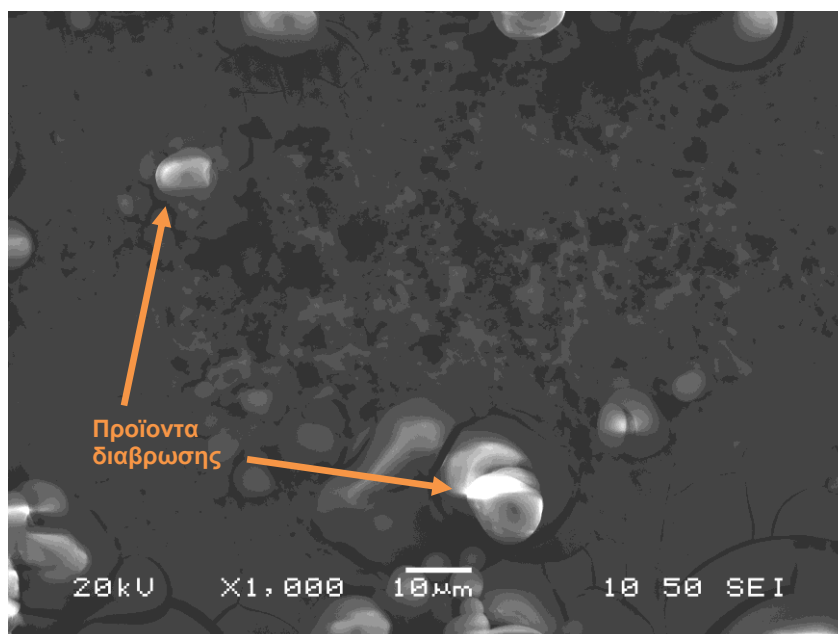


*Σημείο OCP -700mV vs SCE, 9 ωρες*

Οι σκουρες κηλίδες είναι τα προϊόντα διαβρωσης που έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια των δοκιμίων λόγω αντιδράσεων του κραματός με τον ηλεκτρολύτη. Ο αριθμός των προϊόντων διαβρωσης είναι σαφέστερα μεγαλύτερος στο δοκίμιο που διαβρώθηκε σε τιμή δυναμικού του ανόδου τμήματος.

#### 5.3.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΤΩΝ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρατηρήθηκαν οι επιφάνειες των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε ποτενσιοδυναμική διάβρωση. Παρατίθενται χαρακτηριστικές φωτογραφίες.



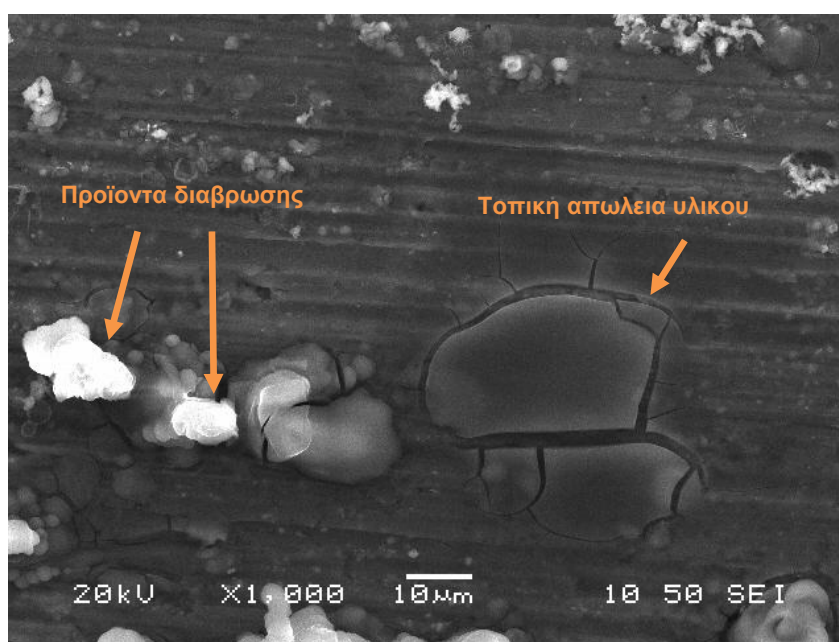
*Ανοδικό τμήμα 250mV vs SCE, 9 ώρες*

Παρατηρείται έντονη διάβρωση του υλικού, σχεδόν "σπηλαιώδης" διάβρωση (anodic dissolution), η οποία εμφανίζεται στην εικόνα με τη μορφή πορών και ατελειών του υλικού. Οι ατελίες αυτές, όπως θα δούμε και παρακάτω, υποβαθμίζουν τη μηχανική αντοχή του υλικού κατά τη μηχανική φορτίση.

Επίσης διακρίνονται προϊόντα διαβρωσης, στα οποία έγιναν σημειακές κ.β χημικές αναλύσεις με EDAX. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ήταν τα εξής :

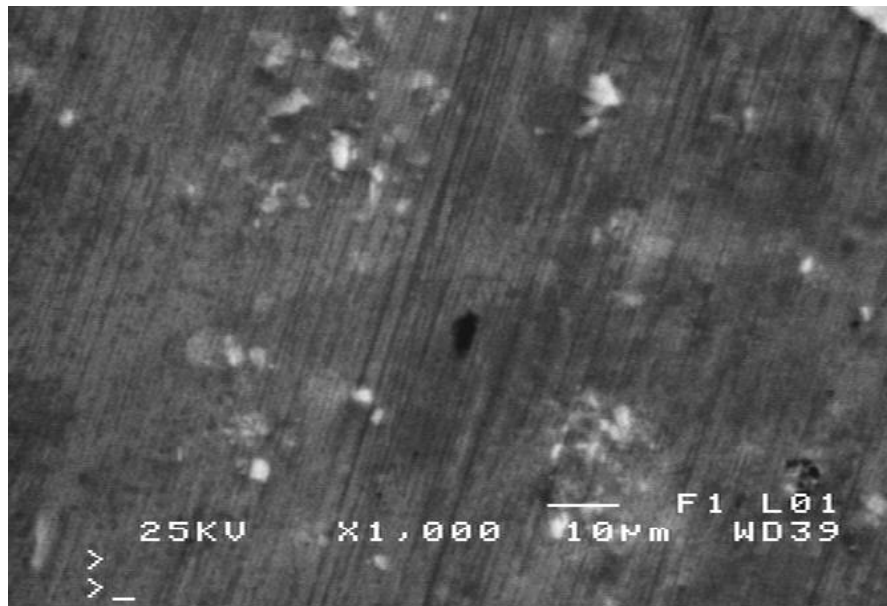
Στοιχεία	(%) κ.β.
O	49.09
Al	45.89
Zn	4.1
Mg	0.92
<b><u>7075.T6</u></b>	<b>100</b>

Στα προϊόντα διαβρωσης υπάρχει αυξημένο ποσοστό οξυγονου, το οποίο σημαίνει πως είναι πολύ πιθανος ο σχηματισμος οξειδίου στην επιφάνεια του δοκιμίου. Τα οξείδια αυτά ενδέχεται να είναι  $Al_2O_3$  ή  $Al(OH)_3$  και για τον σαφή προσδιορισμο τους θα γίνει χρήση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD).



Σημείο OCP -700mV vs SCE, 9 ώρες

Το σημείο OCP, όπως έχει προαναφερθεί και στο θεωρητικό μέρος, είναι το δυναμικό ισορροπίας κατά το οποίο δεν υπάρχει ηλεκτροχημική αλληλεπίδραση μεταξύ του κράματος αλουμινίου και του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, παρατηρείται τόσο τοπική απώλεια υλικού, όσο και προϊόντα διαβρωσης. Αυτό οφείλεται στην έντονη ηλεκτροχημική δράση που υπάρχει μεταξύ κράματος και ηλεκτρολύτη στο χρονικό διάστημα των ~30min που απαιτούνται μέχρι να ισορροποηθεί ο αριθμός θετικών και αρνητικών ιόντων μέσα στο κελί.

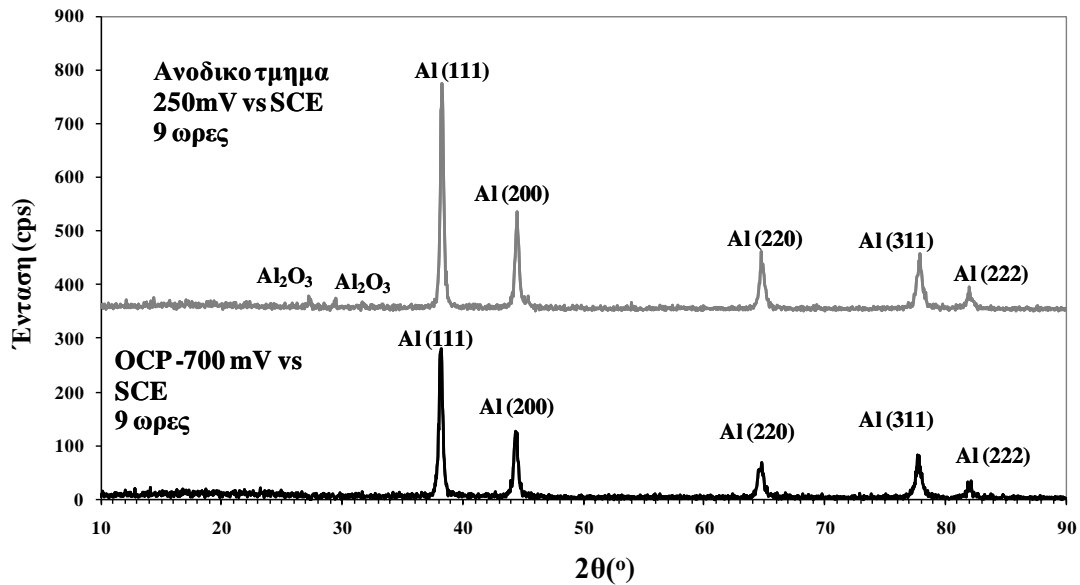


*Καθοδικό τμήμα -870mV vs SCE, 9 ώρες*

Όπως έχει προαναφερθεί, για τις τιμές δυναμικού στο καθοδικό τμήμα της ποτενσιοδυναμικής καμπύλης, το δοκίμιο δεν διαβρώνεται, συνεπώς είναι δικαιολογημένο το γεγονός ότι δεν παρατηρούνται αποτελέσματα διαβρωτικής δράσης, όπως είναι απώλεια υλικού, ατελείες ή προϊόντα διαβρωσης.

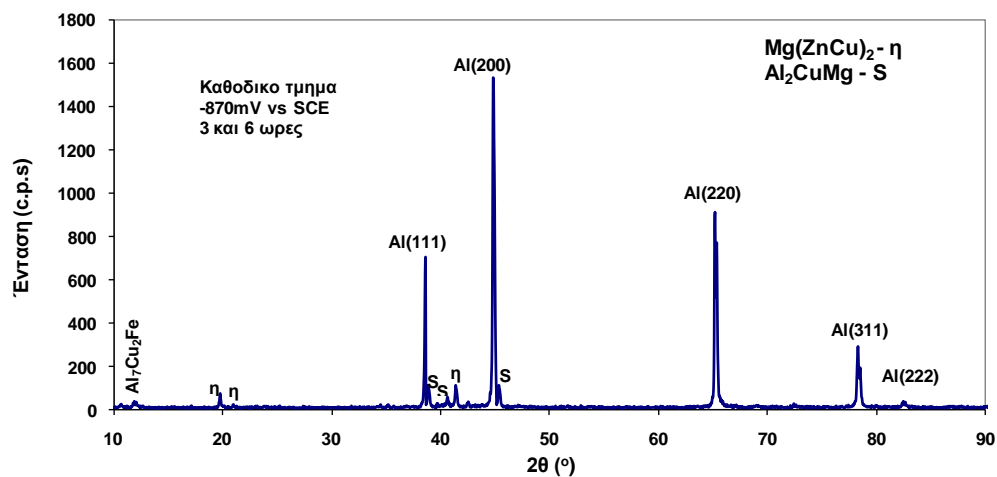
### 5.3.5 ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ-Χ ΣΤΑ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Στα δοκίμια έγινε περιθλασιμετρία ακτινών-Χ (XRD) μετά τη διαβρωση με σκοπό την εύρεση και ταυτοποίηση των επακολουθώντων ποτενσιοστατικών διαβρώσεων, όπως είναι οξειδία ή ενδομεταλλικές ενώσεις. Παρακάτω θα παρατεθούν και θα σχολιαστούν τα πιο χαρακτηριστικά ακτινοδιαγράμματα.



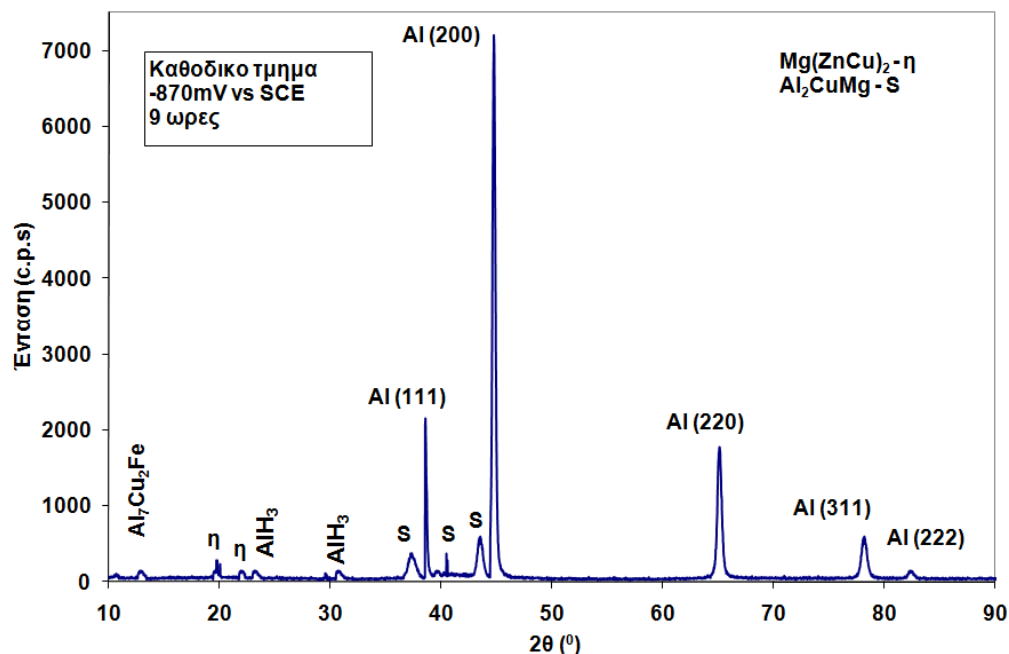
Στα ακτινοδιαγράμματα βλέπουμε την εμφάνιση του οξειδίου  $\text{Al}_2\text{O}_3$  για το δοκίμιο που υπέστη ποτενσιοστατική διαβρωση 9 ωρών σε δυναμικό 250mV vs SCE. Η εμφάνιση αυτή δικαιολογεί και επαληθεύει το αυξημένο ποσοστό οξυγόνου που είχε ανιχνευτεί νωρίτερα σε σημειακή χημική ανάλυση EDAX στα προϊόντα διαβρωσης του ίδιου δοκιμίου.

Για το δοκίμιο που υπέστη ποτενσιοστατική διαβρωση στο σημείο OCP, δεν παρατηρείται κάποια προσθετή φάση πέρα από τη μητρική του στερεού διαλύματος Al-Zn.





Για το δυναμικό που επελέγη στο καθοδικό τμήμα και για χρονική διάρκεια 3 και 6 ωρών, το ακτινοδιάγραμμα δε διαφέρει από αυτό που είχε εξαχθεί κατά το χαρακτηρισμό του υλικού, καθώς το κράμα δεν υφίσταται διάβρωση.

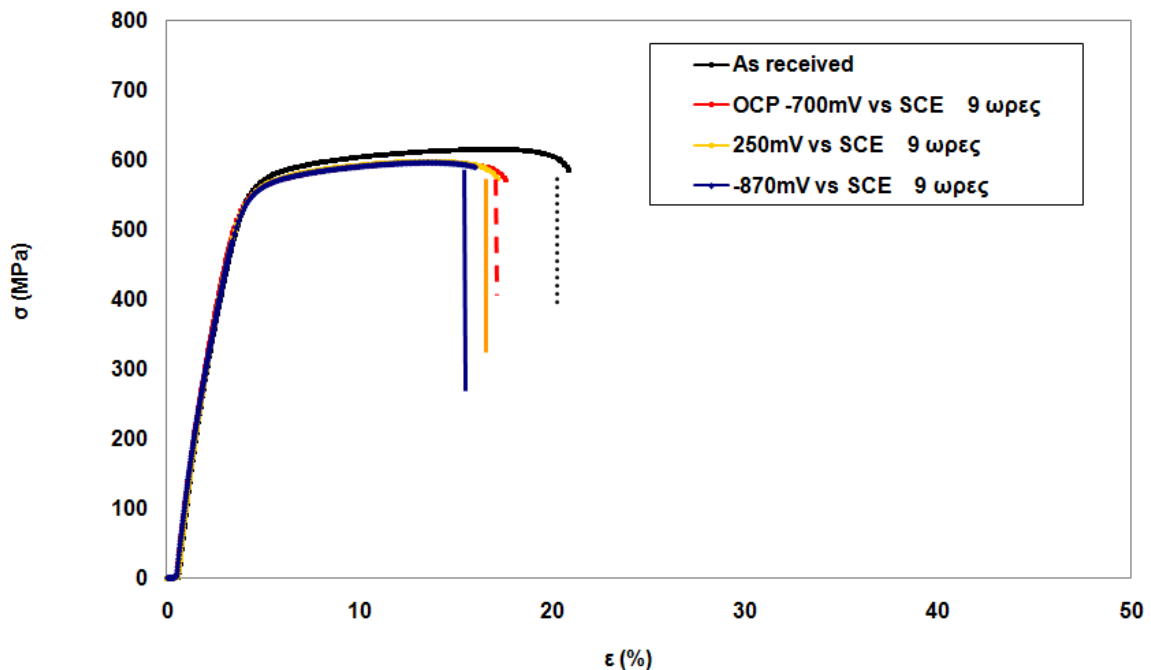


Για το ίδιο δυναμικό και χρονική διακρία 9 ωρών ωστόσο, παρατηρείται η προσθετη φάση του υδριδίου **AlH<sub>3</sub>** στο κράμα. Αυτό οφείλεται στην εισδοχή ποσοτήτας υδρογόνου στο αλουμίνιο, σε ποσοστό που ξεπερνά το όριο διαλυτότητας του, με αποτέλεσμα να έχουμε κατακρημνιση του υδριδίου και εμφανιση του στο ακτινοδιάγραμμα.

Είναι πολύ πιθανό να υπήρχε σχηματισμός υδριδίων και στις ποτενσιοστατικές διαβρώσεις των 3 και 6 ωρών, ωστόσο αυτός θα ήταν σε ποσοότητες μη-ανιχνευσιμες με τη τεχνική της περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ.

## 5.4 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Η δοκιμασία εφελκυσμού εφαρμόστηκε στα δοκίμια αμέσως μετά το πέρας των ποτενσιοστατικών διαβρώσεων. Τα δοκίμια ήταν κατασκευασμένα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 8M-99, και η ταχύτητα απομακρύνσης των αρπαγών τέθηκε στα 0,5mm/min. Ακολουθούν συγκριτικές καμπύλες εφελκυσμού, αρχικά για όλες τις τιμές δυναμικού στις οποίες έγιναν ποτενσιοστατικές διαβρώσεις και κατόπιν για τις διαφορετικές χρονικές διάρκειες ποτενσιοστατικής διαβρώσης στην τιμή δυναμικού **-870mV vs SCE**.

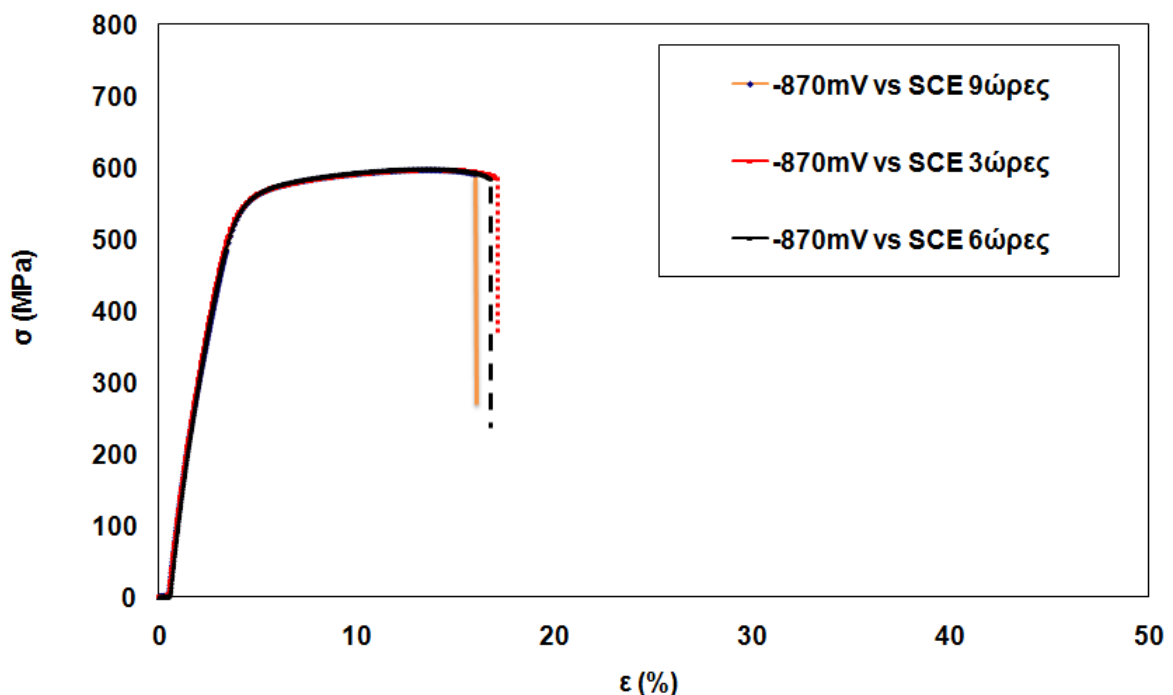


Απο το συγκριτικό διαγραμμα που παρατεθηκε μπορουν να εξαχθουν τα εξης συμπερασματα:

- 1) Δεν υπαρχει καμια ουσιαστικη μεταβολη του οριου θραυσης μεταξυ των δοκιμιων που υπεστησαν ποτενσιοστατικη διαβρωση. Συγκριτικα με το δοκιμιο αναφορας, υπαρχει μια μικρη ελαττωση του οριου θραυσης που οφειλεται σε επιφανειακες μικροατελειες του υλικου, οι οποιες ειναι λογικο να υφιστανται, εφοσον στο δοκιμιο ειχαμε ειτε διαβρωση, ειτε σχηματισμο οξειδιων.
- 2) Υπαρχει μεγαλη μειωση ολκιμοτητας των δοκιμιων που υπεστησαν ποτενσιοδυναμικη διαβρωση, σε σχεση με το δοκιμιο αναφορας.

- 3) Η διαφορά ολκιμότητας των δοκιμίων που υπεστησαν ποτενσιοδυναμική διαβρωση στις τιμές δυναμικού **-700mV vs SCE** και **250mV vs SCE** είναι ελάχιστη, γεγονός που οφείλεται στο ότι και στις δύο αυτές τιμές δυναμικού, τα δοκίμια διαβρώνονται έντονα στην επιφάνειά τους. Η διαβρωση αυτή, λειτουργεί ως αφετηρία και διάδοση ρωγμών κατά τη δοκιμασία εφελκυσμού.
- 4) Το δοκίμιο που υπεστη ποτενσιοδυναμική διαβρωση στην τιμή δυναμικού **-870mV vs SCE** έχει παρουσιάσει ακόμα μεγαλύτερη μείωση ολκιμότητας. Η μείωση αυτή οφείλεται στην εμφάνιση του υδριδίου **AlH<sub>3</sub>** που ανιχνεύτηκε νωρίτερα στην περιθλασιμετρία ακτίνων Χ. Η εμφάνιση του υδριδίου καθιστά πολύ πιθανή την εισδοχή υδρογόνου σε θέσεις παρεμβολής στο κρυσταλλικό πλέγμα, με αποτέλεσμα την ενδοτραχυνση αλλά και περαιτέρω μείωση της ολκιμότητας του δοκιμίου.

Για να επεξηγηθεί καλύτερα αυτό το φαινόμενο, θα παρατεθεί και το συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού για τις ποτενσιοστατικές διαβρώσεις 3,6 και 9 ωρών στο δυναμικό **-870mV vs SCE**.



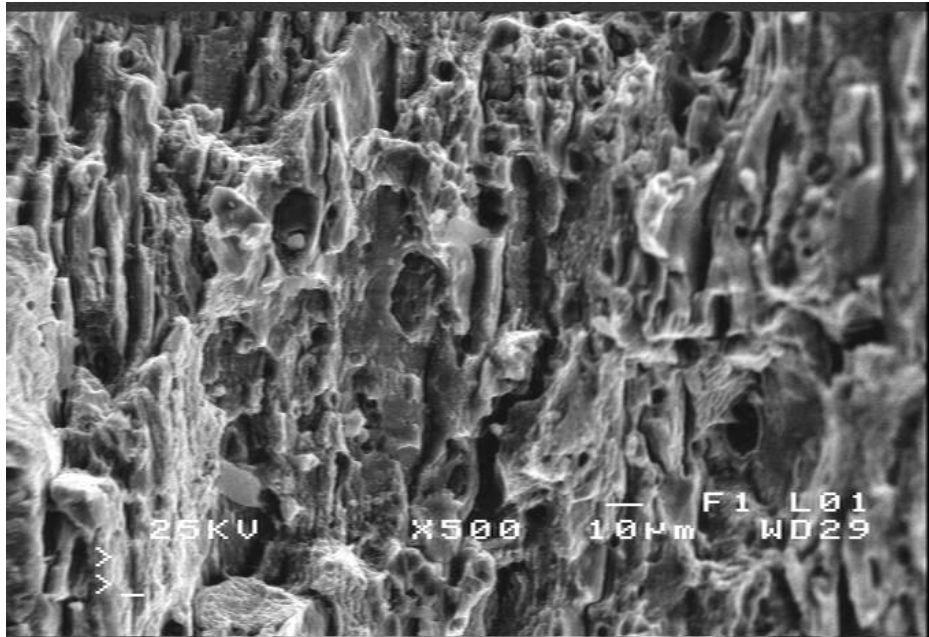
Τα συμπεράσματα από τα διαγράμματα εφελκυσμών είναι τα εξής:

- 1) Μεταξύ των δοκιμών εφελκυσμού σε δοκίμια που διαβρώθηκαν ποτανοστατικά για 3 και 6 ώρες, υπάρχει ελαχίστη μείωση στην ολκιμότητα, η οποία είναι στα όρια στατιστικού σφαλματος. Έτσι, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα.
- 2) Για το δοκίμιο των 9 ωρών, ωστόσο, έχουμε υπαρκτή μείωση ολκιμότητας σε βαθμό που να καθιστά σαφές, ότι έχει πραγματοποιηθεί εισδοχή υδρογόνου στην επιφάνεια του κραματος σε τέτοιο βαθμό, ώστε να υποβαθμίζεται η ολκιμότητα του κραματος.

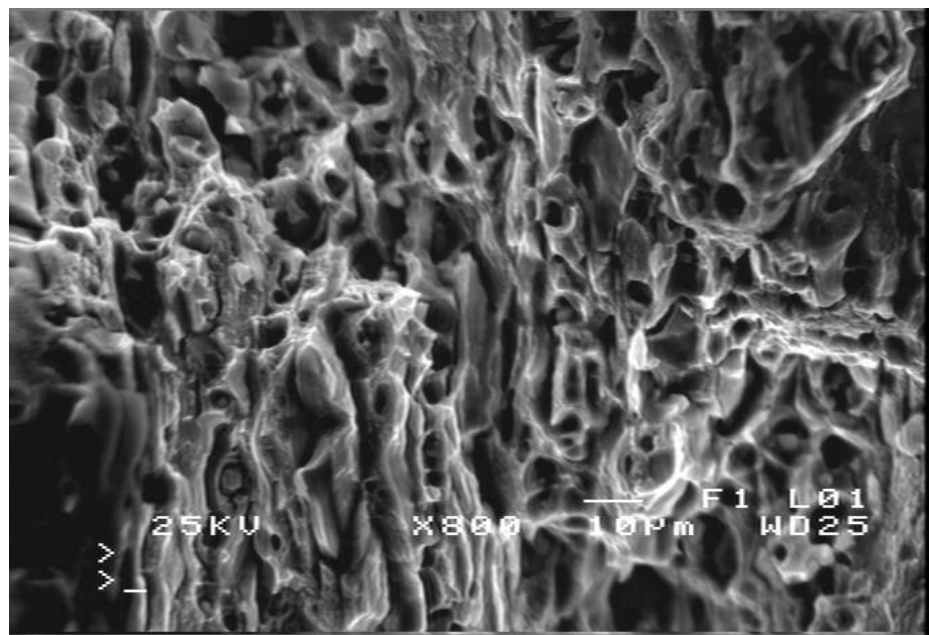
Για ειδικότερη μελέτη των αποτελεσμάτων των ποτενοστατικών διαβρώσεων στις δοκιμές εφελκυσμού, έγιναν παρατηρήσεις των θραυσμένων δοκιμίων στο ηλεκτρονικό μικροσκοπιο σάρωσης. Το είδος της θραύσης που υπεστέι το κάθε δοκίμιο θα μπορέσει να δώσει περαιτέρω πληροφορίες για τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.

## **5.5 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΘΡΑΥΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**

Μετά τη δοκιμασία εφελκυσμού, τα θραυσμένα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκοπιο σάρωσης ώστε να παρατηρηθούν οι επιφανειακές στοιβαδες του κραματος στο μετωπο θραύσης. Παρακατω, θα γίνει σχολιασμος των πιο χαρακτηριστικων εικονων.



*OCP -700mV vs SCE, 9 ωρες*

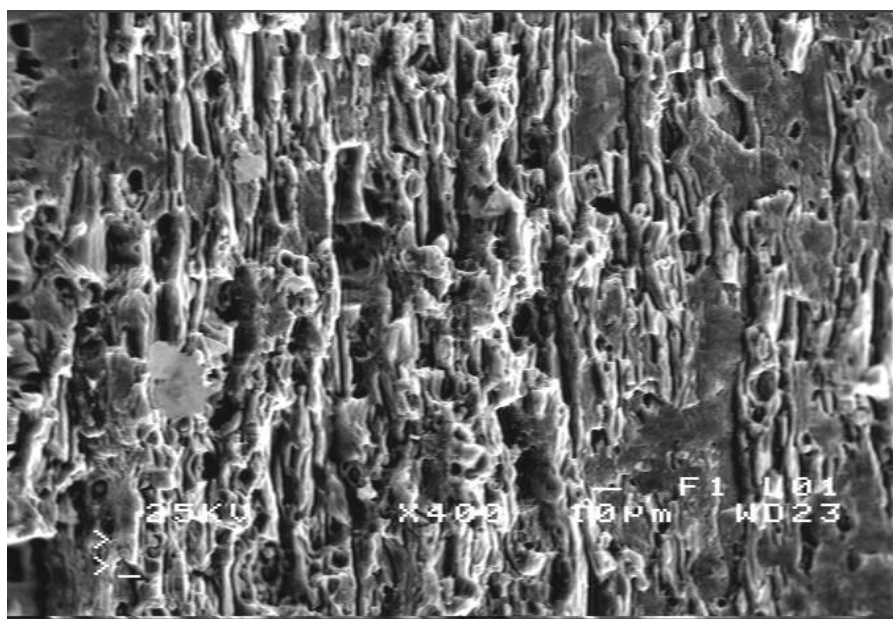


*250mV vs SCE, 9 ωρες*

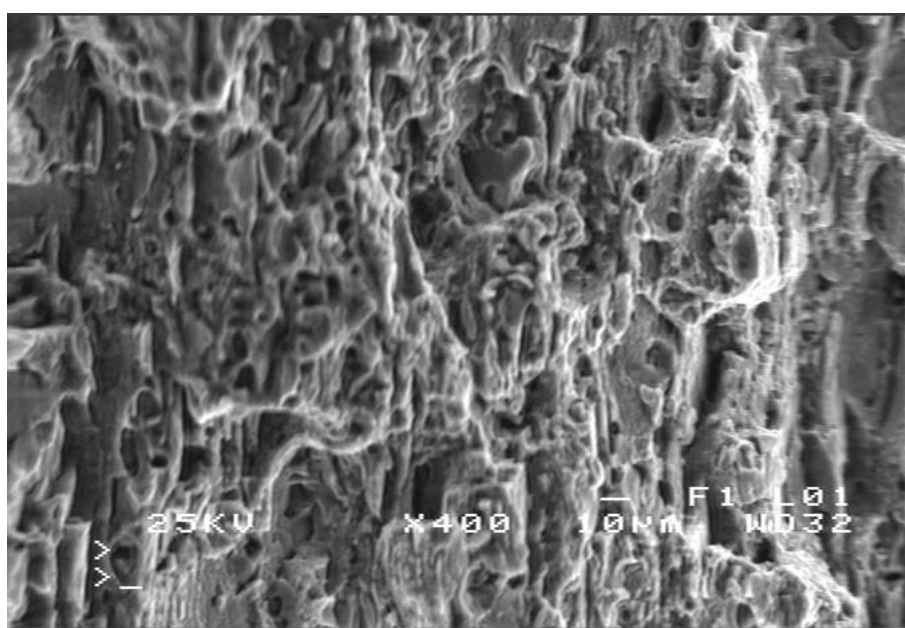
Οι φωτογραφίες που παρήχθησαν στα δοκιμια που διαβρωθηκαν ποτενσιοστατικά 9 ωρες στα δυναμικά **-700 mV vs SCE** και **250mV vs SCE**, δειχνουν μεγαλες περιοχες ολκιμης θραυσης στις επιφανειακες στοιβαδες του υλικου και μικροτερες περιοχες ψαθυρης θραυσης, καθως η εικονα προχωρα μακρια απο την επιφαναεια.

Το είδος της θραυσσης οφείλεται στα κατακρημνίσματα που σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της ποτενσιοστατικής διαβρωσης, αφού αυτά αποτελούν σκληρές και ευθραυστες φάσεις στα όρια των κοκκων .

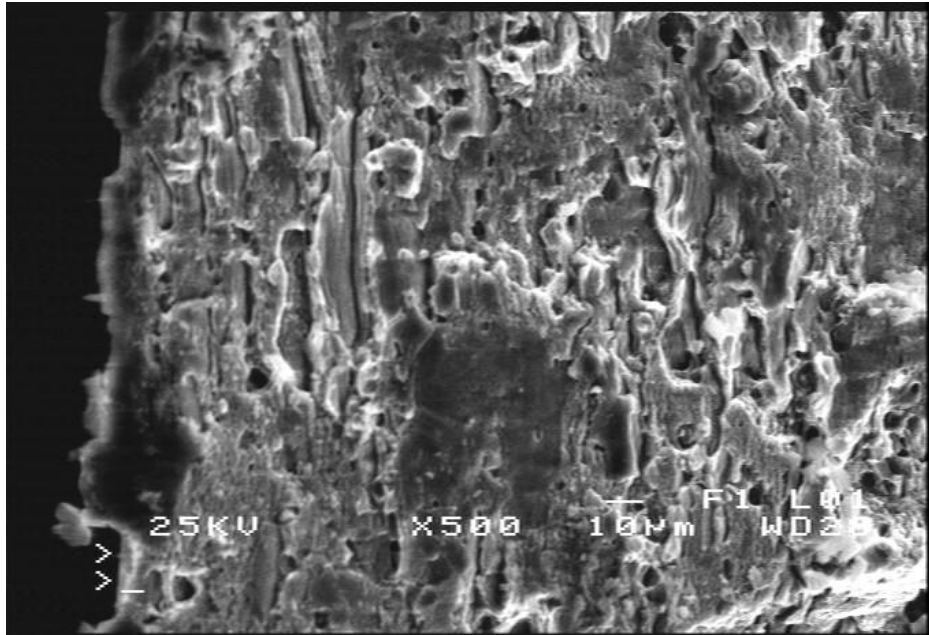
Υπενθυμίζουμε πως στο δοκίμιο που φορτίστηκε ανοδικά είχαμε την ανάπτυξη οξειδίων (π.χ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ενώ και στο δοκίμιο που διαβρώθηκε στο OCP είχαμε ρωγμές και απωλείες υλικού εξαιτίας της διαβρωτικής δράσης του ηλεκτρολύτη, μέχρι το κράμα να ισορροπήσει ηλεκτροχημικά με το NaCl, οπότε και η διαβρωση συντελείται με μικρή ένταση, αλλά σταθερό ρυθμό.



*-870mV vs SCE , 3 ώρες*



*-870mV vs SCE, 6 ώρες*



*-870mV vs SCE, 9 ωρες*

Στην περίπτωση των δοκιμιών που φορτίστηκαν καθοδικά στην τιμή δυναμικού **-870mV vs SCE** δείχνει να επικρατεί πλήρως η ψαθυρή θραύση στις επιφανειακές στοιβαδές των δοκιμιών. Αυτό οφείλεται τόσο στην ύπαρξη των κατακρημνισμάτων αλλά ενδεχομένως και στην εισδοχή υδρογόνου στις επιφανειακές στοιβαδές του υλικού μας.

## **5.6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Από το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων και παρατηρήσεων μπόρεσαν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η ποτενσιοδυναμική φόρτιση τόσο ανοδικά, όσο και καθοδικά, επηρεάζει την ολκιμότητα των δοκιμιών Al 7075 T6, ενώ το όριο θραύσης παραμένει προσεγγιστικά το ίδιο.
- Η καθοδική διαβρωση για 9 ώρες οδήγησε στο σχηματισμό του υδριδίου **AlH<sub>3</sub>**, όπως έδειξε η περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ. Στην ανοδική φόρτιση για 9 ώρες παρατηρήθηκε σχηματισμός οξειδίου **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** στην επιφάνεια των δοκιμιών.



- Οι θραυσιγενείς επιφάνειες των δοκιμιών που υπεστήσαν ποτενσιοδυναμική διαβρωση στο OCP (**-700mV vs SCE**) και στο ανοδικό τμήμα (**250mV vs SCE**), έδειξαν ότι αποτελούνται από κρατηρές (**dimples**), που είναι χαρακτηριστικά ολκιμής θραυσης. Στα δοκίμια αυτά, η μείωση της ολκιμότητας πιθανώς οφείλεται στη δημιουργία μικροατελειών ή ρωγμών στις επιφανειακές στοιβαδες του υλικού λόγω των διαβρωτικών ιόντων χλωρίου του ηλεκτολυτικού διαλύματος (**Cl<sup>-</sup>**).
- Στην περίπτωση της καθοδικής διαβρωσης (**-870mV vs SCE**) παρατηρήθηκε ψαθυση θραυση στις επιφανειακές στοιβαδες του υλικού που ενδεχομένως οφείλονται στην εισδοχή υδρογόνου, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος, η θραυση παραμένει ολκιμή.
- Η ποτενσιοστατική διαβρωση στην τιμή δυναμικού **-870mV vs SCE** οδήγησε, κατά τις δοκιμές εφελκυσμού, σε σημαντικότερη μείωση της ολκιμότητας των δοκιμιών αυτών από τα δοκίμια που είχαν φορτιστεί αντίστοιχα στις τιμές **-700mV vs SCE** και **250mV vs SCE**.
- Η καθοδική διαβρωση για 9 ώρες έδειξε ουσιαστική μείωση ολκιμότητας του κραματος, κάτι που δεν παρατηρήθηκε στην περίπτωση των 3 και 6 ωρών.



## **5.7 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ**

1. Εξέταση της διαβρωσης του κραματος Al 7075 T6 υπο μηχανικη καταπνοιση (SCC).
2. Να εξετασται η επιδραση των μηχανικης καταπνοισης στη διαβρωση του κραματος.
3. Να εξετασται η τριβολογικη συμπεριφορα του κραματος υπο συνθηκες διαβρωσης.
4. Να εξετασται η αντοχη του κραματος Al 7075 T6 στην οξειδωση.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. **ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ, ΧΥΤΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ**-του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Χρ.Ν.ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ
2. **ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ**-του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Χρ.Ν.ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ
3. **ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΡΑΜΑΤΑ** - του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Χρ.Ν.ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ
4. **ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ I**- του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γ.Δ.ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
5. **ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑ II** -του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γ.Δ.ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
6. **ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ**-του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γ.Δ.ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
7. **ΜΕΤΑΛΛΟΤΕΧΝΙΑ**-του Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γ.Δ.ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
8. **METALS HANDBOOK, Ninth Edition, Volume 9, Metallography and Microstructures** – American Society for Metals.
9. **METALS HANDBOOK, Ninth Edition, Volume 10, Materials Characterization** – American Society for Metals.
10. **CORROSION ENGINEERING** – MARS G. FONTANA, McGraw-Hill Publications (1987)
11. **ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**-των Καθηγητών Ε.Μ.Π ΙΩΑΝΝΗ ΧΡΥΣΟΥΛΑΚΗ και ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΠΑΝΤΕΛΗ (2003)