



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

## **Ελαφρότερα κατασκευαστικά μέρη στην αυτοκινητοβιομηχανία**



Διπλωματική Εργασία

**Γεώργιος Κήρυκος Λαμνάτος**

**Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αν. Καθηγητής**

Αθήνα, Οκτώβριος 2022









# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

## Ελαφρότερα κατασκευαστικά μέρη στην αυτοκινητοβιομηχανία

Διπλωματική Εργασία

**Γεώργιος Κήρυκος Λαμνάτος**

Επιβλέπων: Dr. – Ing. Σπύρος Παπαευθυμίου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ/ΜΜ/ΕΕΕΕ

Σπ. Παπαευθυμίου, Αν. Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Π. Τσακιρίδης, Επικ. Καθηγητής .....(Υπογραφή)



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Στην εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, συνέβαλαν καθοριστικά πολλοί άνθρωποι, τόσο από τον χώρο του Πανεπιστημίου, όσο και από τη Βιομηχανία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής Εργασίας μου, Dr.-Ing. Σπ. Παπαευθυμίου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και να διευρύνω τις γνώσεις μου σε θεωρητικό αλλά και εργαστηριακό επίπεδο.

Επίσης, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τον Δρ. Α. Βαζδιδιβανίδη, προϊστάμενο του εργαστηρίου μεταλλογραφίας και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. και την υποψήφια Διδάκτωρ (ΥΔ) κ. Σ. Παπαδοπούλου για τον χρόνο που διέθεσαν, τη συνεχή υποστήριξη τους κατά τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της δουλειάς μου, καθώς και τις πολύ χρήσιμες υποδείξεις τους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ το γενικό διευθυντή κ Κ. Δανηλίδη για την υποδοχή στις εγκαταστάσεις της εταιρίας.

Ακόμη, σχετικά με την εξοικείωσή μου στους χώρους των εργαστηρίων της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Ρίκο και τον Υπεύθυνο Ασφαλείας και Υπεύθυνο Τεχνικού Εργαστηρίου Μηχανικών Δοκιμών Δρ. Α. Τουλφατζή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ΥΔ κ. Β. Λουκαδάκη για την άψογη συνεργασία μας, την υποστήριξή του και τον συντονισμό με την ομάδα του κ. Παπαευθυμίου από την αρχή μέχρι και το τέλος της Διπλωματικής Εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετήθηκε η επίδραση διαφορετικών βαθμών παραμόρφωσης στην απόκριση της φυσικής και τεχνητής γήρανσης προφίλ κράματος αλουμινίου 6063. Η εργασία αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση των συνθηκών της γήρανσης, ώστε ελαφρότερα υλικά, όπως τα κράματα αλουμινίου να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ο απώτερος σκοπός είναι να γίνει αντιληπτό εάν διαφορετικού ποσοστού παραμορφώσεις δημιουργούν ανομοιογένειες στις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού συνολικά και συγκεκριμένα στη σκληρότητα. Πραγματοποιήθηκε γήρανση σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες 150°C, 180°C και 210°C για δοκίμια που έφεραν αρχική παραμόρφωση 0%, 2%, 5%, 10% κι έπειτα μετρήθηκε η σκληρότητά τους μετά την πάροδο 10, 100 και 600 λεπτών. Με τη χρήση οπτικής μικροσκοπίας παρατηρήθηκε η μικροδομή των δοκιμίων ύστερα από προσβολή με διάλυμα Barker's και διάλυμα υδροφθορίου, για να γίνει ευδιάκριτη η επίδραση της γήρανσης και των παραμορφώσεων. Τέλος, συμπληρωματικά με τις υπόλοιπες μεθόδους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης για να γίνει ακριβής ανίχνευση των φάσεων (GP zones,  $\beta''$ ,  $\beta'$ ,  $\beta$ ) που υπάρχουν στα δοκίμια από τα πρώτα μέχρι και τα τελευταία στάδια της γήρανσης. Η μέγιστη σκληρότητα παρατηρείται για το δοκίμιο με παραμόρφωση 10% στη συνθήκη τεχνητής γήρανσης στους 180°C για 600 λεπτά και είναι επίσης η ιδανική συνθήκη για να μην υπάρχουν μεγάλες διαφορές στη σκληρότητα μεταξύ των δοκιμίων με διαφορετικές παραμορφώσεις.



# ABSTRACT

---

This Diploma Thesis studies the influence of different degrees of pre-deformation on the artificial and natural aging response of extruded Aluminum profile 6063. The aim was to understand whether a different degree of deformation can lead to a variation of mechanical properties of the material. The samples were pre-deformed with 0%, 2%, 5%, 10% and then naturally aged but also artificially aged at 3 temperatures (150 °C, 180 °C, 210 °C). Hardness measurements were taken for each sample after 10, 100 and 600 minutes of aging. After the end of the aging process, the influence of pre-deformation and aging on the microstructure of the material was examined via optical microscopy and, finally, using Differential Scanning Calorimetry, the exact detection of the present phases were determined. The aging condition of 180 °C for 600 minutes duration is the most beneficial one among those that have been examined, because the maximum hardness of the specimens is achieved and at the same time the variation of the hardness of the specimens with different degree of pre-deformation is very small.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	8
ABSTRACT .....	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΛΑΦΡΟΤΕΡΑ ΥΛΙΚΑ .....	12
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	13
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	16
2.1 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ .....	16
2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ .....	17
2.2.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	20
2.2.2 ΣΕΙΡΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6XXX.....	23
2.3 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕΙΡΑΣ 6XXX.....	24
2.3.1 ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ.....	24
2.3.2 ΔΙΕΛΑΣΗ.....	25
2.3.3 ΔΙΑΛΥΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	25
2.3.4 ΒΑΦΗ.....	26
2.3.5 ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	27
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ .....	32
3.1 ΜΕΛΕΤΩΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ .....	32
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	32
3.2.1 ΚΟΠΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	32
3.2.2 ΔΙΑΛΥΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΑΦΗ.....	34
3.2.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	35
3.2.4 ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	36
3.2.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ .....	37

---

3.2.6	ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ .....	39
3.2.7	ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ .....	44
3.2.8	ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (Differential Scanning Calorimetry)	44
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	46
4.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	46
4.1.1	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ .....	46
4.1.2	ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 0% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	48
4.1.3	ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 2% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	51
4.1.4	ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 5% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	54
4.1.5	ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 10% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ.....	57
4.1.6	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	60
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ .....	62
4.2.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ BARKERS .....	63
4.2.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ HF .....	69
4.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ .....	75
5	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	79
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	81
7	ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	82
8	ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	86
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	88

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΕΛΑΦΡΟΤΕΡΑ ΥΛΙΚΑ

Δεδομένης της πλέον επιτακτικής ανάγκης για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αλλά και ταυτόχρονα της ανάγκης για υλικά με συνεχώς βελτιωμένες ιδιότητες οι μηχανικοί της επιστήμης των υλικών και της μεταλλουργίας καλούνται να βρουν καινοτόμες λύσεις στον τομέα της βελτιστοποίησης των ήδη υπαρκτών υλικών, αλλά και στην ανάπτυξη νέων. Αναφέρεται πως ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται για το 26% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του πλανήτη και για το 13,1% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα [1]. Η πρόκληση, λοιπόν, που πρέπει να αντιμετωπιστεί από την επιστημονική κοινότητα είναι η παραγωγή νέων ή η βελτιστοποίηση υπαρχόντων υλικών με ιδιότητες που ανταποκρίνονται στις ανάγκες της σημερινής κοινωνίας και έχουν ως στόχο να αναβαθμίσουν την ποιότητα ζωής των ανθρώπων και ταυτόχρονα να μειώσουν την κατανάλωση της ενέργειας και της παραγωγής ρυπογόνων ουσιών.

Πιο συγκεκριμένα, στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας επικρατεί η τάση για την παραγωγή και τη χρήση ελαφρότερων υλικών. Το στοίχημα, δηλαδή, που πρέπει να κερδιστεί είναι τα σύγχρονα αυτοκίνητα να αποτελούνται από πολύ ελαφριά υλικά που ταυτόχρονα έχουν πολύ υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Τα οφέλη από τη μείωση αυτή του βάρους των οχημάτων είναι πολλά. Αρχικά, για να κινηθεί ένα όχημα ελαφρότερου βάρους απαιτείται μικρότερο ποσό ενέργειας και επομένως μικρότερη ποσότητα καυσίμου. Έτσι, πέρα από την προφανή οικονομία καυσίμου, μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρυπογόνων αερίων. Μιλώντας με αριθμούς, μείωση βάρους 100 κιλών ενός οχήματος συνεπάγεται εξοικονόμηση 0,6 λίτρων καυσίμου ανά 100 χιλιόμετρα και επομένως μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κατά 9 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο. Επιπλέον, αναφέρεται πως με την αντικατάσταση 1 κιλού χάλυβα με 500 γραμμάρια κράματος αλουμινίου κατά την κατασκευή ενός οχήματος, αυτό θα

εκπέμψει λιγότερο από 10 κιλά ρυπογόνων ουσιών κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής του. Ως αποτέλεσμα, εάν εφαρμοζόταν αυτό σε κάθε όχημα, θα εκπέμπονταν 44 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα λιγότερο, ετησίως και σε παγκόσμια κλίμακα. [2]

## 1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ανάμεσα στα υλικά που έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι και τα κράματα της σειράς 6xxx, λόγω της σχετικά υψηλής τους αντοχής, της επιδεκτικότητας σε συγκόλληση τους και της ικανότητάς τους να ανθίστανται στη διάβρωση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα προφίλ από κράμα της σειράς αυτής (6063) που έχει διαμορφωθεί με διέλαση. Τα προφίλ αυτά που προορίζονται για χρήση σε οχήματα φέρουν ένα πλήθος διαμορφώσεων, που λαμβάνουν χώρα πριν τη γήρανση, ώστε να είναι λειτουργικά και να εξυπηρετούν τις ανάγκες για τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Η εργασία αυτή επικεντρώθηκε στη μελέτη της επίδρασης των παραμορφώσεων στη σκληρότητα του υλικού κατά τη διεργασία φυσικής και της τεχνητής γήρανσης.

Τα προφίλ αλουμινίου μετά τη διέλαση περνάνε από ισιωτική μηχανή (stretcher) ώστε να είναι εντελώς ίσια και να εξαλειφθεί η όποια παραμόρφωση (buckling) υπάρχει [17]. Βέβαια, συνήθως λαμβάνουν χώρα και μεγαλύτερου βαθμού παραμορφώσεις (Σχήμα 1) μέσω συγκεκριμένων διεργασιών διαμόρφωσης κι έτσι πυροδοτείται το ενδιαφέρον για να μελετηθούν υλικά με παραμορφώσεις έως και της τάξης του 10% [18]. Επομένως παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η ανταπόκριση του υλικού κατά τη διάρκεια της γήρανσης ενώ έχει παραμορφωθεί αρχικά, διότι ένα υλικό το οποίο φέρει διαφόρων βαθμών παραμορφώσεις δύναται να επηρεάσει σημαντικά την κατακρήμνιση των φάσεων και τη συμπεριφορά του στη γήρανση γενικότερα [18].

Πιο αναλυτικά, η μελέτη υλικού που έχει υποστεί ορισμένου βαθμού παραμόρφωση δίνει τη δυνατότητα της λεπτομερέστερης κατανόησης του φαινομένου της σκλήρυνσης μέσω κατακρήμνισης αλλά και των μηχανισμών που την επηρεάζουν γενικότερα με απώτερο σκοπό πάντα τη βελτιστοποίηση των βιομηχανικών διεργασιών [19]. Αυτό πρακτικά οφείλεται στο ότι οι διαταραχές που δημιουργούνται από την παραμόρφωση λειτουργούν ως σημεία ετερογενούς πυρηνοποίησης και συνεπώς επιδρούν στην κινητική της κατακρήμνισης [19].



**Σχήμα 1 :** Διαμορφωμένο προφίλ αλουμινίου για χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία

Συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επίδραση τριών διαφορετικών θερμοκρασιών τεχνητής γήρανσης σε δείγματα διαφορετικού βαθμού αρχικής παραμόρφωσης, ώστε να γίνει κατανοητό σε ποιες συνθήκες η τοπική παραμόρφωση των προϊόντων διέλασης επιφέρει δημιουργία περιοχών με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με μια από τις έρευνες των Kolar, Pedersen et. al [25], αποδεικνύεται ότι η κινητική της κατακρήμνισης και η μηχανική συμπεριφορά του υλικού (σκληρότητα, εφελκυστική αντοχή) επηρεάζονται έντονα από τις αρχικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, αναφέρεται πως η μέγιστη αντοχή που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της γήρανσης αυξάνεται και γενικότερα μπορούν να αποκτηθούν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε συντομότερους χρόνους γήρανσης ως επακόλουθο της θετικής επίδρασης του συνδυασμού εργοσκλήρυνσης και σκλήρυνσης μέσω κατακρήμνιση.

Οι περισσότερες από τις εργασίες που αναφέρονται εστιάζουν την προσοχή τους κυρίως γύρω από τις εφελκυστικές ιδιότητες των κραμάτων και την μηχανική τους αντοχή μέσω των δοκιμών εφελκυσμού. Στις εργασίες αυτές, λοιπόν, οι μετρήσεις της σκληρότητας διαδραματίζουν υποστηρικτικό κυρίως ρόλο. Κατά συνέπεια, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον να διεξαχθεί μια αναλυτικότερη έρευνα η οποία να

δίνει κεντρικότερο ρόλο στη σκληρότητα του υλικού. Για αυτόν τον λόγο στην παρούσα εργασία η έμφαση δίνεται στην επίδραση των παραμορφώσεων που προϋπάρχουν στα δοκίμια στην ανταπόκριση του υλικού στη γήρανση ως προς την σκληρότητα.

---

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

---

### 2.1 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ

Το αλουμίνιο είναι ένα από τα πιο συχνά εμφανιζόμενα στοιχεία στον πλανήτη. Συγκεκριμένα, απαντάται σε ποσοστό 8.23% και βρίσκεται στην τρίτη θέση αμέσως μετά το οξυγόνο (σε ποσοστό 46.1%) και το πυρίτιο (σε ποσοστό 28.2%) [3]. Χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό ειδικό βάρος, συγκεκριμένα 2.7 gr/cm<sup>3</sup> σε αντίθεση με το χάλυβα που έχει 7.9 gr/cm<sup>3</sup>. Επίσης, το σημείο τήξης του είναι αρκετά χαμηλό, περίπου στους 660 °C, μη επιτρέποντας τη χρήση του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Όσον αφορά τη δομή του αλουμινίου, αυτό κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC) με ακτίνα 2.856Å και σταθερά πλέγματος 4.05Å [4].

Το αλουμίνιο έχει χαμηλή θερμοκρασία τήξης και επίσης έχει το πλεονέκτημα ότι είναι όλκιμο και ελατό, λόγω της ύπαρξης και κυρίως της δυνατότητας κίνησης των ατελειών στο κρυσταλλικό του πλέγμα [5]. Επιπλέον, το αλουμίνιο αποτελεί καλό αγωγό της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα, έχει το 62% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού αλλά χάρη στο χαμηλό του βάρος και κόστος, καθίσταται ανταγωνιστικός στην κατασκευή ηλεκτρικών αγωγών [4].

Μια ακόμη σπουδαία ιδιότητα του αλουμινίου είναι η καλή αντοχή του στη διάβρωση. Πιο αναλυτικά, μόλις εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, σχηματίζεται στην επιφάνειά του μια λεπτή αλλά συνεκτική στρώση οξειδίου του αλουμινίου (αλούμινα), η οποία εμποδίζει τη διάβρωση να προχωρήσει στο εσωτερικό του υλικού. Έτσι, το αλουμίνιο καθίσταται κατάλληλο για ποικίλες εφαρμογές από τη χημική βιομηχανία μέχρι και τη βιομηχανία τροφίμων [6]. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι όταν επιχειρείται η αύξηση της μηχανικής του αντοχής μέσω ψυξηλασίας και κραμάτωσης, παρατηρείται μια μείωση στην αντιδιαβρωτική του ικανότητα [7].

Με την προσθήκη διαφόρων κραματικών στοιχείων είναι εφικτό να επιτευχθούν πολύ καλύτερες ιδιότητες συγκριτικά με το καθαρό αλουμίνιο και προσαρμοσμένες πάντα στις ανάγκες τις οποίες καλείται να καλύψει το εκάστοτε κράμα. Στην επόμενη παράγραφο, λοιπόν, θα δοθούν περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα κράματα του αλουμινίου.



## 2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το καθαρό αλουμίνιο δεν έχει ιδιαίτερα υψηλή εφελκυστική αντοχή, αλλά με την προσθήκη άλλων κραματικών στοιχείων, η αντοχή του και γενικότερα οι ιδιότητές του δύναται να βελτιστοποιηθούν. Έτσι, με την προσθήκη στοιχείων όπως το μαγγάνιο, το μαγνήσιο, ο χαλκός, το πυρίτιο και άλλα μπορούν να παραχθούν κράματα με ιδιότητες προσαρμοσμένες ακριβώς στη χρήση για την οποία προορίζεται το υλικό [8].

Αρχικά, τα κράματα αλουμινίου διακρίνονται σε χυτά και κράματα διαμόρφωσης. Έπειτα, κάθε μια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες χωρίζεται σε ακόμη δύο υποκατηγορίες. Αυτές αφορούν τα κράματα που επιδέχονται θερμική επεξεργασία και αυτά που δεν επιδέχονται δηλαδή αυτά στα οποία οποιαδήποτε θερμική επεξεργασία δεν έχει αντίκτυπο στις ιδιότητές τους.

Παραδείγματα κραμάτων που είναι θερμικά επεξεργάσιμα είναι οι σειρές 2xxx, 6xxx, 7xxx, ενώ τα μη θερμικά επεξεργάσιμα αφορούν τις σειρές 1xxx, 3xxx, 5xxx [4].

Όσον αφορά στην ονοματολογία των κραμάτων αλουμινίου τόσο χυτών όσο και διαμόρφωσης, όπως αυτή προκύπτει σύμφωνα με την “American Aluminum Association” [13] αυτή φαίνεται στον Πίνακα 1 και στον Πίνακα 2.

Στα κράματα διαμόρφωσης η κωδικός ονομασία κάθε κράματος έχει τέσσερα ψηφία: Το πρώτο ψηφίο δηλώνει τον αριθμό της σειράς και άρα το κύριο κραματικό της στοιχείο. Το δεύτερο ψηφίο δηλώνει τις τροποποιήσεις του κυρίου κράματος. Τέλος, τα δύο τελευταία ψηφία συναινούν στην αναγνώριση του κάθε ξεχωριστού κράματος της σειράς με μόνη εξαίρεση τη σειρά 1xxx όπου δηλώνει τα δεκαδικά ψηφία του ποσοστού καθαρότητας του αλουμινίου [9].

Στα χυτά κράματα, το πρώτο ψηφίο αντιπροσωπεύει ξανά την κύρια κραματική προσθήκη. Το δεύτερο και το τρίτο ψηφίο χρησιμεύουν για την ταυτοποίηση του κάθε κράματος και τέλος, το τέταρτο ψηφίο διαχωρίζεται με τελεία από τα υπόλοιπα και μπορεί να είναι είτε 0 είτε 1, ανάλογα με το αν το κράμα είναι σε μορφή χυτού ή πλινθώματος αντίστοιχα [10].

**Πίνακας 1 :** Κωδικοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου

ΣΕΙΡΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	ΚΥΡΙΑ ΚΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1xxx	Al >99.00% κ.β.
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg-Si
7xxx	Zn
8xxx	Li και άλλα στοιχεία
9xxx	Δεν χρησιμοποιούνται προς το παρόν

**Πίνακας 2 :** Κωδικοποίηση χυτών κραμάτων αλουμινίου

ΣΕΙΡΑ ΧΥΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ	ΚΥΡΙΑ ΚΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΘΗΚΗ
1xx.x	Al >99.00% κ.β.
2xx.x	Cu
3xx.x	Si-Cu-Mg
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	Δεν χρησιμοποιούνται
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	Άλλα στοιχεία

Εκτός όμως από την κωδική ονομασία των κραμάτων χρησιμοποιούνται και κάποιοι συμβολισμοί που έπονται αυτής και περιέχουν πληροφορίες για την θερμική προέλευση του κράματος. Αυτοί αποτελούνται από κεφαλαία γράμματα και αριθμούς ανάλογα με την θερμική κατεργασία που έχει προηγηθεί και φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 : Κωδικοποίηση κατεργασιών που έχει υποστεί ένα κράμα αλουμινίου [11]

Συμβολισμός κατεργασίας	Περιγραφή
<b>F</b>	Όπως παρήχθη (As Fabricated)
<b>O</b>	Ανόπτηση
<b>H</b>	Ενδοτράχυνση (μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης)
H1X	Μόνο ενδοτράχυνση (το X συμβολίζει το ποσοστό της ενδοτράχυνσης)
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση (το X συμβολίζει το βαθμό σκλήρυνσης μετά την ανόπτηση)
H3X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία για να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης (το X συμβολίζει το βαθμό σκλήρυνσης πριν τη σταθεροποίηση)
<b>T</b>	Σκλήρυνση μέσω γήρανσης
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, ψυχρή κατεργασία και φυσική γήρανση
T3	Ομογενοποίηση, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση
T4	Ομογενοποίηση, βαφή και φυσική γήρανση
T5	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση σε θερμοκρασία ανώτερη αυτής του περιβάλλοντος
T6	Ομογενοποίηση, βαφή και τεχνική γήρανση σε θερμοκρασία ανώτερη αυτής του περιβάλλοντος
T7	Ομογενοποίηση, βαφή και θερμική κατεργασία σταθεροποίησης
T8	Ομογενοποίηση, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
T9	Ομογενοποίηση, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ
T10	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση
<b>W</b>	Ομογενοποίηση (μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση)

## 2.2.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως και αποτελούν πλέον ένα πολύ χρήσιμο υλικό για την αυτοκινητοβιομηχανία. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό του χαμηλού τους βάρους με ιδιότητες που μπορούν να αποκτήσουν μετά από κατάλληλη επεξεργασία διαμόρφωσης όπως η υψηλή αντοχή τους, η αντοχή τους στη διάβρωση, η ολκιμότητα τους, η επιδεκτικότητα διαμόρφωσής τους («διαμορφωσιμότητά») και η ικανότητά τους να ανακυκλώνονται εύκολα [8].

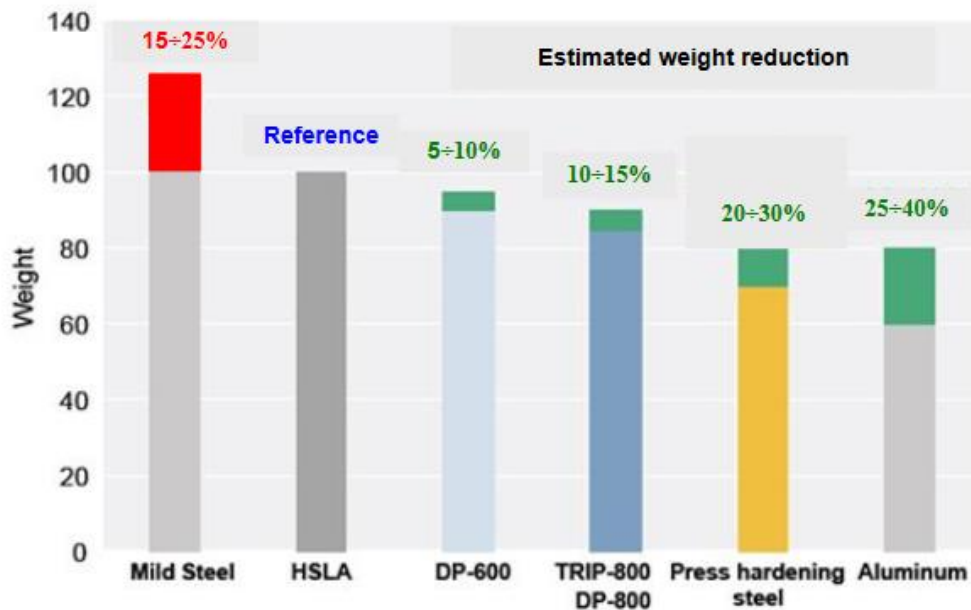
Πιο αναλυτικά, για τις προαναφερθείσες αυτές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- Δυνατότητα ανακύκλωσης : Ένα ποσοστό άνω του 90% του αλουμινίου που υπάρχει σε ένα όχημα μπορεί να ανακτηθεί και να ανακυκλωθεί. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι η ανακύκλωση αυτή μπορεί να εξοικονομήσει έως και 95% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή νέου αλουμινίου [13].
- Υψηλή αντοχή σε συνδυασμό με χαμηλό βάρος : Το αλουμίνιο μπορεί να προσφέρει μια εξαιρετική αναλογία αντοχής-βάρους.
- Θερμικές ιδιότητες : Χάρη στις πολύ καλές θερμικές ιδιότητες του αλουμινίου, καθίσταται δυνατή η εξοικονόμηση μπαταρίας για χρήση στην θέρμανση ή ψύξη της καμπίνας ενός οχήματος.
- Απορρόφηση ενέργειας κρούσης : Μέσω πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι τα κράματα αλουμινίου έχουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται ώστε να απορροφάται η κινητική ενέργεια από μια κρούση [3]. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι τα κράματα αλουμινίου μπορούν να απορροφήσουν έως και τη διπλάσια ενέργεια κρούσης σε σύγκριση με τον χάλυβα και επίσης μπορεί να προβλεφθεί ευκολότερα η παραμόρφωσή του [13]. Αυτή η ιδιότητα, λοιπόν, καθιστά τα οχήματα αρκετά πιο ασφαλή, αφού η ενέργεια της κρούσης περιορίζεται στα εξωτερικά μέρη και μόνο ένα ποσοστό αυτής καταφέρνει να επηρεάσει την καμπίνα των επιβατών τους.
- Επίδοση : Με τη χρήση τέτοιων υλικών αυξάνεται επίσης σημαντικά και η επίδοση του οχήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να επιταχύνει ευκολότερα, να σταματάει πιο

άμεσα [13]. Επίσης λόγω του χαμηλότερου βάρους παρατηρείται και μικρότερη φθορά στα διάφορα εξαρτήματά του [14].

- Αντίσταση στη διάβρωση : Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τη δημιουργία ενός προστατευτικού οξειδίου (οξείδιο του αλουμινίου) τα κράματα του αλουμινίου παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Συγκριτικά με τους διαφόρους τύπους χάλυβα, τα κράματα αλουμινίου έχουν μεγαλύτερο κόστος αλλά η εμφανώς μεγαλύτερη δυνατότητα μείωσης του βάρους χάρη στα κράματα αλουμινίου τα καθιστούν πολύ ανταγωνιστικά υλικά που σταδιακά τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για χρήσεις στην αυτοκινητοβιομηχανία. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, τα κράματα αλουμινίου έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν το βάρος ενός οχήματος από 25 έως και 40% σε σύγκριση με τους HSLA χάλυβες [12].



**Σχήμα 2 :** Σύγκριση δυνατότητας μείωσης βάρους διαφόρων τύπων χάλυβα και κραμάτων αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία [12].

Σε γενικές γραμμές ένα σύγχρονο όχημα περιέχει ένα μεγάλο ποσοστό αλουμινίου και μάλιστα αυτό συναντάται σε ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων από τον κινητήρα και

τις αναρτήσεις μέχρι το αμάξωμα και τα εξωτερικά πάνελ είτε σε μορφή διαμορφωμένων κραμάτων (φύλλα αλουμινίου, προϊόντα διέλασης) είτε σε μορφή χυτών κραμάτων [3].

Τα χυτά κράματα αποτελούν το 80% του αλουμινίου που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία συνολικά και συναντάται κυρίως στο σύστημα των αναρτήσεων, στο σύστημα μετάδοσης, στο διαφορικό και στον κινητήρα και στους κυλίνδρους [3].

Παρ' όλα αυτά, το ποσοστό των προϊόντων διέλασης τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά, αφού παρέχει τη δυνατότητα να παράγονται προϊόντα με περίπλοκα σχήματα και δομές. Προϊόντα διέλασης αλουμινίου χρησιμοποιούνται σε τμήματα του σασί, στον προφυλακτήρα, στον σκελετό των οχημάτων και γενικότερα σε σημεία που επιδιώκεται η απορρόφηση της ενέργειας κρούσης. Οι κυριότερες σειρές κραμάτων που χρησιμοποιούνται για εξαρτήματα διέλασης είναι οι 6xxx (Al-Mg-Si) και 7xxx (Al-Zn-Mg) [3].

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4) παρουσιάζονται μερικά συγκεκριμένα παραδείγματα των δημοφιλέστερων κραμάτων αλουμινίου και δίνονται πληροφορίες σχετικά με τις χρήσεις τους στην αυτοκινητοβιομηχανία.

**Πίνακας 4 :** Εφαρμογές κραμάτων αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία [15,16]

<b>Κωδικός κράματος</b>	<b>Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία</b>
<b>2024</b>	Κύλινδροι, πιστόνια, τροχοί, φρένα, κιβώτιο ταχυτήτων (μεγάλη αντοχή σε κόπωση)
<b>3003</b>	Πάνελς (υψηλή αντοχή και καλή επιδεκτικότητα σε διαμόρφωση)
<b>3105</b>	Φτερά, πόρτες, πάνελς (εξαιρετική αντιδιαβρωτική ικανότητα και επιδεκτικότητα σε διαμόρφωση)
<b>4032</b>	Πιστόνια, στοιχεία κινητήρα (καλή επιδεκτικότητα σε συγκόλληση)
<b>5205</b>	Δεξαμενές καυσίμου, εξαρτήματα αναρτήσεων, βραχίονες, φρένα
<b>5083</b>	Βάση κινητήρα, πάνελς
<b>5182</b>	Βραχίονες, πόρτες, καπό, μπροστινό φτερό αγωνιστικών μονοθεσίων
<b>6016</b>	Πόρτες, πορτ-μπαγκάζ, φτερά, πάνελς
<b>6061</b>	Φρένα, τροχοί (εξαιρετικά επιφανειακά χαρακτηριστικά φινιρίσματος, υψηλή αντοχή και αντοχή στη διάβρωση)
<b>6181</b>	Εξωτερικά πάνελς που απαιτούν υψηλή αντοχή και επιδεκτικότητα σε διαμόρφωση
<b>7003</b>	Ενίσχυση προφυλακτήρα, προστατευτικές δοκοί, τροχοί
<b>7075</b>	Προστατευτικοί δοκοί, ζώνες ασφαλείας (πολύ υψηλή αντοχή)

### 2.2.2 ΣΕΙΡΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6XXX

Τα κράματα της σειράς αυτής παρουσιάζουν έναν αρκετά ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ διαφόρων ιδιοτήτων, όπως είναι η μηχανική αντοχή, η αντιδιαβρωτική ικανότητα, η επιδεκτικότητα σε διαμόρφωση και συγκόλληση. Για τον λόγο αυτό, τα κράματα αυτά βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε πολλά πεδία της βιομηχανίας, όπως στην αεροναυπηγική, σε ηλεκτρονικές συσκευές και φυσικά στην αυτοκινητοβιομηχανία [22].

Οι κύριες κραματικές προσθήκες στη σειρά αυτή είναι το μαγνήσιο (Mg) και το πυρίτιο (Si). Σύμφωνα με μελέτες που έχουν διεξαχθεί [20] η καταλληλότερη αναλογία μαγνησίου/πυριτίου για τον σχηματισμό της κύριας φάσης κατακρήμισης  $Mg_2Si$ , είναι 1.73. Καθώς για την χύτευση αυτής της σειράς κραμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος “Direct Chill casting”, υπάρχει περίπτωση να απαιτηθεί η παρουσία επιπλέον μαγνησίου ή πυριτίου. Στην περίπτωση που το μαγνήσιο είναι περισσότερο, τότε αυξάνεται η αντοχή στη διάβρωση και μειώνονται η αντοχή και η επιδεκτικότητα σε διαμόρφωση. Όταν το πυρίτιο είναι περισσότερο τότε συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή αυξάνονται η αντοχή και η επιδεκτικότητα σε διαμόρφωση και μειώνεται η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά του κράματος [20].

Τα κραματικά στοιχεία αυτά μόλις βρεθούν στις κατάλληλες συνθήκες, για παράδειγμα στην κατάλληλη αναλογία Mg/Si, τότε με την αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να αυξηθεί η διαλυτότητα τους στο στερεό διάλυμα του αλουμινίου. Ως επακόλουθο, δίνεται η δυνατότητα της αύξησης της αντοχής και της βελτιστοποίησης των ιδιοτήτων των κραμάτων της σειράς αυτής μέσω θερμικών κατεργασιών όπως η διαλυτοποίηση, η βαφή και η γήρανση. Επομένως, μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των κατεργασιών αυτών μπορούν να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του υλικού [21].

Εκτός από τις κύριες κραματικές προσθήκες, συνηθίζεται να προστίθενται και άλλα στοιχεία σε μικρότερες όμως ποσότητες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο χαλκός (Cu), ο οποίος προστίθεται για να βελτιώσει την κινητική της κατακρήμισης, αν και σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μπορεί να επηρεάσει την αντιδιαβρωτική ικανότητα του υλικού [23]. Άλλα στοιχεία όπως το Χρώμιο (Cr), το Μαγγάνιο (Mn),

το Ζιρκόνιο (Zr) και το Σκάνδιο (Sc) παρεμποδίζουν τους μηχανισμούς αποσκλήρυνσης κατά την παραμόρφωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο όσον αφορά τις μηχανικές και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες των κραμάτων [20]. Απ' την άλλη, ο σίδηρος (Fe) μπορεί να αποδειχτεί επιζήμιος για τις ιδιότητες των κραμάτων 6xxx, αλλά μπορεί να αναχαιτιστεί με την προσθήκη χρωμίου (Cr) και κυρίως μαγγανίου (Mn). Τέλος, το Βόριο (B) και το Τιτάνιο (Ti) βοηθούν στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων και κατ' επέκταση στη σκλήρωση στα όρια αυτών [20].

### **2.3 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΣΕΙΡΑΣ 6XXX**

Γενικότερα ισχύει ότι αμέσως μετά τη χύτευση των κραμάτων της σειράς αυτής, τα στάδια που ακολουθούν είναι η ομογενοποίηση, η θερμή ή ψυχρή μορφοποίηση, η ανόπτηση και τέλος η φυσική ή τεχνητή γήρανση [24]. Ωστόσο, στα προϊόντα διέλασης συνηθίζεται αφού ομογενοποιηθούν και μορφοποιηθούν να λαμβάνει χώρα μια διεργασία διαλυτοποίησης και βαφής αμέσως πριν την επερχόμενη γήρανσή τους. Επομένως, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας ειδικότερα, όπου το μελετώμενο υλικό είναι στη μορφή προφίλ αλουμινίου από διέλαση κράματος 6063, πριν λάβει χώρα η γήρανση, θα πραγματοποιηθεί διεργασία διαλυτοποίησης και στη συνέχεια βαφή στα ήδη παραμορφωμένα δοκίμια.

#### **2.3.1 ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ**

Αρχικά, ακριβώς πριν τη διέλαση συνηθίζεται να λαμβάνει χώρα μια διεργασία ομογενοποίησης, όπου το υλικό θερμαίνεται συνήθως από 8 έως 24 ώρες για να κατανεμηθούν ομοιόμορφα οι φάσεις στη μικροδομή του αλουμινίου. Η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η ομογενοποίηση είναι από 450 °C έως 600°C [46]. Έτσι κατά τη διάρκεια της διέλασης το υλικό θα βρίσκεται σε κατάσταση στερεού διαλύματος και έτσι θα μπορέσει να αποκτήσει την επιθυμητή υψηλή αντοχή [29].

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την ομογενοποίηση είναι ή διαλυτοποίηση της φάσης  $Mg_2Si$  που σχηματίστηκε κατά τη χύτευση του κράματος και ο περιορισμός του μικροδιαφορισμού, καθώς και ο μετασχηματισμός της φάσης β



(AlFeSi) σε α (Al(FeMn)Si). Έτσι κατά τη διάρκεια της διέλασης το υλικό θα βρίσκεται σε κατάσταση στερεού διαλύματος και έτσι θα μπορέσει να αποκτήσει την επιθυμητή υψηλή αντοχή [29].

### 2.3.2 ΔΙΕΛΑΣΗ

Τα προφίλ αλουμινίου, όπως και αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, παράγονται μέσω της διεργασίας της διέλασης και γι' αυτόν το λόγο αξίζει να αναφερθούν ορισμένα χαρακτηριστικά της.

Η διέλαση είναι μια διεργασία μορφοποίησης κατά την οποία ένα κομμάτι μετάλλου εισέρχεται και εξαναγκάζεται να διέλθει μέσα από μήτρα συγκεκριμένης διατομής ανάλογα με το σχήμα του επιθυμητού τελικού προϊόντος [35]. Η διέλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ, όμως επικρατέστερη είναι η εν θερμώ λόγω των μεγάλων δυνάμεων που ασκούνται κατά τη διάρκειά της. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί πως αυτή η μέθοδος μορφοποίησης χρησιμοποιείται κυρίως όταν το τελικό επιθυμητό προϊόν επιδιώκεται να έχει αρκετά περίπλοκη διατομή (όπως για παράδειγμα τα εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας) [35].

### 2.3.3 ΔΙΑΛΥΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η διεργασία της διαλυτοποίησης είναι μια θερμική κατεργασία κατά την οποία το κράμα θερμαίνεται στην θερμοκρασία διαλυτοποίησης και διατηρείται σε αυτήν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι τα κραματικά στοιχεία να βρίσκονται πλήρως σε στερεό διάλυμα [27]. Για τα κράματα αλουμινίου η θερμοκρασία διαλυτοποίησης συνηθίζεται να είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας solvus, δηλαδή θα πρέπει να είναι από 480 °C έως 580°C και ο χρονική διάρκεια της θερμικής κατεργασίας αυτής θα πρέπει να είναι από 30 έως 60 λεπτά αναλόγως με το πάχος των δοκιμίων [12].

Στο ξεκίνημα αυτής της διεργασίας τα κραματικά στοιχεία βρίσκονται ενωμένα μεταξύ τους σε συμπλέγματα που ονομάζονται κατακρημνίσματα. Η παρουσία αυτών των κατακρημνισμάτων αυξάνει τη μηχανική αντοχή του κράματος αλλά ταυτόχρονα μειώνει την ολκιμότητα του. Αυτό πρακτικά συμβαίνει επειδή τα κατακρημνίσματα

στην αρχή της διαλυτοποίησης έχουν υψηλές συγκεντρώσεις κραματικών στοιχείων και φέρουν διάφορα σχήματα με αποτέλεσμα να αποτελούν εμπόδιο στη ροή του υλικού κατά τη διαμόρφωση [27].

Κατά τη διαλυτοποίηση, τα κατακρημνίσματα διαχέονται σε όλο το υλικό και τα εμπόδια στη ροή του υλικού μειώνονται, άρα, συνεπώς, η ολκιμότητα του κράματος αυξάνεται. Διατηρώντας, το υλικό στη θερμοκρασία διαλυτοποίησης για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα, οδηγεί σε μείωση των εναπομειναντων τάσεων και των ασυνήθιστων κατακρημνισμάτων (irregular precipitates), παρέχοντας μια πιο ομογενή μικροδομή σε ολόκληρο το υλικό και καθιστώντας το πιο διαμορφώσιμο [27].

Καθώς η διεργασία προχωρά, περαιτέρω διάχυση των κραματικών στοιχείων λαμβάνει χώρα, οι διάφορες φάσεις διαλύονται περισσότερο και επίσης τα γωνιώδη αδιάλυτα σωματίδια στρογγυλεύονται, βελτιώνοντας ακόμη περισσότερο την ολκιμότητα και μειώνοντας τα κενά [27].

Ο ρυθμός της διάλυσης των σωματιδίων είναι ανάλογος της θερμοκρασίας διαλυτοποίησης, η οποία συνήθως επιλέγεται να είναι πολύ κοντά στη θερμοκρασία solidus, χωρίς όμως ποτέ να την ξεπεράσει, διότι αυτό εμπεριέχει το ρίσκο να λιώσει τοπικά το υλικό και συνεπώς, να υπάρξουν μη επιθυμητές συνέπειες στη μικροδομή. Όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο για τη διεργασία αυτή, αυτός πρέπει να είναι επαρκής ώστε να γίνει η διάχυση των φάσεων και εξαρτάται από το ρυθμό διαλυτοποίησης των κραματικών στοιχείων [27].

#### **2.3.4 ΒΑΦΗ**

Η βαφή είναι μια κατεργασία κατά την οποία το υλικό, το οποίο έχει υποστεί μια θερμική κατεργασία και βρίσκεται σε μια υψηλή θερμοκρασία (για παράδειγμα αμέσως μετά τη διαλυτοποίηση), ψύχεται είτε ακαριαία. Ο σκοπός αυτής της ακαριαίας ψύξης, στη συγκεκριμένη περίπτωση σε θερμοκρασία δωματίου, είναι να διατηρηθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η κατάσταση του υπέρκορου στερεού διαλύματος που έχει δημιουργηθεί κατά τη διαλυτοποίηση [27].

Αυτή, η απότομη ψύξη δηλαδή, οδηγεί στην παρεμπόδιση της κατακρήμνισης των κραματικών στοιχείων και στη διατήρηση των κενών και της διασποράς των φάσεων που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Έτσι, επιτυγχάνεται το υπέρκορο

στερεό διάλυμα του αλουμινίου με το μαγνήσιο και το πυρίτιο και των λοιπών κραματικών στοιχείων στη θερμοκρασία περιβάλλοντος [24]. Τα κενά που αναφέρθηκαν έχουν δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια της διαλυτοποίησης και ουσιαστικά διατηρούνται με την βαφή ώστε να υποβοηθήσουν στον σχηματισμό των κατακρημνισμάτων που θα ακολουθήσει στο στάδιο της γήρανσης [28].

### 2.3.5 ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Το τελικό στάδιο της κατεργασίας των προϊόντων διέλασης αλουμινίου, κατά το οποίο πραγματοποιείται και σημαντική αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής, είναι η γήρανση ή αλλιώς σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης. Όταν η γήρανση λαμβάνει χώρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο βάθος ενός χρονικού διαστήματος που μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ώρες μέχρι και μήνες χωρίς κάποια ανθρώπινη παρέμβαση ονομάζεται φυσική γήρανση, ενώ όταν πραγματοποιείται σε κάποια υψηλότερη θερμοκρασία για διάστημα από μερικά λεπτά μέχρι μερικές ώρες γίνεται λόγος για τεχνητή γήρανση. Πολλές φορές υπάρχει περίπτωση να χρησιμοποιηθεί ακόμα και συνδυασμός φυσικής και τεχνητής γήρανσης για να επιτευχθεί ακόμα καλύτερο αποτέλεσμα. Το πόσο επιτυχής θα είναι όμως η αύξηση της σκληρότητας και της μηχανικής αντοχής εξαρτάται από τον αριθμό το σχήμα, το μέγεθος και την κατανομή των κατακρημνισμάτων [28]. Μεγάλης σημασίας είναι επίσης και η χρονική διάρκεια της γήρανσης, διότι έχει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των τελικών βέλτιστων ιδιοτήτων [38].

Επομένως, η γήρανση είναι μια διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες μεταβάλλονται συνεχώς [40]. Ο μηχανισμός της στηρίζεται στη δημιουργία κατακρημνισμάτων, τα οποία φέρουν αντίσταση στην κίνηση των διαταραχών, διότι έχουν διαφορετική δομή από το μητρικό πλέγμα και αυξημένη σκληρότητα. Έτσι τα κατακρημνίσματα δεν μπορούν να τμηθούν από τις διαταραχές και όσο πιο πυκνή είναι η διασπορά των φάσεων αυτών τόσο πιο επιτυχημένη είναι η σκλήρυνση του υλικού [41].

Αναλυτικότερα, λοιπόν, η δυνατότητα της αύξησης της σκληρότητας και της μηχανικής αντοχής μέσω της γήρανσης εξαρτάται από το πόσο αυξάνεται η διαλυτότητα του μαγνησίου και του πυριτίου στο πλέγμα του αλουμινίου με αύξηση της θερμοκρασίας [22]. Το υπέρκορο στερεό διάλυμα είναι εκείνο που θα συμβάλλει στην δημιουργία κενών τα οποία απαιτούνται για να ξεκινήσει η κατακρήμνιση.

Έτσι, ξεκινώντας η διεργασία της γήρανσης, αρχικά το πυρίτιο ξεκινά να σχηματίζει συμπλέγματα με τα άτομα του μαγνησίου, τα οποία με την πάροδο του χρόνου θα μετατραπούν στις ζώνες Guiner – Preston (GP zones). Αυτές οι ζώνες είναι διατεταγμένες συστοιχίες ατόμων με σφαιρικό σχήμα στο πλέγμα του αλουμινίου και προκαλούν σημαντική αύξηση της αντοχής [24]. Αυτή η φάση κατά την πορεία της γήρανσης θα αποτελέσει θέση πυρηνοποίησης για τις φάσεις που θα δώσει τη θέση της [39], δηλαδή, στις μετασταθείς φάσεις συνοχής β'' ( $Mg_5Si_6$ ), ημι-συνοχής β' ( $Mg_{1.8}Si$ ) και τέλος στη φάση ισορροπίας β ( $Mg_2Si$ ) οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνες για την αύξηση στη σκληρότητα του υλικού [24]. Συγκεκριμένα αναφέρεται πως τα κατακρημνίσματα της φάσης β'' που φέρουν βελονοειδή μορφή αποτελούν το καλύτερο δυνατό εμπόδιο στις διαταραχές και παρέχουν τη μέγιστη σκληρότητα [37].

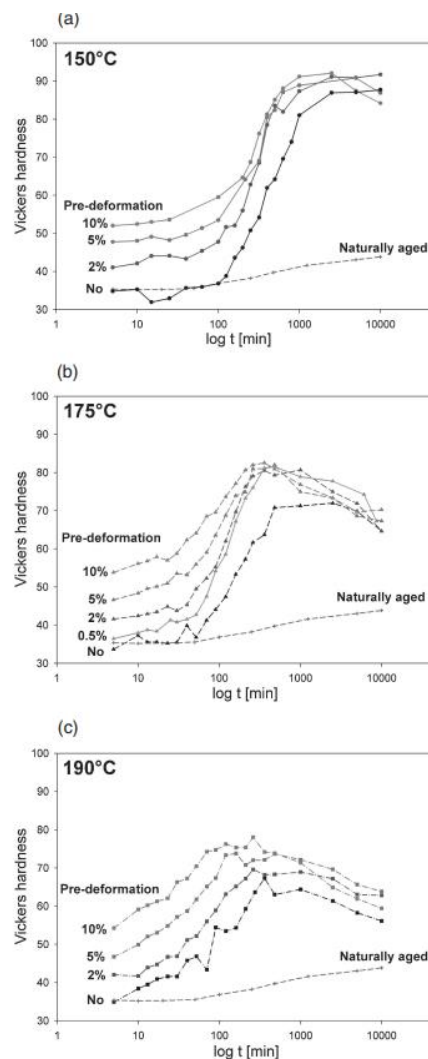
Τέλος, εάν το κράμα παραμείνει για παραπάνω χρόνο από όσο χρειάζεται σε θερμοκρασία γήρανσης, θα βρεθεί σε κατάσταση υπεργήρανσης και τότε θα ξεκινήσει ο σχηματισμός της β' φάσης, η οποία είναι υπεύθυνη για τη μείωση της σκληρότητας του υλικού [36].

### **2.3.5.1 Επίδραση αρχικών παραμορφώσεων στη γήρανση**

Ένα φαινόμενο που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα είναι η επίδραση της αρχικής παραμόρφωσης στην απόκριση του υλικού στη γήρανση. Πιο συγκεκριμένα, στα κράματα που μελετήθηκαν από τους Kolar, Pedersen et al [25] (σειράς δxxx), τα οποία είχαν αρχικές παραμορφώσεις και υποβλήθηκαν σε τεχνητή γήρανση στους 190 °C παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης αντοχής και μείωση του χρόνου επίτευξης αυτής (200 λεπτά για δοκίμιο με 10% παραμόρφωση σε σύγκριση με 300 λεπτά για δοκίμιο χωρίς παραμόρφωση). Οι παραπάνω ερευνητές αποδίδουν το φαινόμενο αυτό στο συνδυασμό της ενδοτράχυνσης με τη σκλήρυνση μέσω

κατακρήμνισης και επισημαίνουν την άμεση επίδραση των παραμορφώσεων που προηγούνται καθώς και του χρόνου της γήρανσης σε αυτές.

Οι ίδιοι ερευνητές στην έρευνα τους για το κράμα 6060 [17], κατέληξαν στο ότι παρόλο που το κράμα παρουσίασε περίπου την ίδια μέγιστη σκληρότητα έπειτα από τεχνητή γήρανση στους 150°C και στους 175°C, στην δεύτερη περίπτωση η μέγιστη τιμή επιτεύχθηκε σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Επίσης, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι τα δοκίμια που έφεραν παραμορφώσεις, παρουσίασαν μεγαλύτερη μέγιστη τιμή σκληρότητας (Σχήμα 3).



**Σχήμα 3 :** Αποτελέσματα μετρήσεων σκληρότητας έπειτα από διάφορες συνθήκες γήρανσης στην μελέτη των Kolar, Pedersen et al [17].

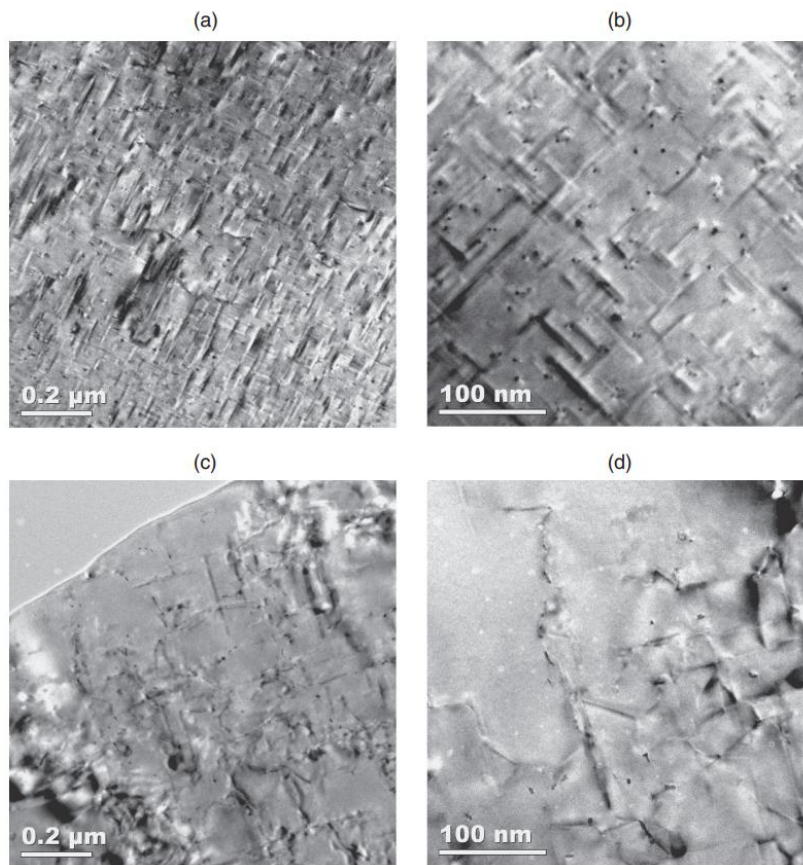
Σε άλλη έρευνα των Kolar, Pedersen et al [26] τονίζεται πως αυτές οι εξέχουσες μηχανικές ιδιότητες που προκύπτουν από τη γήρανση δοκιμίων με αρχική

παραμόρφωση, οφείλουν την ύπαρξή τους στην ταχεία κατακρήμνιση ενός πυκνού δικτύου σχετικά μικρών κατακρημνισμάτων, τα οποία μπορούν να γίνουν διακριτά και στο Σχήμα 4. Επιπλέον, καταλήγουν στο συμπέρασμα πως οι ιδανικές συνθήκες γήρανσης με σκοπό την επίτευξη του βέλτιστου δυνατού αποτελέσματος ως προς τη σκληρότητα και τη μηχανική αντοχή είναι στη θερμοκρασία των 175°C για χρονικό διάστημα το πολύ έως 100 λεπτά και για δοκίμια με παραμόρφωση 10%.

Ακόμη, σε μια άλλη μελέτη [32] που αφορούσε το κράμα 6111 παρατηρήθηκε αύξηση της μηχανικής αντοχής που ήταν ανάλογη με της αύξησης της αρχικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης και το φαινόμενο αποδόθηκε στην αλληλεπίδραση των ασυνεχειών με τις ζώνες GP.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα φύλλα αλουμινίου, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την αύξηση της σκληρότητας από 72HV σε 90HV έπειτα από γήρανση στις ίδιες συνθήκες αλλά με 0% και 5% παραμόρφωση αντίστοιχα [34]. Η εξήγηση του φαινομένου αποδίδεται στα σημεία ετερογενούς πυρηνοποίησης που υποβοηθούν την γρήγορή ανάπτυξη των ζωνών GP1 που γρήγορα θα μετατραπούν στη β' φάση, η κατακρήμνιση της οποίας επιταχύνεται [34].

Τέλος, επιβεβαιώνεται και από τους Dutkiewicz και Litynska [33] ότι κατά τη γήρανση παραμορφωμένου υλικού, τα κατακρημνίσματα εντοπίζονται κυρίως κατά μήκος των ασυνεχειών και η πυκνότητά τους αυξάνεται ανάλογα με τον βαθμό παραμόρφωσης.



**Σχήμα 4 :** Μικρογραφίες στο TEM όπου απεικονίζουν στα (a),(b) τα κατακρημνίσματα που υπάρχουν στο κράμα AA6060 έπειτα από γήρανση στους 190°C για 300 λεπτά, με μηδενική παραμόρφωση και στα (c), (d) με παραμόρφωση 10% [17].

## 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

### 3.1 ΜΕΛΕΤΩΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ

Το υλικό που μελετήθηκε στην εργασία αυτή είναι ελαφρύ κράμα αλουμινίου της σειράς 6xxx και συγκεκριμένα είναι το κράμα 6063. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κόπηκαν από το πλευρικό τοίχωμα προφίλ κράματος αλουμινίου 6063. Η χημική σύσταση του κράματος φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5 : Τυπική χημική σύσταση κράματος 6063 [44].

Χημικό Στοιχείο	Ποσοστό
Μαγγάνιο (Mn)	0 - 0,10
Σίδηρος (Fe)	0 - 0,35
Μαγνήσιο (Mg)	0,45 - 0,90
Πυρίτιο (Si)	0,20 - 0,60
Ψευδάργυρος (Zn)	0 - 0,10
Τιτάνιο (Ti)	0 - 0,10
Χρώμιο (Cr)	0 - 0,10
Χαλκός (Cu)	0 - 0,10
Άλλα (σύνολο)	0 - 0,15
Αλουμίνιο	Υπόλοιπο

### 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### 3.2.1 ΚΟΠΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Από τα προφίλ αλουμινίου που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο αποκόπηκε το πλευρικό τους τοίχωμα και στη συνέχεια από αυτό το τοίχωμα αποκόπηκαν 16 δοκίμια εφελκυσμού. Η επιλογή του αριθμού των δοκιμίων βασίζεται στο ότι θα δημιουργηθούν 4 ομάδες δοκιμίων με 4 διαφορετικούς βαθμούς παραμόρφωσης (0%, 2%, 5%, 10%), ώστε να επιτευχθεί τεχνητή γήρανση σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες (150, 180, 210°C), καθώς και φυσική γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κοπή των προφίλ πραγματοποιήθηκε σε πριονοκορδέλα “Ergonomic 230.190” της εταιρίας Bomar όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, ενώ η κοπή των δοκιμίων εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε σε πρέσα δοκιμίων εφελκυσμού, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 6.





**Σχήμα 5:** Κοπή δοκιμίων από τα προφίλ αλουμινίου με χρήση της πριονοκορδέλας Ergonomic 230.190.



**Σχήμα 6:** Κοπή δοκιμίων εφελκυσμού με τη χρήση της πρέσας δοκιμίων εφελκυσμού

### 3.2.2 ΔΙΑΛΥΤΟΠΟΙΗΣΗ-ΒΑΦΗ

Όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν μέσα σε φούρνο ανόπτησης για χρονικό διάστημα μιας 1 ώρας σε θερμοκρασία 560 °C ώστε να πραγματοποιηθεί η διεργασία της διαλυτοποίησης και να βρεθούν τα συστατικά στοιχεία του κράματος σε κατάσταση στερεού διαλύματος. Μόλις αυτή ολοκληρώθηκε έλαβε χώρα βαφή σε νερό που βρισκόταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έτσι ώστε αυτή η μικροδομή που απέκτησαν τα δοκίμια να μπορέσει να διατηρηθεί και σε θερμοκρασία δωματίου (Σχήμα 7,8).



Σχήμα 7 : Διεργασία διαλυτοποίησης των δοκιμίων



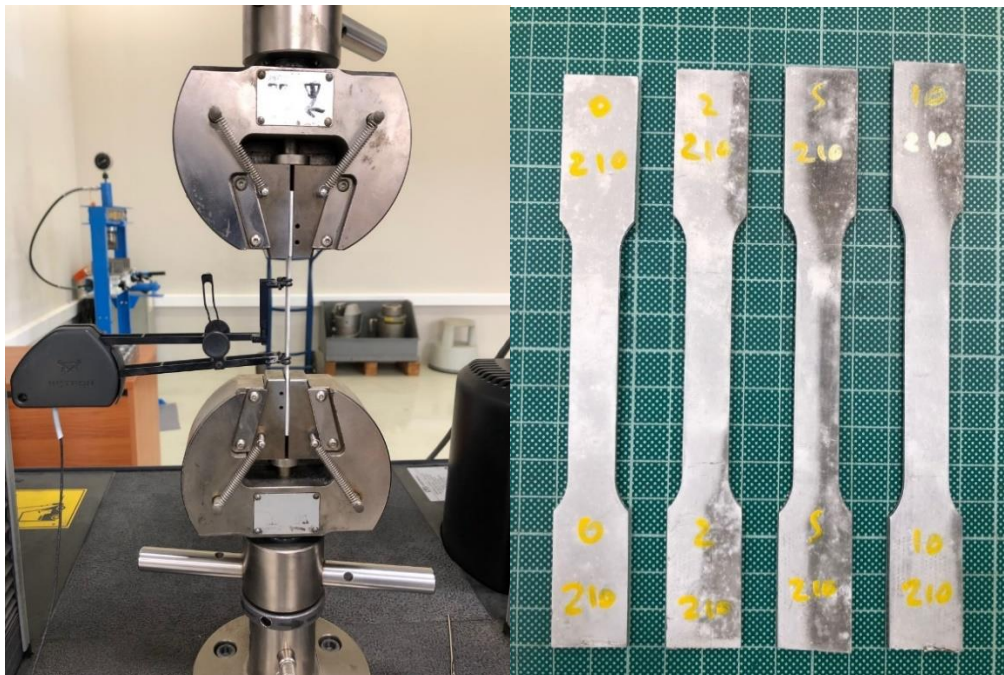
Σχήμα 8 : Διεργασία βαφής των δοκιμίων

### 3.2.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Αφού ολοκληρώθηκαν τα προηγούμενα στάδια, ακολούθησε το στάδιο των παραμορφώσεων. Επιλέχθηκαν 12 από τα 16 δοκίμια για να υποστούν διαφορετικού βαθμού παραμορφώσεις σε μηχανή εφελκυσμού (Σχήμα 9). Πιο αναλυτικά:

- 4 δοκίμια υπέστησαν παραμόρφωση 2%
- 4 δοκίμια υπέστησαν παραμόρφωση 5%
- 4 δοκίμια υπέστησαν παραμόρφωση 10%.

Επιπλέον, 4 δοκίμια διατηρήθηκαν με 0% παραμόρφωση για να μπορέσει να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ παραμορφωμένων και μη δοκιμίων.



Σχήμα 9 : Αριστερά: Παραμόρφωση των δοκιμίων στη μηχανή εφελκυσμού. Δεξιά: Επιμηκυσμένα δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της διεργασίας.

### 3.2.4 ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Αρχικά, όλα τα δοκίμια μετά το πέρας της βαφής παρέμειναν για 24 ώρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έπειτα, στο φούρνο ανόπτησης των εγκαταστάσεων της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. πραγματοποιήθηκε η διεργασία της τεχνητής γήρανσης (Σχήμα 10) για τα 12 δοκίμια καθώς τα υπόλοιπα 3 υπέστησαν μόνο φυσική γήρανση. Επιλέχθηκαν 3 διαφορετικές θερμοκρασίες τεχνητής γήρανσης (150°C, 180°C, 210°C) και 3 διαφορετικοί χρόνοι (10, 100, 600 λεπτά). Αναλυτικά, ο αριθμός των δοκιμίων και οι διαφορετικές συνθήκες της γήρανσης φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακες 6,7.



**Σχήμα 10 :** Τεχνητή γήρανση δοκιμίων στο φούρνο ανόπτησης των εγκαταστάσεων της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.

**Πίνακας 6 :** Αριθμός δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν και ονοματολογία τους

	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>
<b>NA</b>	Φ1	Φ2	Φ3 (δεν χρησιμοποιήθηκε)	Φ4
<b>150°C</b>	T1	T2	T3	T4
<b>180°C</b>	T5	T6	T7	T8
<b>210°C</b>	T9	T10	T11	T12



Αξίζει να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό πως για τους σκοπούς της οπτικής μικροσκοπίας θα χρησιμοποιηθεί διαφορετική ονοματολογία στα δείγματα, καθώς οι διαφορετικοί χρόνοι γήρανσης επιτάσσουν μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων.

**Πίνακας 7 :** Διαφορετικές συνθήκες τεχνητής γήρανσης

	10min	100min	600min
150°C	T1,T2,T3,T4	T1,T2,T3,T4	T1,T2,T3,T4
180°C	T5,T6,T7,T8	T5,T6,T7,T8	T5,T6,T7,T8
210°C	T9,T10,T11,T12	T9,T10,T11,T12	T9,T10,T11,T12

Όλα τα δοκίμια μετά το τέλος των πρώτων 10 λεπτών τεχνητής γήρανσης κόπηκαν στη μέση, ώστε να κρατηθεί ένα κομμάτι για μελέτη στο οπτικό μικροσκόπιο μετά την πάροδο μόνο των 10 λεπτών. Έτσι τα μισά τμήματα των δοκιμών παρέμειναν έξω από το φούρνο ανόπτησης από τα 10 λεπτά και μετά ενώ τα υπόλοιπα μισά τμήματα συνέχισαν τη διεργασία μέχρι την πάροδο των 100 λεπτών (χωρίς να αποκοπεί κάποιο τμήμα για μελέτη στο οπτικό μικροσκόπιο) και τελικά των 600 λεπτών.

Οι παραπάνω συνθήκες γήρανσης επιλέχθηκαν, ώστε να μπορέσει να γίνει μια επαρκής και σωστή σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και ως επακόλουθο να γίνει πλήρως αντιληπτή η επίδραση της σκλήρωσης με κατακρήμνιση στη σκληρότητα του υλικού αλλά. Επίσης, σκοπός είναι να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες συνθήκες γήρανσης λαμβάνοντας υπόψιν πάντα τον παράγοντα της αρχικής παραμόρφωσης. Αυτό θα έρθει σε πέρας μέσω των σκληρομετρήσεων και της οπτικής μικροσκοπίας που θα αναφερθούν στις επόμενες παραγράφους.

### 3.2.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της γήρανσης στη σκληρότητα των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σκληρομέτρησης κατά Vickers στο σκληρόμετρο Struers Duramin-40 (Σχήμα 11) που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.

Η σκληρότητα μετρήθηκε σε όλα τα δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της κάθε συνθήκης τεχνητής γήρανσης, που βρίσκεται στον Πίνακα 7 και ανά τακτά χρονικά διαστήματα όσον αφορά στα δοκίμια της φυσικής γήρανσης και φαίνεται στον Πίνακα 8.



Σχήμα 11 : Σκληρόμετρο Struers Duramin-40 στις εγκαταστάσεις της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε.

Πίνακας 8 : Συνθήκες φυσικής γήρανσης στις οποίες μετρήθηκε η σκληρότητα

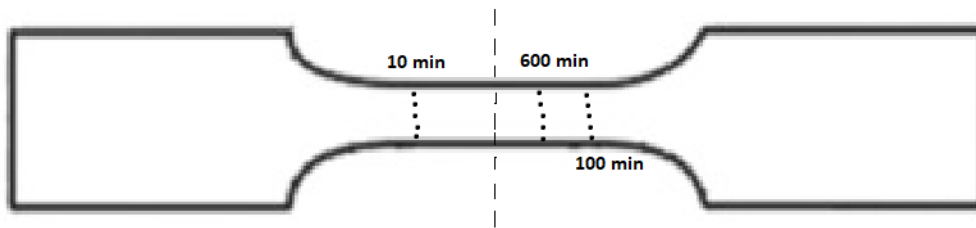
	0 days	2 days	7 days	15 days	44 days
RT	Φ1, Φ2, Φ4	Φ1, Φ2, Φ4	Φ1, Φ2, Φ4	Φ1, Φ2, Φ4	Φ1, Φ2, Φ4

Κατά την τεχνική χαρακτηρισμού της σκληρότητας κατά Vickers, μια πυραμίδα από διαμάντι με γωνία κορυφής  $\alpha = 136^\circ$  και τετραγωνική βάση πιέζεται με μια δύναμη  $F$ , ακριβώς επάνω στο σημείο της λειασμένης επιφάνειας του μετάλλου όπου επιδιώκεται να γίνει η μέτρηση. Η σκληρότητα Vickers (HV) δίνεται από τον τύπο:

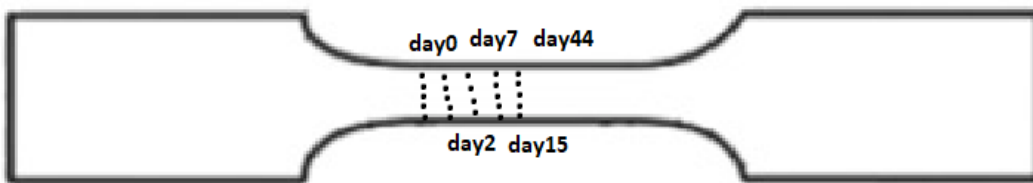
$$HV = 1.8544F/d^2$$

όπου  $d$  η διαγώνιος του τετραγωνικού αποτυπώματος της πυραμίδας [30].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που μελετήθηκε, κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, επιλέχθηκε η δύναμη  $F$  να είναι ίση με 1 Kgf. Επίσης, ο χρόνος παραμονής της πυραμίδας στο δείγμα ήταν 10 δευτερόλεπτα. Σε κάθε συνθήκη γήρανσης, σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις πάνω σε μια ευθεία γραμμή κάθετη στον άξονα του εφελκυσμού (Σχήματα 12,13) έτσι ώστε να εξαχθεί με ασφάλεια ένας μέσος όρος από τις μετρήσεις αυτές.



**Σχήμα 12 :** Σχεδιασμός των σημείων, στα οποία έγιναν οι μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια τεχνητής γήρανσης. (Σχέδιο από το βιβλίο των Jawaid, Thariq et al[31]).



**Σχήμα 13 :** Σχεδιασμός των σημείων, στα οποία έγιναν οι μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια φυσικής γήρανσης. (Σχέδιο από το βιβλίο των Jawaid, Thariq et al[31]).

### 3.2.6 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ

Από τα 15 δοκίμια που υπάρχουν αρχικά, κόπηκαν συνολικά 27 δείγματα για μελέτη στο οπτικό μικροσκόπιο. Αυτός ο αριθμός προκύπτει επειδή υπήρχαν 3 δοκίμια που υπέστησαν φυσική γήρανση και μετά λήφθηκε δείγμα από τα 12 μισά δοκίμια που η γήρανση τους διήρκεσε 10 λεπτά και από τα 12 μισά δοκίμια όπου η γήρανσή τους συνεχίστηκε μέχρι τα 600 λεπτά. Στον πίνακα 9 φαίνεται αναλυτικά η

λίστα με όλα τα δείγματα και την ενδεικτική ονομασία τους για τους σκοπούς της οπτικής μικροσκοπίας.

**Πίνακας 9 :** Ονοματολογία των δειγμάτων που προετοιμάστηκαν για οπτική μικροσκοπία

	Φ.Γ.	Τεχνητή γήρανση 10 λεπτών		
	NA	150οC	180οC	210οC
0%	Φ1	T1-10	T5-10	T9-10
2%	Φ2	T2-10	T6-10	T10-10
5%	-	T3-10	T7-10	T11-10
10%	Φ4	T4-10	T8-10	T12-10
		Τεχνητή γήρανση 600 λεπτών		
		150οC	180οC	210οC
0%		T1-600	T5-600	T9-600
2%		T2-600	T6-600	T10-600
5%		T3-600	T7-600	T11-600
10%		T4-600	T8-600	T12-600

Το πρώτο βήμα της μεταλλογραφικής προετοιμασίας είναι η κοπή των δειγμάτων. Η κοπή τους έγινε παράλληλα στον άξονα του εφελκυσμού παράλληλα στον άξονα της διέλασης όπως δείχνει το Σχήμα 14. Η κοπή έγινε σε πρώτο στάδιο με το ψαλίδι TFS1050-1 της εταιρίας Erppl που βρίσκεται στο Εργαστήριο Μεταλλογραφίας της ΕΛΚΕΜΕ Α.Ε. και εν συνεχεία με το ψαλίδι-γκιλοτίνα.



**Σχήμα 14 :** Κοπή δειγμάτων οπτικής μικροσκοπίας



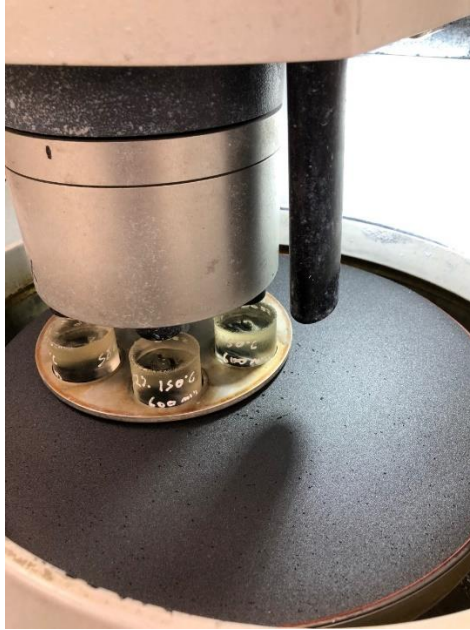
Αφού ολοκληρωθεί η κοπή των δειγμάτων, το επόμενο στάδιο είναι ο εν ψυχρώ και αργής διάρκειας (περίπου 8 ωρών) εγκιβωτισμός τους μέσα σε κυλινδρικά καλούπια με τη χρήση ρητίνης Struers Epofix Resin και σκληρυντή Struers Epofix Hardener για την υποβοήθηση της στερεοποίησης της ρητίνης. Η αναλογία ρητίνης-σκληρυντή που χρησιμοποιήθηκε ήταν 125ml-18ml.



**Σχήμα 15 :** Εγκιβωτισμός των δειγμάτων

Μετά το πέρας του εγκιβωτισμού, τα δείγματα που βρίσκονται στη στερεοποιημένη πλέον ρητίνη, οδηγήθηκαν στη μηχανή λείανσης-στίλβωσης Struers Tegramin-30 για να πραγματοποιηθεί η λείανση και η στίλβωσή τους. Η σκοπιμότητα του σταδίου αυτού είναι δημιουργηθεί μια ομοιόμορφα λειασμένη και καθαρή επιφάνεια η οποία θα μπορέσει να γίνει εύκολα διακριτή στο οπτικό μικροσκόπιο και εν συνεχεία να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα για τη μικροδομή του υλικού.

Η διεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε σε 5 στάδια. Τα 3 πρώτα αφορούσαν την λείανση η οποία έγινε με τη χρήση 3 διαφορετικών χαρτιών λείανσης από καρβίδιο του πυριτίου (SiC) με μέγεθος 220, 500 και 1200 grit (κόκκοι/inch<sup>2</sup>) και για διάρκεια 2 λεπτών. Τα 2 τελευταία στάδια αφορούν τη στίλβωση η οποία έγινε αρχικά με τη χρήση πανιού στίλβωσης και αιωρήματος διαμαντιού Struers DiaPro Mol B3 (3μm) και στο τελικό στάδιο με πανί στίλβωσης chem και το αντίστοιχο αιώρημα διαμαντιού (OP-U). Μετά την ολοκλήρωση των σταδίων της λείανσης αλλά και της στίλβωσης τα δείγματα καθαρίστηκαν με νερό και σαπούνι και επιπλέον με αλκοόλη ενώ το στέγνωμά τους έγινε με ρεύμα θερμού αέρα.

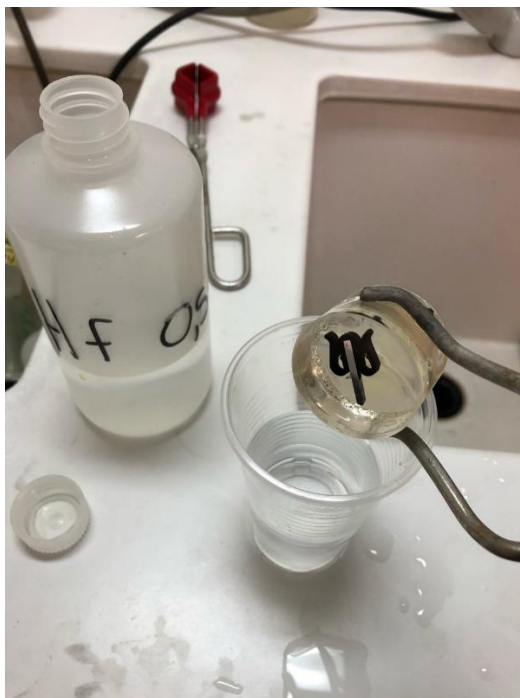


**Σχήμα 16 :** Λείανση των εγκιβωτισμένων δειγμάτων

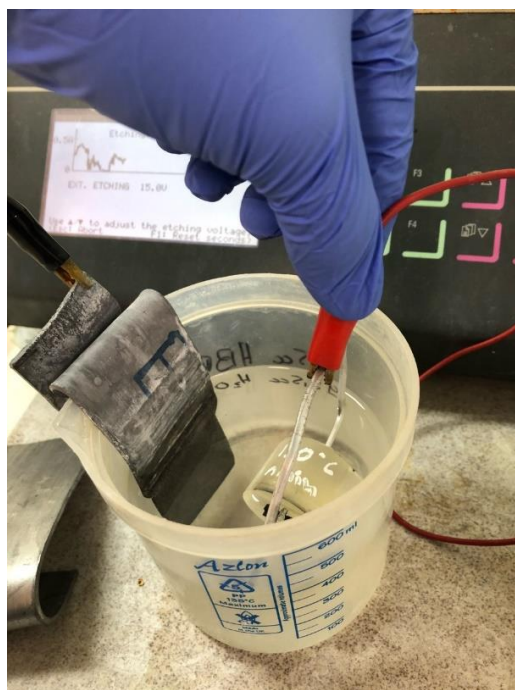
Τέλος, προκειμένου να μπορέσουν να διακριθούν επιτυχώς οι διάφορες φάσεις και τα κατακρημνίσματα στο οπτικό μικροσκόπιο πραγματοποιήθηκε προσβολή των δειγμάτων αρχικά με διάλυμα Barker's, ενώ για να διακριθούν οι κόκκοι και τα όριά τους τα δείγματα προσβλήθηκαν με διάλυμα υδροφθορίου (HF).

Κατά την πρώτη προσβολή, τα δείγματα υπέστησαν ηλεκτροχημική προσβολή με διάλυμα Barker's ( $\text{HBF}_4$ ). Παρέμειναν βυθισμένα στο ηλεκτρολυτικό κελί για 120 δευτερόλεπτα συνδεδεμένα με το ηλεκτρόδιο της ανόδου έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η ανοδίσωση τους και να οξειδωθούν οι κόκκοι τους με αποτέλεσμα να μπορούν να γίνουν διακριτοί στο οπτικό μικροσκόπιο με τη χρήση πολωτή και αναλυτή. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Struers LectroPol-5 και φαίνεται στο Σχήμα 18.

Κατά την δεύτερη προσβολή, τα δείγματα βυθίστηκαν σε διάλυμα υδροφθορίου (HF 0.5%) για χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων και κατόπιν καθαρίστηκαν με νερό και στέγνωσαν με ρεύμα αέρα. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17 : Χημική προσβολή με διάλυμα HF



Σχήμα 18 : Ηλεκτροχημική προσβολή με το διάλυμα Barker's

### 3.2.7 ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Κατά το στάδιο μελέτης στο οπτικό μικροσκόπιο, δίνεται η δυνατότητα του προσδιορισμού της μικροδομής του κάθε δείγματος, καθώς και η παρατήρηση των διαφόρων φάσεων που ενδέχεται να βρίσκονται μέσα στο υλικό. Κατά τη διάρκεια της γήρανσης η μικροδομή αλλάζει συνεχώς καθώς λαμβάνει χώρα η κατακρήμνιση φάσεων και επομένως η παρατήρησή τους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Αυτό ήρθε εις πέρας με τη λήψη εικόνων, οι οποίες φαίνονται στην ενότητα των αποτελεσμάτων, σε 2 διαφορετικές καταστάσεις:

- Έπειτα από χημική προσβολή με υδροφθόριο (HF) ώστε να γίνει εφικτή η παρατήρηση των διαφόρων φάσεων που υπάρχουν μέσα στο υλικό.
- Έπειτα από ηλεκτροχημική προσβολή με διάλυμα Barkers ( $\text{HBF}_4$ ) για να γίνει εφικτή η παρατήρηση των ορίων των κόκκων του υλικού.

Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ανάστροφο οπτικό μικροσκόπιο “Nikon EPIRHOT 300” το οποίο βρίσκεται στο χώρο της ELKEME A.E. και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη και την ανάλυση των εικόνων ήταν το “Image Pro Plus”. Η αρχή λειτουργίας του μικροσκοπίου γενικότερα, βασίζεται στην διοχέτευση φωτός από μια πηγή ορατού φωτός, στη συλλογή του και στην τροποποίηση της εντάσεώς του μέσω κατάλληλων διατάξεων [6].

### 3.2.8 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (Differential Scanning Calorimetry)

Η τεχνική της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των διαφόρων φάσεων που υπάρχουν στο υπό μελέτη κράμα και δηλαδή για μια πιο ποσοτική και ποιοτική παρατήρηση του σχηματισμού των κατακρημνισμάτων κατά την πορεία της γήρανσης. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν 4 δείγματα για τη μέθοδο αυτή:

- Το δείγμα Φ1 (0%-φυσική γήρανση) ως δείγμα αναφοράς
- Το δείγμα T12-600 που βρίσκεται σε κατάσταση υπεργήρανσης
- Το δείγμα T8-600 που παρουσίασε τη μέγιστη σκληρότητα

- Το δείγμα T6-10 επειδή βρίσκεται σε μια ενδιάμεση κατάσταση

Για τις ανάγκες της μεθόδου απομονώθηκαν από το κάθε δείγμα ρινίσματα βάρους περίπου 10 mg.

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στο γεγονός πως οι μεταβολές των φάσεων σε ένα υλικό μπορούν να παρακολουθηθούν μέσω του ποσού της θερμότητας που απορροφούν ή εκλύουν στις θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα αυτές οι μεταβολές [42]. Έτσι, μέσω των αντίστοιχων καμπυλών που προκύπτουν και βρίσκονται στην ενότητα των αποτελεσμάτων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ποιες φάσεις υπάρχουν μέσα στο κάθε δείγμα.

Έτσι, σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες για αυτή τη σειρά κραμάτων [43] η κορυφή που εμφανίζεται περίπου στους 50°C -70°C σηματοδοτεί τον σχηματισμό των GP zones, η κορυφή που εμφανίζεται περίπου στους 240°C αφορά το μετασχηματισμό των GP zones σε β'' φάση, η κορυφή που παρατηρείται από 300°C με 350°C ταυτίζεται με τον μετασχηματισμό β'' σε β' φάση και η κορυφή που παρατηρείται στους 400 °C με 450 °C αντιστοιχεί στον μετασχηματισμό από β' σε β φάση. Με βάση αυτές τις τιμές διαπιστώθηκε ποιες από τις φάσεις αυτές υπήρχαν στα 4 δοκίμια που μελετήθηκαν κατά τη μέθοδο αυτή.

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

#### 4.1.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Στους παρακάτω πίνακες βρίσκονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων σκληρότητας κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης μετά από την πάροδο 2, 7, 15 και 44 ημερών για κάθε ένα από τα 3 δοκίμια με διαφορετικό βαθμό προϋπάρχουσας παραμόρφωσης (0%,2%,10%).

**Πίνακας 10 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με μηδενική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης

Χρόνος Γήρανσης ->	0%-day0	0%-day2	0%-day7	0%-day15	0%-day44
Μέτρηση 1 (HV <sub>1.0</sub> )	34,2	34,2	47,5	42,4	45,5
Μέτρηση 2 (HV <sub>1.0</sub> )	35,8	37,1	44,5	46,9	44,2
Μέτρηση 3 (HV <sub>1.0</sub> )	33,9	39,7	46,0	48,7	46,5
Μέτρηση 4 (HV <sub>1.0</sub> )	32,9	36,0	42,0	49,7	45,5
Μέτρηση 5 (HV <sub>1.0</sub> )	34,9	36,9	45,9	47,0	43,1
Μέσος όρος (HV <sub>1.0</sub> )	<b>34,3</b>	<b>36,8</b>	<b>45,19</b>	<b>46,9</b>	<b>45,0</b>

**Πίνακας 11 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 2% κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης

Χρόνος Γήρανσης ->	2%-day0	2%-day2	2%-day7	2%-day15	2%-day44
Μέτρηση 1 (HV <sub>1.0</sub> )	42,0	40,1	40,6	43,5	45,7
Μέτρηση 2 (HV <sub>1.0</sub> )	36,7	39,6	44,9	40,5	48,4
Μέτρηση 3 (HV <sub>1.0</sub> )	38,1	35,4	42,8	39,4	45,9
Μέτρηση 4 (HV <sub>1.0</sub> )	39,6	35,2	43,5	41,4	44,4
Μέτρηση 5 (HV <sub>1.0</sub> )	39,2	38,9	44,1	40,5	48,9
Μέσος όρος (HV <sub>1.0</sub> )	<b>39,1</b>	<b>37,8</b>	<b>43,2</b>	<b>41,1</b>	<b>46,7</b>

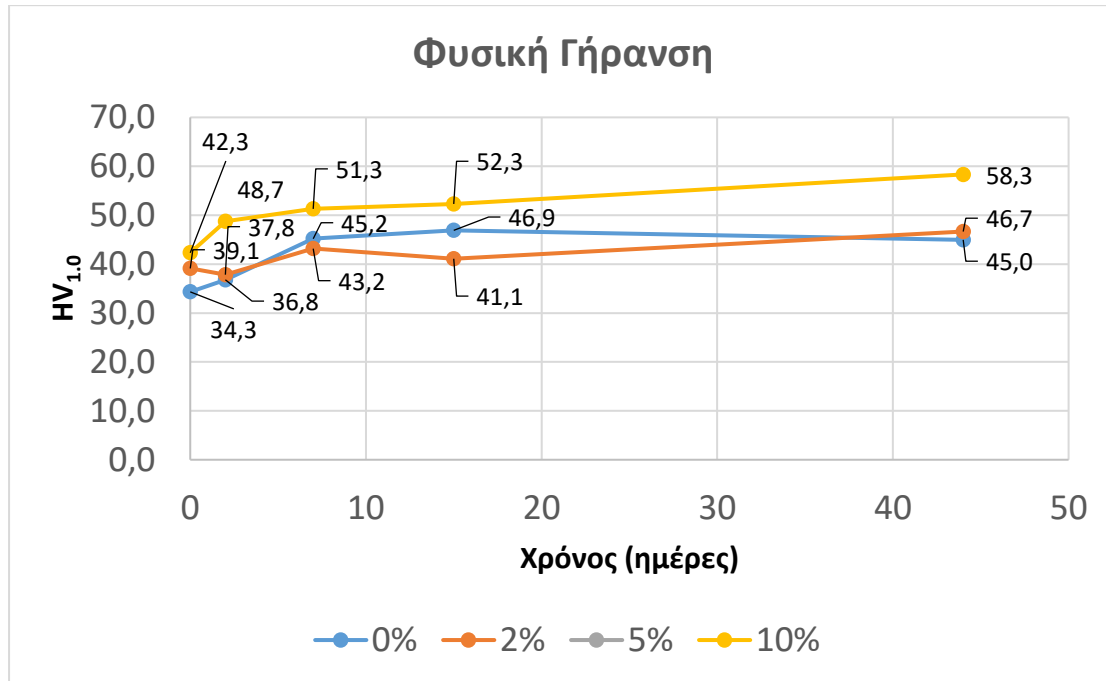
**Πίνακας 12 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης

Χρόνος Γήρανσης ->	10%-day0	10%-day2	10%-day7	10%-day15	10%-day44
Μέτρηση 1 (HV <sub>1.0</sub> )	43,0	47,1	50,4	51,4	59,1
Μέτρηση 2 (HV <sub>1.0</sub> )	40,3	47,6	53,4	52,7	59,2
Μέτρηση 3 (HV <sub>1.0</sub> )	43,7	50,4	53,9	51,3	59,5
Μέτρηση 4 (HV <sub>1.0</sub> )	42,5	48,4	48,8	52,4	61,3
Μέτρηση 5 (HV <sub>1.0</sub> )	42,0	50,1	50,1	54,0	52,6
Μέσος όρος (HV <sub>1.0</sub> )	<b>42,3</b>	<b>48,7</b>	<b>51,3</b>	<b>52,3</b>	<b>58,3</b>

**Πίνακας 13 :** Απεικόνιση των μέσων τιμών σκληρότητας κατά τη φυσική γήρανση συνολικά

	0	2	7	15	44	(days)
0%	34,3	36,8	45,2	46,9	45,0	(HV <sub>1.0</sub> )
2%	39,1	37,8	43,2	41,1	46,7	(HV <sub>1.0</sub> )
5%	-	-	-	-	-	-
10%	42,3	48,7	51,3	52,3	58,3	(HV <sub>1.0</sub> )

Από τον πίνακα 13 προκύπτει το διάγραμμα που απεικονίζεται στο σχήμα 19 το οποίο στοχεύει στην ευκολότερη ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 19 : Διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μέτρησης σκληρότητας κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης.

#### 4.1.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 0% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια που έφεραν μηδενική παραμόρφωση και υπέστησαν τεχνητή γήρανση στους 150°C, 180°C και 210°C μετά από το πέρας του κάθε χρονικού διαστήματος, δηλαδή μετά την πάροδο 10, 100 και 600 λεπτών.



**Πίνακας 14** : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 0% μετά από γήρανση στους 150°C

Συνθήκη Γήρανσης->	0%-150 °C - 10min	0%-150 °C - 100min	0%-150 °C - 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	42,6	48,8	54,9
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	43,9	48,1	52,3
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	43,0	51,0	53,4
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	42,8	49,4	54,6
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	42,1	44,5	50,3
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>42,9</b>	<b>48,4</b>	<b>53,1</b>

**Πίνακας 15** : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 0% μετά από γήρανση στους 180°C

Συνθήκη Γήρανσης->	0%-180 °C - 10min	0%-180 °C - 100min	0%-180 °C - 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	44,1	49,7	73,0
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	47,4	52,7	68,7
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	46,2	49,7	68,9
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	44,3	51,0	66,1
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	47,1	53,0	73,8
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>45,8</b>	<b>51,2</b>	<b>70,1</b>

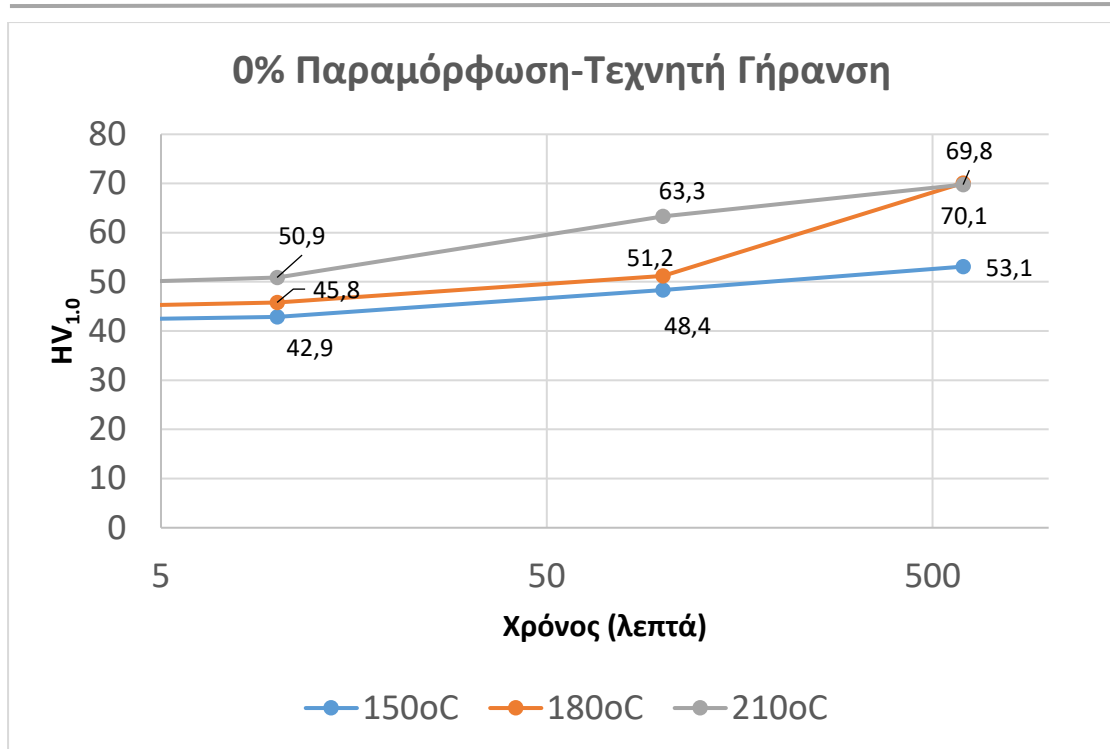
**Πίνακας 16 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 0% μετά από γήρανση στους 210°C

Συνθήκη Γήρανσης->	0%-210°C- 10min	0%-210°C- 100min	0%-210°C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	48,4	65,4	68,4
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	49,6	60,9	67,0
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	49,2	60,4	65,1
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	51,2	66,5	75,5
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	56,1	63,5	72,9
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>50,9</b>	<b>63,3</b>	<b>69,8</b>

Στον πίνακα 17 βρίσκονται συγκεντρωμένες όλες οι μέσες τιμές των σκληρομετρήσεων για κάθε δοκίμιο με μηδενική παραμόρφωση σε κάθε συνθήκη τεχνητής γήρανσης, ώστε να γίνει εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο ίδιο έργο συντελεί και το διάγραμμα του σχήματος 20 όπου βρίσκονται αποτυπωμένα σχηματικά όλα τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα.

**Πίνακας 17 :** Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 0%

<b>0%</b>					
	0	10	100	600	(min)
150 °C	34,3	42,9	48,4	53,1	(HV <sub>1.0</sub> )
180 °C	34,3	45,8	51,2	70,1	(HV <sub>1.0</sub> )
210 °C	34,3	50,9	63,3	69,8	(HV <sub>1.0</sub> )



**Σχήμα 20 :** Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με μηδενική παραμόρφωση.

#### 4.1.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 2% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια που έφεραν παραμόρφωση 2% και υπέστησαν τεχνητή γήρανση στους 150°C, 180°C και 210°C μετά από το πέρας του κάθε χρονικού διαστήματος, δηλαδή μετά την πάροδο 10, 100 και 600 λεπτών.

**Πίνακας 18 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 2% μετά από γήρανση στους 150°C

Συνθήκη Γήρανσης->	2%-150 °C-10min	2%-150 °C-100min	2%-150 °C-600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	46,5	51,0	70,5
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	45,2	50,3	70,1
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	49,6	52,7	64,4
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	44,5	50,4	65,0
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	45,3	52,7	68,3
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>46,2</b>	<b>51,4</b>	<b>67,7</b>

**Πίνακας 19 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 2% μετά από γήρανση στους 180°C

Συνθήκη Γήρανσης->	2%-180 °C-10min	2%-180 °C-100min	2%-180 °C-600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	58,6	75,5	74,0
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	53,3	77,6	82,0
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	56,0	67,7	74,6
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	63,7	68,6	75,8
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	50,9	71,8	81,3
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>56,5</b>	<b>72,3</b>	<b>77,6</b>

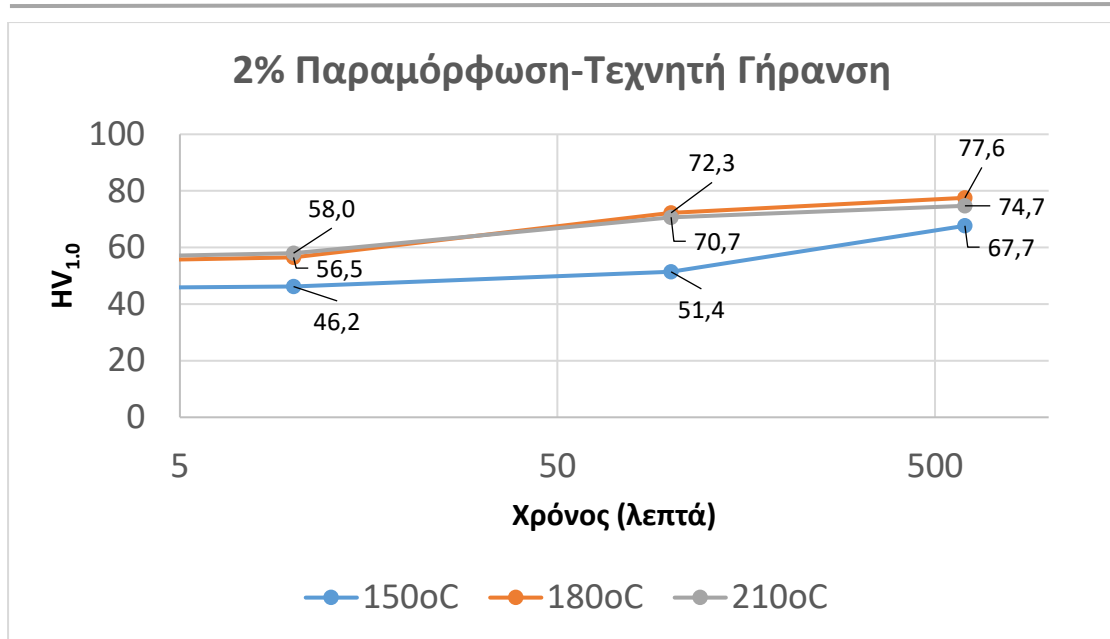
**Πίνακας 20** : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 2% μετά από γήρανση στους 210°C

Συνθήκη Γήρανσης->	2%-210 °C-10min	2%-210 °C-100min	2%-210 °-600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	52,4	71,9	77,3
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	64,5	74,2	73,9
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	60,8	68,2	75,4
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	56,6	68,7	74,6
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	55,9	70,7	72,5
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>58,0</b>	<b>70,7</b>	<b>74,7</b>

Στον πίνακα 21 βρίσκονται συγκεντρωμένες όλες οι μέσες τιμές των σκληρομετρήσεων για κάθε δοκίμιο με παραμόρφωση 2% σε κάθε συνθήκη τεχνητής γήρανσης, ώστε να γίνει εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο ίδιο έργο συντελεί και το διάγραμμα του σχήματος 21 όπου βρίσκονται αποτυπωμένα σχηματικά όλα τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα.

**Πίνακας 21** : Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 2%

<b>2%</b>					
	0	10	100	600	(min)
150 °C	39,1	46,2	51,4	67,7	(HV <sub>1.0</sub> )
180 °C	39,1	56,5	72,3	77,6	(HV <sub>1.0</sub> )
210 °C	39,1	58,0	70,7	74,7	(HV <sub>1.0</sub> )



**Σχήμα 21 :** Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 2%.

#### 4.1.4 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 5% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια που έφεραν παραμόρφωση 5% και υπέστησαν τεχνητή γήρανση στους 150°C, 180°C και 210°C μετά από το πέρας του κάθε χρονικού διαστήματος, δηλαδή μετά την πάροδο 10, 100 και 600 λεπτών.

**Πίνακας 22** : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 5% μετά από γήρανση στους 150°C

Συνθήκη Γήρανσης->	5%-150 °C- 10min	5%-150 °C- 100min	5%-150 °C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	47,3	64,0	72,4
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	46,6	59,4	76,4
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	47,1	56,3	71,8
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	46,8	58,0	73,9
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	46,5	56,1	68,4
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>46,8</b>	<b>58,8</b>	<b>72,6</b>

**Πίνακας 23** : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 5% μετά από γήρανση στους 180°C

Συνθήκη Γήρανσης->	5%-180 °C- 10min	5%-180 °C- 100min	5%-180 °C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	61,7	64,0	76,4
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	62,5	67,8	79,9
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	59,2	68,3	79,6
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	52,0	64,4	82,4
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	52,2	71,9	82,6
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>57,5</b>	<b>67,3</b>	<b>80,2</b>

**Πίνακας 24** : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 5% μετά από γήρανση στους 210°C

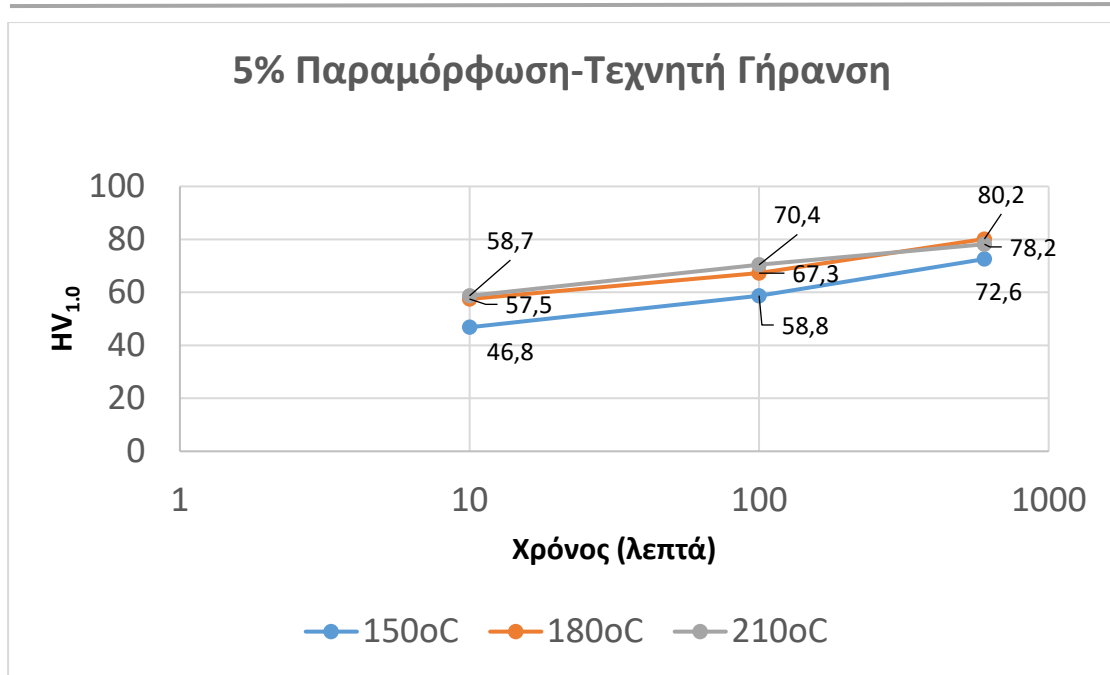
Συνθήκη Γήρανσης->	5%-210 °C- 10min	5%-210 °C- 100min	5%-210 °C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	59,3	68,8	76,2
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	56,1	67,3	78,6
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	57,1	71,7	79,7
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	59,6	71,8	81,0
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	61,3	72,5	75,4
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>58,7</b>	<b>70,4</b>	<b>78,2</b>

Στον πίνακα 25 βρίσκονται συγκεντρωμένες όλες οι μέσες τιμές των σκληρομετρήσεων για κάθε δοκίμιο με παραμόρφωση 5% σε κάθε συνθήκη τεχνητής γήρανσης, ώστε να γίνει εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο ίδιο έργο συντελεί και το διάγραμμα του σχήματος 22 όπου βρίσκονται αποτυπωμένα σχηματικά όλα τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα.

**Πίνακας 25** : Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 5%

<b>5%</b>					
	0	10	100	600	(min)
150 °C	-	46,8	58,8	72,6	(HV <sub>1.0</sub> )
180 °C	-	57,5	67,3	80,2	(HV <sub>1.0</sub> )
210 °C	-	58,7	70,4	78,2	(HV <sub>1.0</sub> )





**Σχήμα 22 :** Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 5%.

#### 4.1.5 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ 10% ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια που έφεραν παραμόρφωση 10% και υπέστησαν τεχνητή γήρανση στους 150°C, 180°C και 210°C μετά από το πέρας του κάθε χρονικού διαστήματος, δηλαδή μετά την πάροδο 10, 100 και 600 λεπτών.

**Πίνακας 26 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% μετά από γήρανση στους 150°C

Συνθήκη Γήρανσης->	10%-150 °C- 10min	10%-150 °C- 100min	10%-150 °C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	52,8	61,5	69,4
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	53,6	57,3	69,6
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	56,6	59,0	73,4
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	55,7	60,2	67,4
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	53,0	59,7	75,8
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>54,3</b>	<b>59,5</b>	<b>71,1</b>

**Πίνακας 27 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% μετά από γήρανση στους 180°C

Συνθήκη Γήρανσης->	10%-180 °C- 10min	10%-180 °C- 100min	10%-180 °C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	63,5	67,6	78,1
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	65,3	71,3	80,0
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	69,2	74,3	84,7
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	60,1	63,0	80,8
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	59,2	64,9	79,5
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>63,5</b>	<b>68,2</b>	<b>80,6</b>

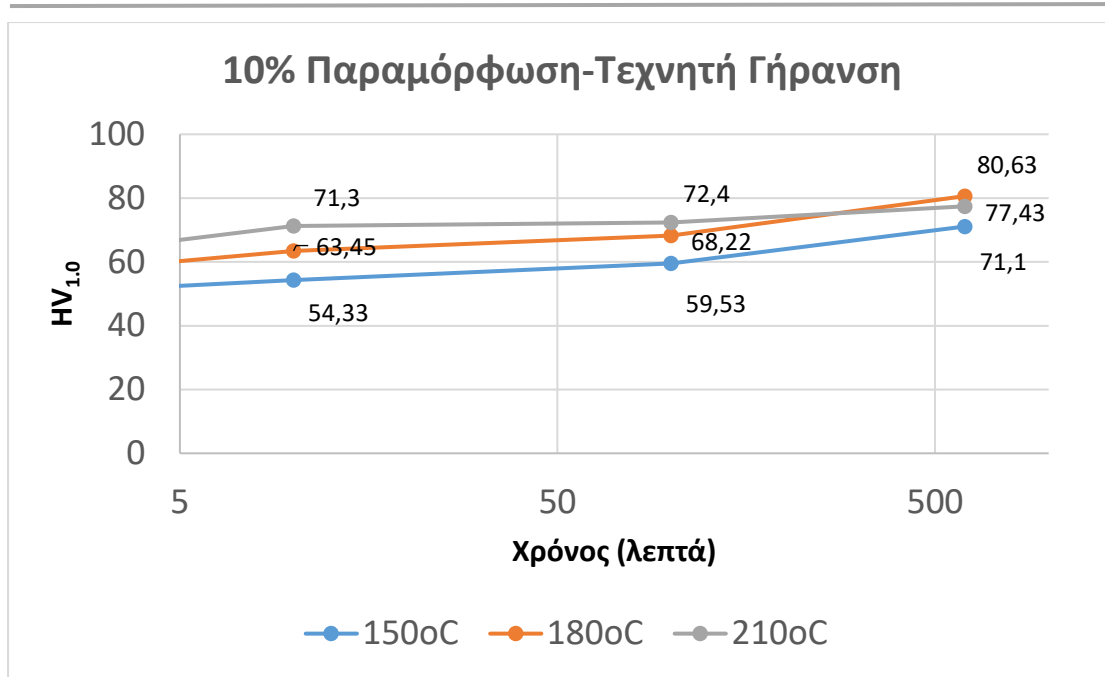
**Πίνακας 28 :** Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% μετά από γήρανση στους 210°C

Συνθήκη Γήρανσης->	10%-210 °C- 10min	10%-210 °C- 100min	10%-210 °C- 600min
Μέτρηση 1(HV <sub>1.0</sub> )	75,3	75,1	81,0
Μέτρηση 2(HV <sub>1.0</sub> )	70,1	75,8	76,1
Μέτρηση 3(HV <sub>1.0</sub> )	69,1	68,1	78,1
Μέτρηση 4(HV <sub>1.0</sub> )	73,8	72,8	78,2
Μέτρηση 5(HV <sub>1.0</sub> )	68,2	70,3	73,8
Μέσος όρος μετρήσεων(HV <sub>1.0</sub> ) ->	<b>71,3</b>	<b>72,4</b>	<b>77,4</b>

Στον πίνακα 29 βρίσκονται συγκεντρωμένες όλες οι μέσες τιμές των μετρήσεων σκληρότητας για κάθε δοκίμιο με παραμόρφωση 10% σε κάθε συνθήκη τεχνητής γήρανσης, ώστε να γίνει εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο ίδιο έργο συντελεί και το διάγραμμα του σχήματος 23 όπου βρίσκονται αποτυπωμένα σχηματικά όλα τα δεδομένα του προηγούμενου πίνακα.

**Πίνακας 29 :** Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 10%

<b>10%</b>					
	0	10	100	600	(min)
150°C	42,3	54,3	59,5	71,1	(HV <sub>1.0</sub> )
180°C	42,3	63,5	68,2	80,6	(HV <sub>1.0</sub> )
210°C	42,3	71,3	72,4	77,4	(HV <sub>1.0</sub> )

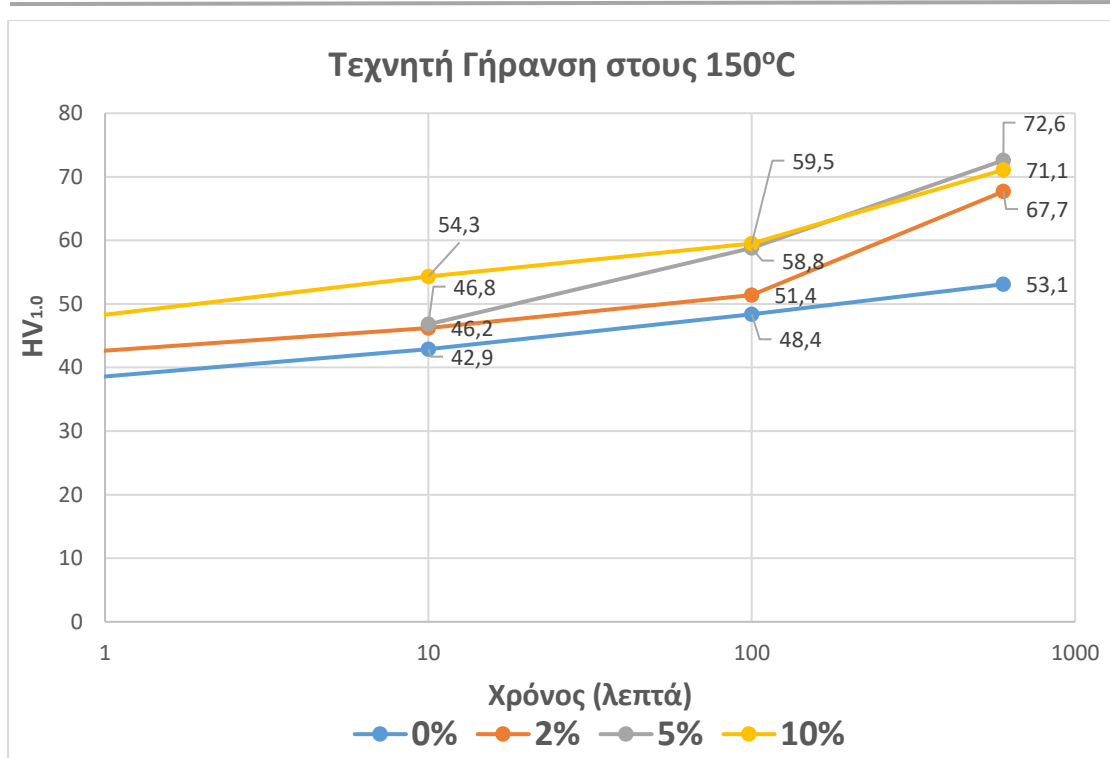


**Σχήμα 23 :** Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 10%.

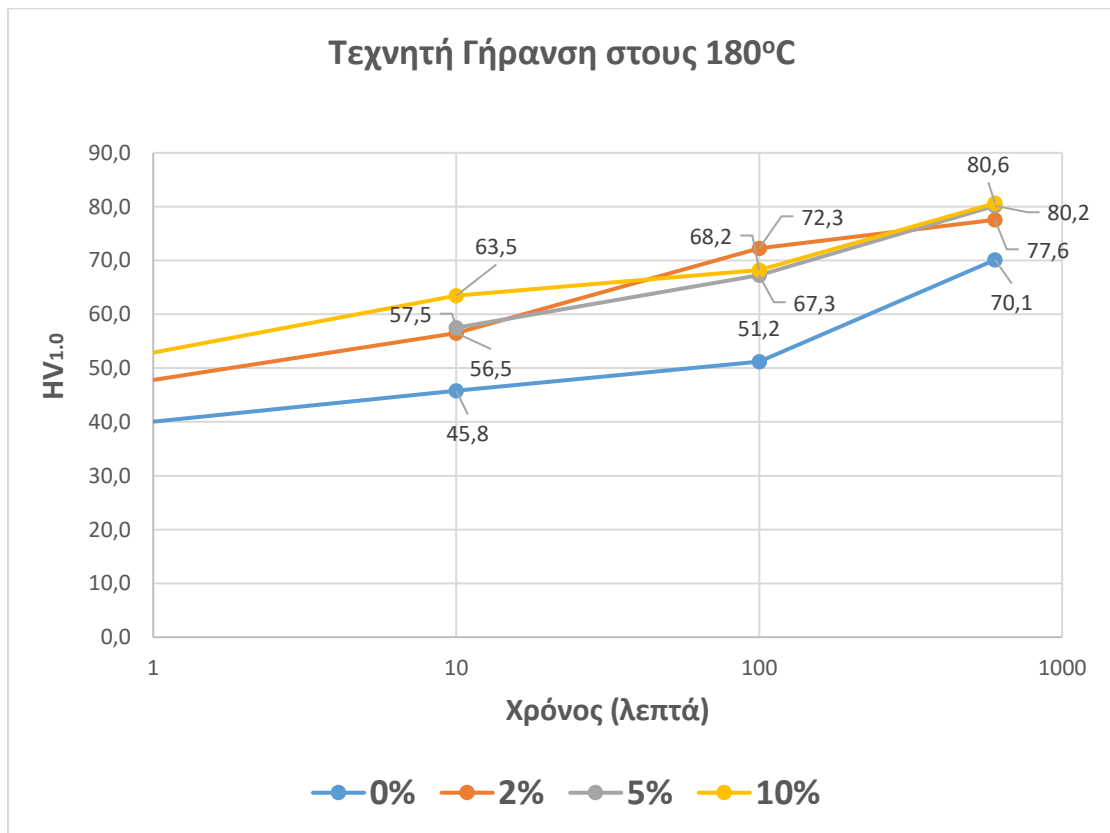
#### 4.1.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα και για να μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα, που παρουσιάζουν τις τιμές σκληρότητας που βρίσκονται παραπάνω, αλλά η κάθε καμπύλη αφορά τα ποσοστά παραμόρφωσης σε δεδομένες θερμοκρασίες. Ο σκοπός τους, δηλαδή, είναι να διασαφηνιστεί καλύτερα η επίδραση των παραμορφώσεων στη σκληρότητα για δεδομένες συνθήκες γήρανσης.

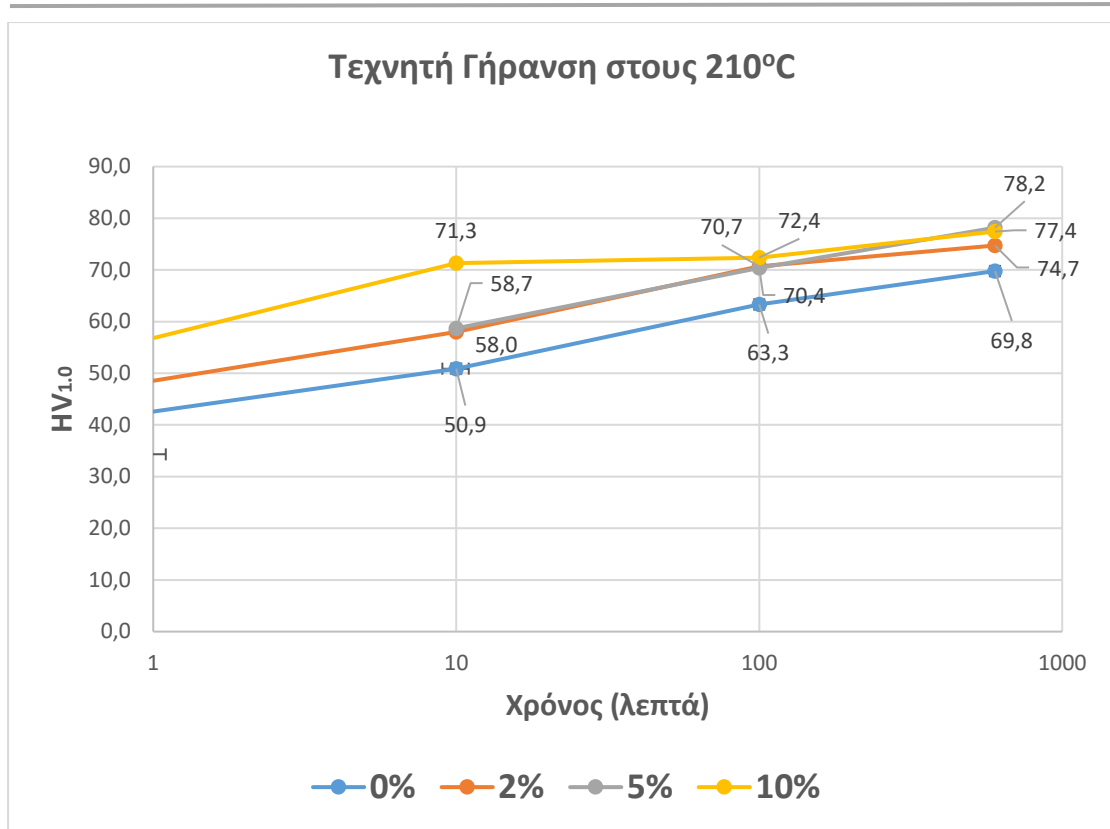
Έτσι, μέσω των διαγραμμάτων παρατηρείται ότι η απόκριση της παραμόρφωσης είναι γρήγορη στην αρχή της γήρανσης καθώς παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στη σκληρότητα στα 10 και στα 100 λεπτά, οι οποίες τείνουν να εξομαλυνθούν προς τα 600 λεπτά κυρίως στους 180 °C και στους 210°C.



Σχήμα 24 : Διάγραμμα σύγκρισης της επίδρασης κάθε ποσοστού παραμόρφωσης στη σκληρότητα για τεχνητή γήρανση στους 150°C



Σχήμα 25 : Διάγραμμα σύγκρισης της επίδρασης κάθε ποσοστού παραμόρφωσης στη σκληρότητα για τεχνητή γήρανση στους 180°C



**Σχήμα 26 :** Διάγραμμα σύγκρισης της επίδρασης κάθε ποσοστού παραμόρφωσης στη σκληρότητα για τεχνητή γήρανση στους 210°C

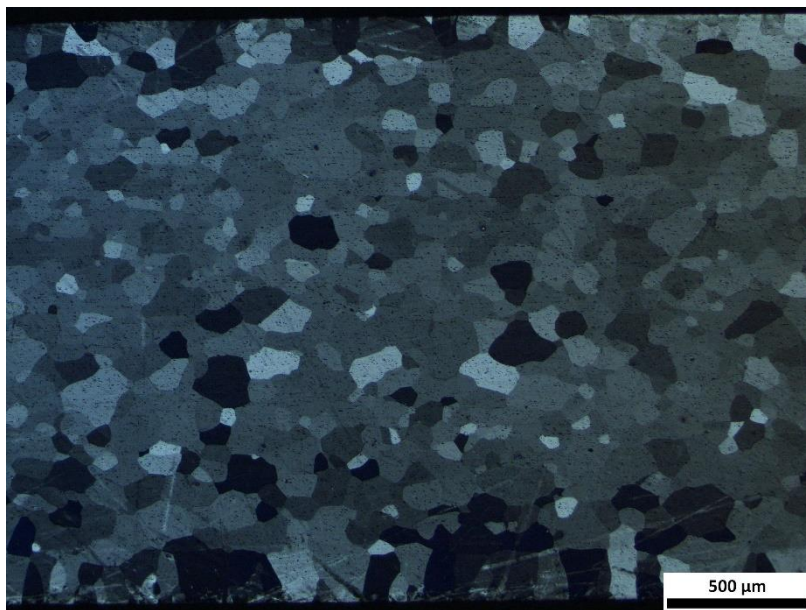
## 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ

Για μελέτη στο οπτικό μικροσκόπιο επιλέχθηκαν συγκεκριμένα δοκίμια, ώστε να μπορέσουν να γίνουν ευκολότερα εμφανείς οι διαφορές στη μικροδομή λόγω της γήρανσης αλλά και λόγω των αρχικών παραμορφώσεων που έχουν υποστεί τα δοκίμια. Έτσι, παρακάτω, παρουσιάζονται οι εικόνες που λήφθηκαν από το μικροσκόπιο με τη χρήση του λογισμικού Image Pro Plus αφού αυτά προσβλήθηκαν με διάλυμα Barker's και στη συνέχεια με διάλυμα υδροφθορίου (HF).

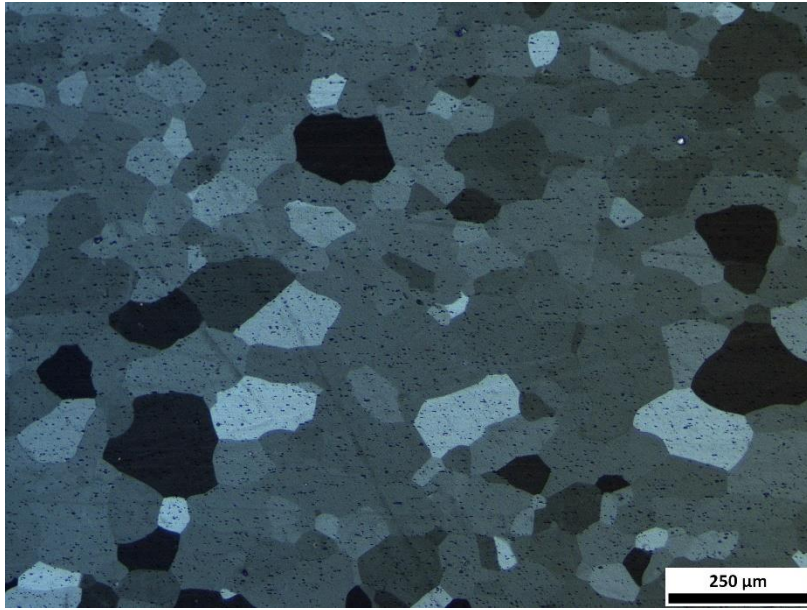
#### 4.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ BARKERS

Με τη χρήση του αντιδραστηρίου Barker's γίνεται εφικτή η παρατήρηση των κόκκων και των ορίων τους κυρίως σε μικρές μεγεθύνσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις και σε λίγο μεγαλύτερες. Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, οι κόκκοι του υλικού είναι ελαφρώς επιμηκυμένοι στην διεύθυνση της διέλασης. Γενικότερα, το μέγεθος των κόκκων παραμένει περίπου το ίδιο και δεν επηρεάζεται έντονα η μορφολογία των κόκκων από τη γήρανση ή την παραμόρφωση. Επιπλέον, παρατηρούνται μεγαλύτερου μεγέθους κόκκοι κοντά στα πλευρικά τοιχώματα των δειγμάτων και μικρότερου μεγέθους προς το κέντρο τους. Στα δείγματα που φέρουν μεγαλύτερου ποσοστού αρχική παραμόρφωση μπορεί να γίνουν διακριτές ακόμα και οι γραμμές ολίσθησης των κόκκων λόγω της εφελκυστικής παραμόρφωσης (slip lines).

##### 4.2.1.1 Δοκίμιο με παραμόρφωση 0%

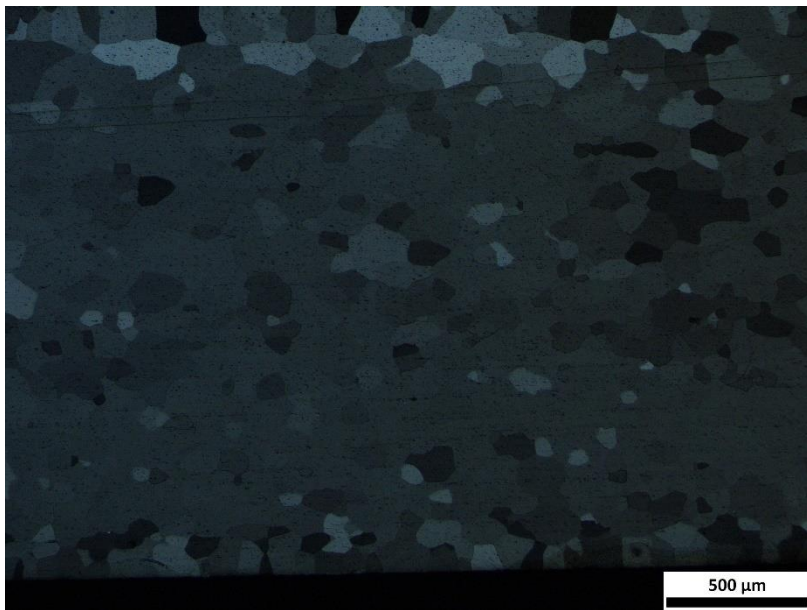


Σχήμα 27 : Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's.



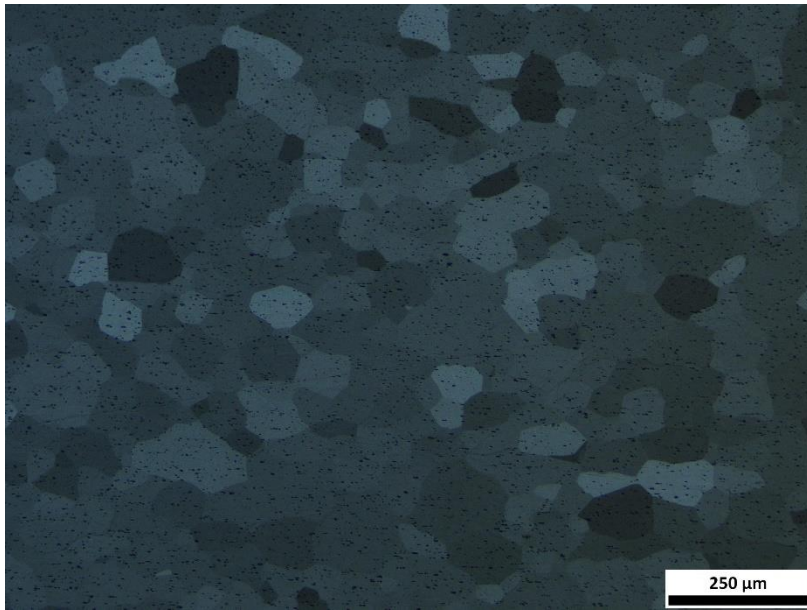
**Σχήμα 28 :** Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's.

#### 4.2.1.2 Δοκίμιο με παραμόρφωση 2%



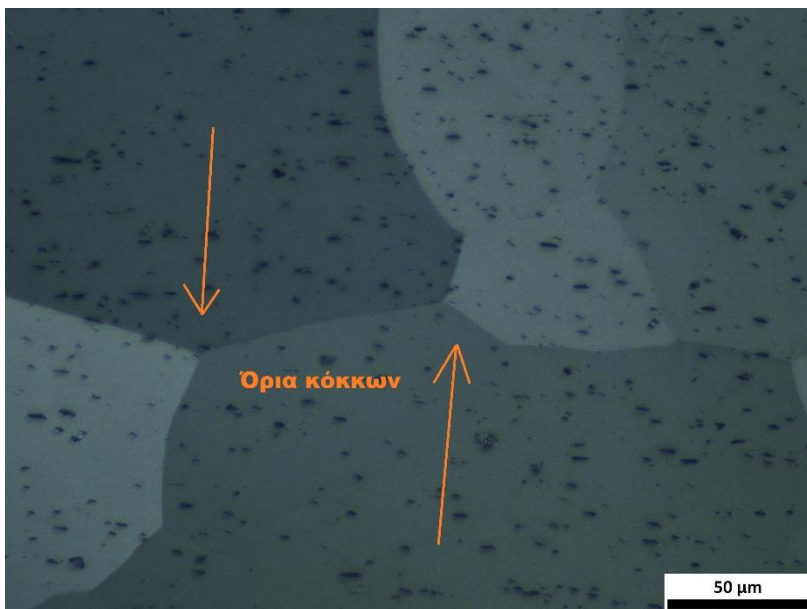
**Σχήμα 29 :** Μικροδομή δοκιμίου T6-600 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's.





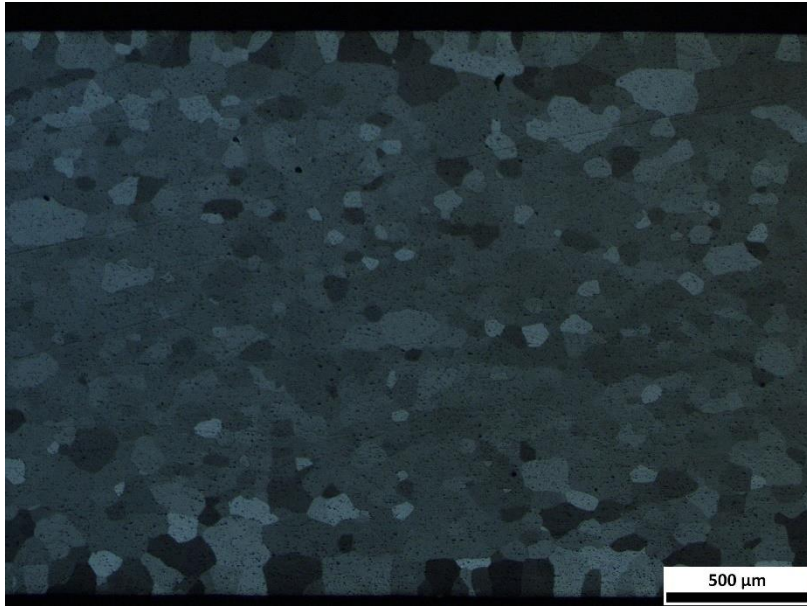
**Σχήμα 30 :** Μικροδομή δοκιμίου T6-600 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's.

Εάν η ηλεκτροχημική προσβολή είναι έντονη, οι κόκκοι μπορούν να διακριθούν με ευκολία ακόμη και σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις όπως στο σχήμα 31.

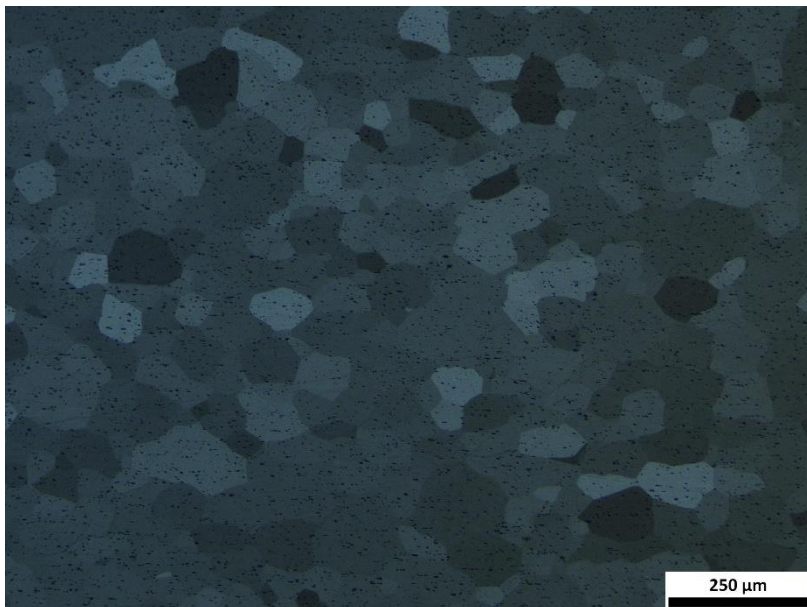


**Σχήμα 31 :** Όρια κόκκων στο δοκίμιο T6-600 (σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος Barker's).

#### 4.2.1.3 Δοκίμιο με παραμόρφωση 5%

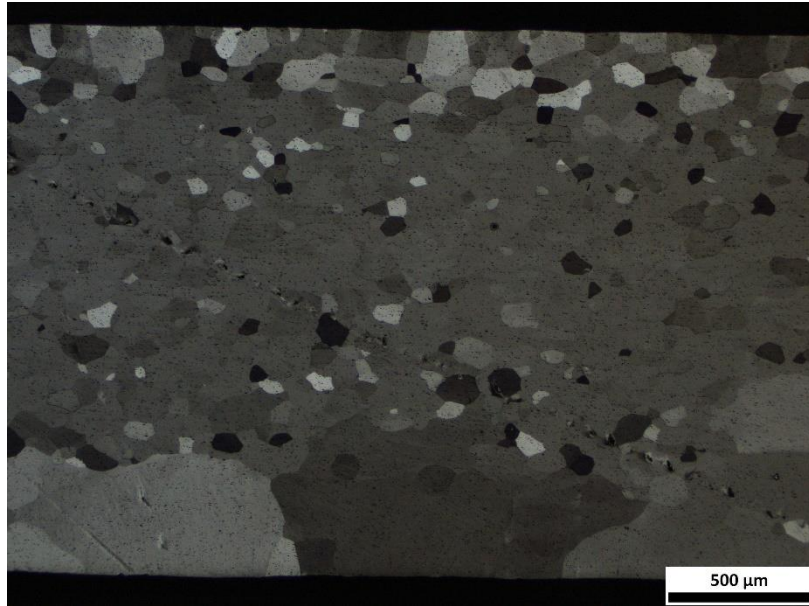


**Σχήμα 32 :** Μικροδομή δοκιμίου T7-10 (5% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's.

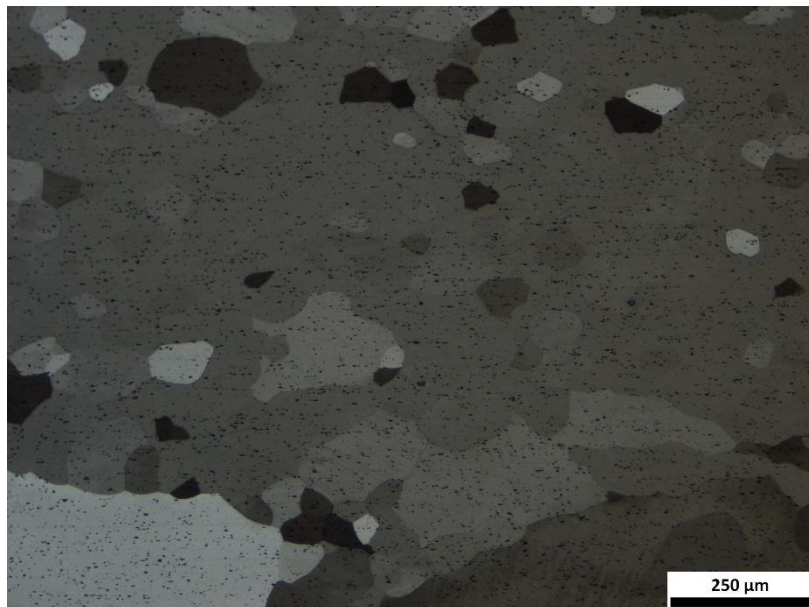


**Σχήμα 33 :** Μικροδομή δοκιμίου T7-10 (5% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's.

#### 4.2.1.4 Δοκίμιο με παραμόρφωση 10%



**Σχήμα 34 :** Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's.

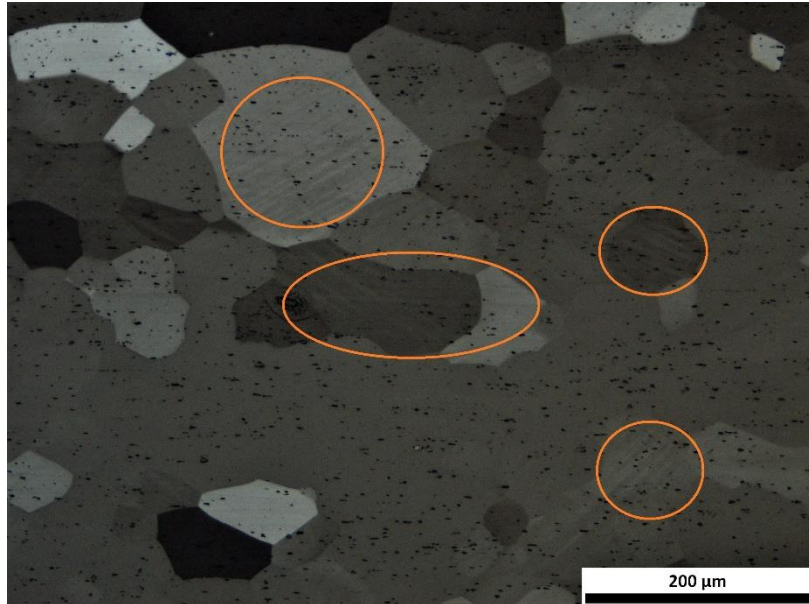


**Σχήμα 35 :** Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's.

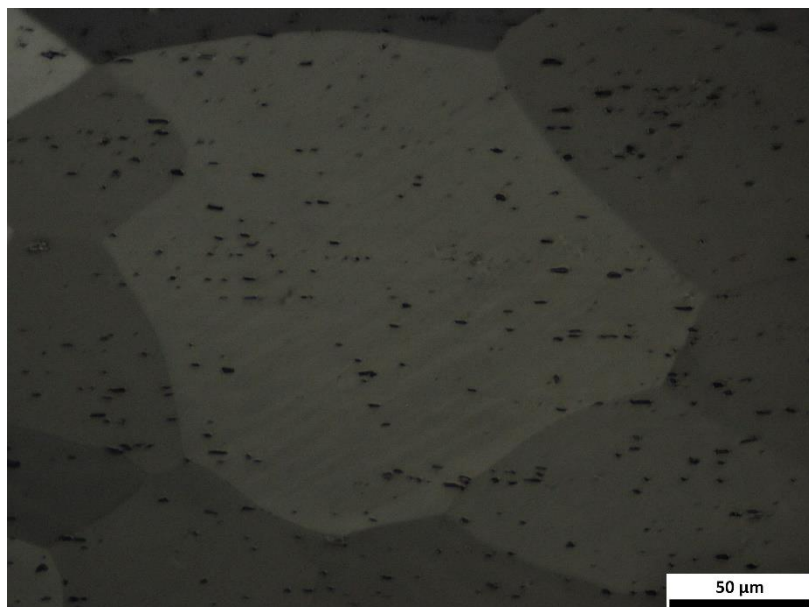
Στις κυκλωμένες περιοχές του σχήματος 36 μπορούν να διακριθούν οι χαρακτηριστικές γραμμές ολίσθησης (slip lines), οι οποίες προέκυψαν από την



αρχική παραμόρφωση. Παρατηρούνται κυρίως στο δοκίμιο T8-600, διότι είναι εκείνο που φέρει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση.



**Σχήμα 36 :** Γραμμές ολίσθησης (slip lines) στους κόκκους του δοκίμιου T8-600 σε μεγέθυνση x20 και με προσβολή διαλύματος Barker's.



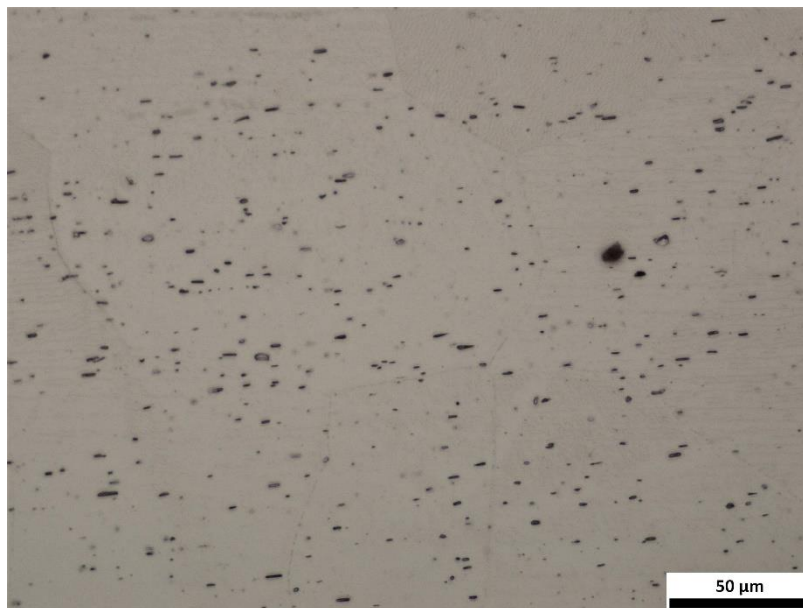
**Σχήμα 37 :** Γραμμές ολίσθησης (slip lines) σε κόκκο του δοκίμιου T8-600 σε μεγέθυνση x50 μετά από προσβολή διαλύματος Barker's.

#### 4.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ HF

Σε όλες τις μικρογραφίες η φάση  $\text{AlFeSi}$  που διακρίνεται με έντονο μαύρο χρώμα, βρίσκεται σε διασπορά στον όγκο του υλικού και είναι τα σωματίδιά της είναι πάντα προσανατολισμένα στη διεύθυνση της διέλασης. Όσο αυξάνει η διάρκεια της γήρανσης, αυξάνεται και ο βαθμός κατακρήμνισης. Παρατηρείται, δηλαδή, ότι η διασπορά των φάσεων κατακρήμνισης ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) γίνεται όλο και πιο πυκνή και μάλιστα, στα δείγματα που βρίσκονται σε κατάσταση υπεργήρανσης είναι η πιο πυκνή. Επίσης, στην κατάσταση της υπεργήρανσης, στα όρια των κόκκων φαίνεται να απουσιάζουν τα κατακρημνίσματα και πρόκειται για ζώνες χωρίς κατακρημνίσματα (ZXC ή PFZ) (Σχήματα 44, 45).

##### 4.2.2.1 Δοκίμιο Φ1 (0% παραμόρφωση-φυσική γήρανση)

Στο σχήμα 39 επικρατούν τα χαρακτηριστικά σωματίδια της φάσης  $\text{AlFeSi}$ , τα οποία δεν απαιτείται να προηγηθεί τεχνητή γήρανση για να εμφανιστούν.



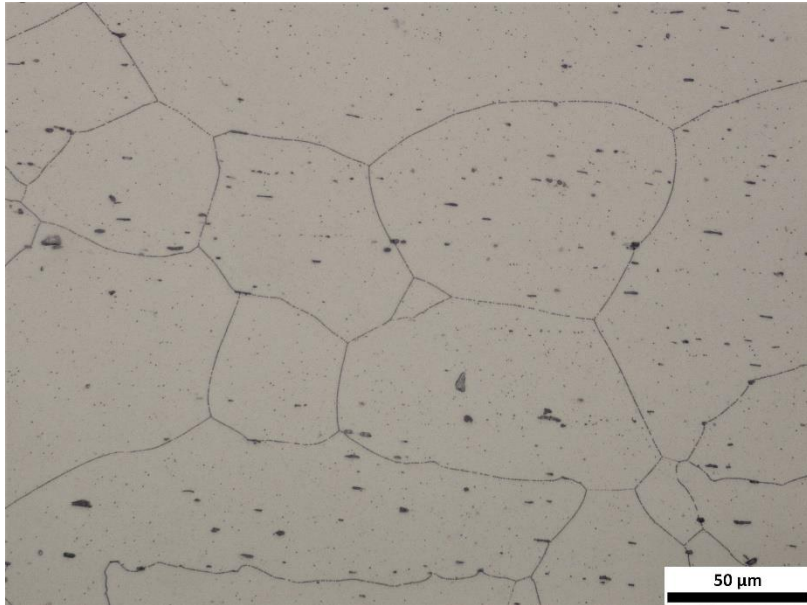
**Σχήμα 38 :** Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).



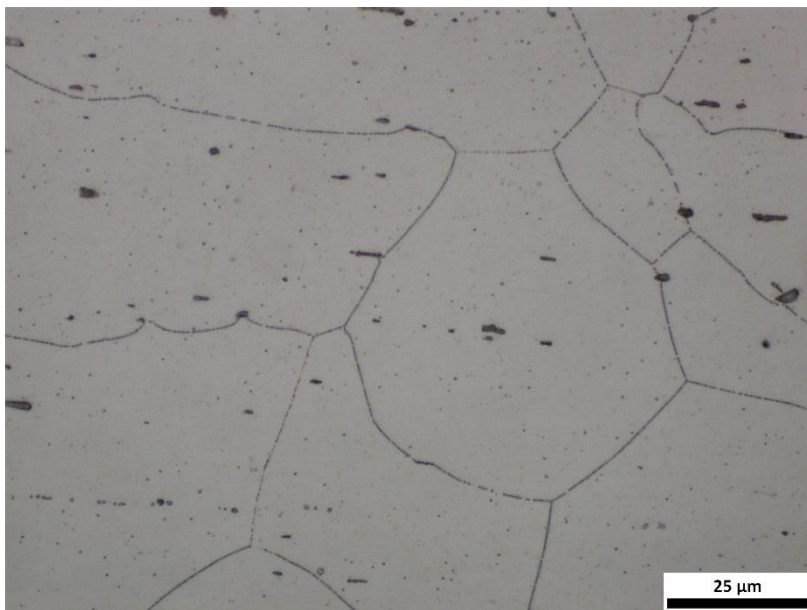
**Σχήμα 39 :** Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).

#### **4.2.2.2 Δοκίμιο T6-10 (2% παραμόρφωση-τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά)**

Στο δοκίμιο αυτό δεν παρατηρείται πυκνό δίκτυο κατακρημνισμάτων  $Mg_2Si$ , διότι δεν έχουν προλάβει να σχηματιστούν, καθώς έχουν επέλθει μόνο 10 λεπτά τεχνητής γήρανσης. Παρατηρούνται όμως ορισμένα σωματίδια της φάσης  $AlFeSi$  στα όρια των κόκκων και αυτά φαίνεται να εμποδίζουν την ανάπτυξη των γειτονικών κόκκων.



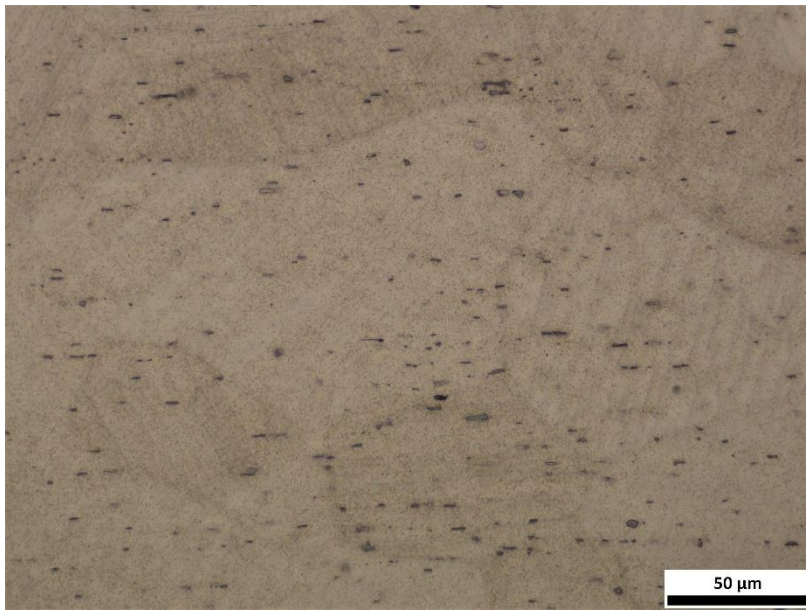
**Σχήμα 40 :** Μικροδομή δοκιμίου T6-10 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).



**Σχήμα 41 :** Μικροδομή δοκιμίου T6-10 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).

#### 4.2.2.3 Δοκίμιο T8-600 (10% παραμόρφωση-τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά)

Στο δοκίμιο αυτό, μετά το πέρας 600 λεπτών τεχνητής γήρανσης, μπορεί να γίνει πλέον εύκολα διακριτό ένα πυκνό δίκτυο κατακρημνισμάτων, ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του δείγματος. Οι συνθήκες γήρανσης αυτές, είναι εκείνες που επέφεραν την μέγιστη σκληρότητα στο δοκίμιο T8-600 και αυτό αντικατοπτρίζεται πλήρως στα παρακάτω σχήματα.



**Σχήμα 42 :** Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).

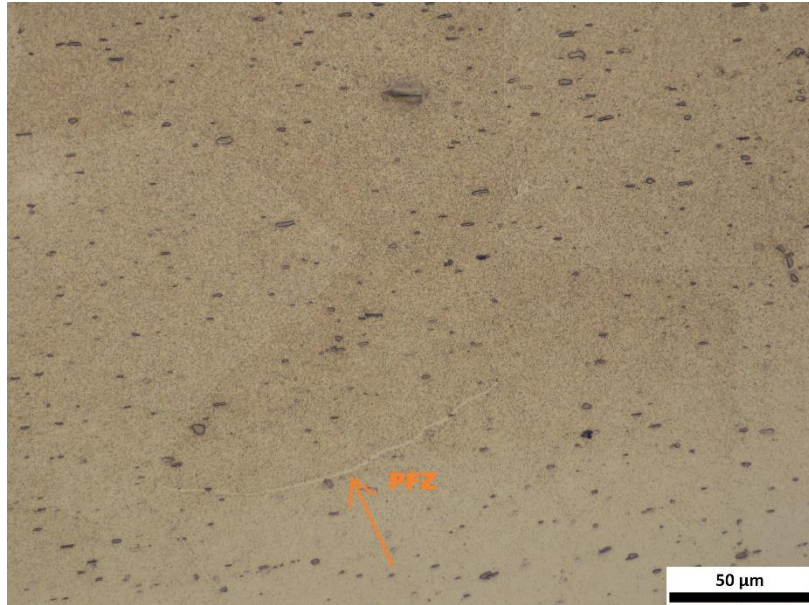




**Σχήμα 43 :** Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).

#### **4.2.2.4 Δοκίμιο T12-600 (10% παραμόρφωση-τεχνητή γήρανση στους 210 °C για 600 λεπτά)**

Το δοκίμιο αυτό βρίσκεται σε κατάσταση υπεργήρανσης και αυτό αντικατοπτρίζεται στην πυκνή διασπορά των κατακρημνισμάτων. Αντικατοπτρίζεται όμως, και στο σχηματισμό ζωνών χωρίς κατακρημνίσματα πάνω στα όρια των κόκκων όπως ακριβώς απεικονίζεται στις μικρογραφίες των δοκιμίων παρακάτω.



**Σχήμα 44 :** Μικροδομή δοκιμίου T12-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 210°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).

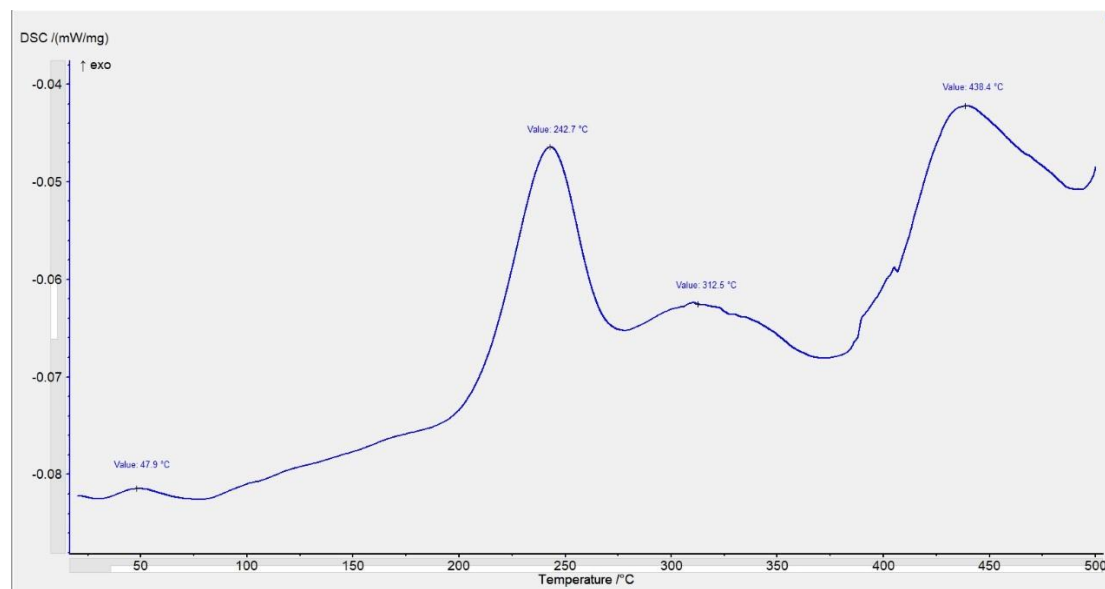


**Σχήμα 45 :** Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 210°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).

### 4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ

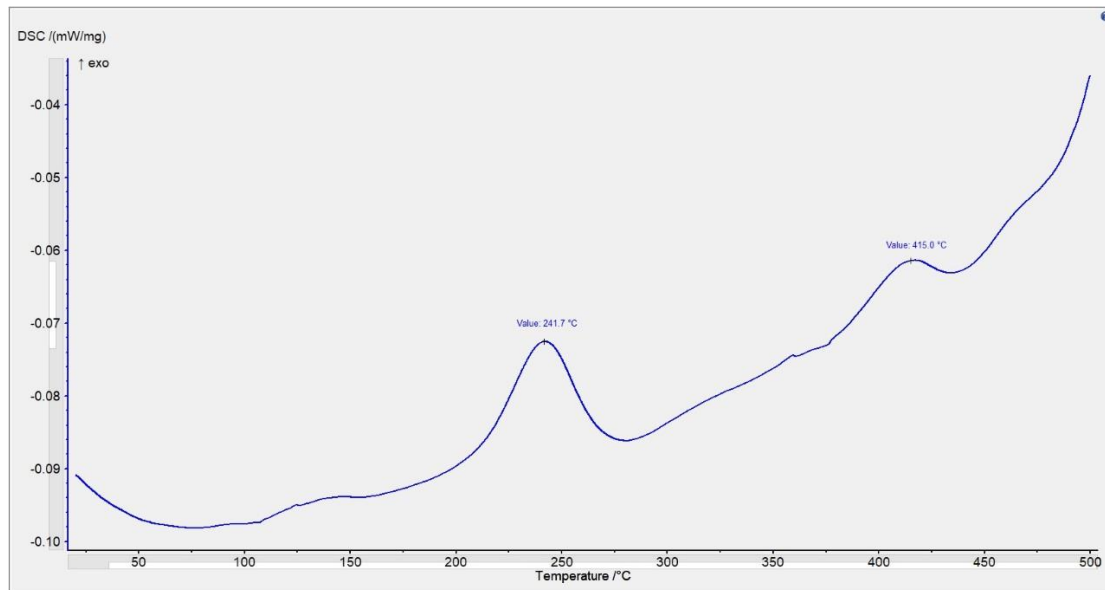
Από τη θέρμανση των δειγμάτων κατά τη διάρκεια της μεθόδου της διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης προκύπτουν οι παρακάτω εξώθερμες καμπύλες. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία που ήδη αναφέρθηκε, η κάθε κορυφή ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο παρατηρείται συμβολίζει και έναν διαφορετικό μετασχηματισμό φάσης.

Υπό αυτό το πρίσμα, στο πρώτο διάγραμμα, όπου το δοκίμιο έχει μηδενική παραμόρφωση και δεν έχει υποστεί τεχνητή γήρανση και επομένως δεν έχει προλάβει να προηγηθεί κάποιος μετασχηματισμός φάσης, μπορούν να παρατηρηθούν όλες οι κορυφές μετασχηματισμών. Έτσι, κοντά στους 50°C η κορυφή που σχηματίζεται αντιστοιχεί στον σχηματισμό των GP zones και κοντά στους 240°C η οξεία κορυφή που σχηματίζεται αντιστοιχεί στον μετασχηματισμό των GP zones στη φάση β''. Έπειτα, κοντά στους 310°C παρατηρείται η κορυφή που υποδηλώνει μετασχηματισμό της β'' φάσης σε β' και γύρω από την περιοχή των 440°C η κορυφή μετασχηματισμού της φάσης β' σε β.



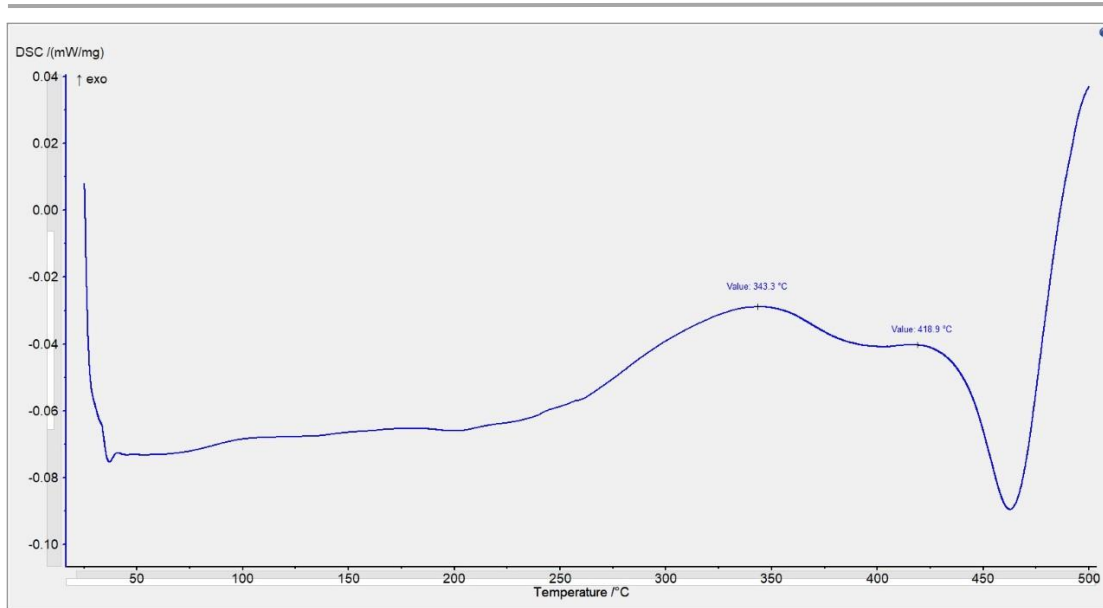
Σχήμα 46 : Καμπύλη DSC για το δοκίμιο Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση)

Στο δεύτερο διάγραμμα, το δοκίμιο T6-10 βρίσκεται στην αρχή της γήρανσης, άρα έχει ξεκινήσει η διαδικασία της κατακρήμνισης η οποία όμως βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Γι' αυτόν το λόγο, παρατηρούνται οι μετασχηματισμοί  $\beta' \rightarrow \beta$  και GP zones  $\rightarrow \beta''$  στα αναμενόμενα θερμοκρασιακά εύρη, αλλά όχι ο σχηματισμός των GP zones μια και έχει ήδη ολοκληρωθεί στην αρχή της γήρανσης.



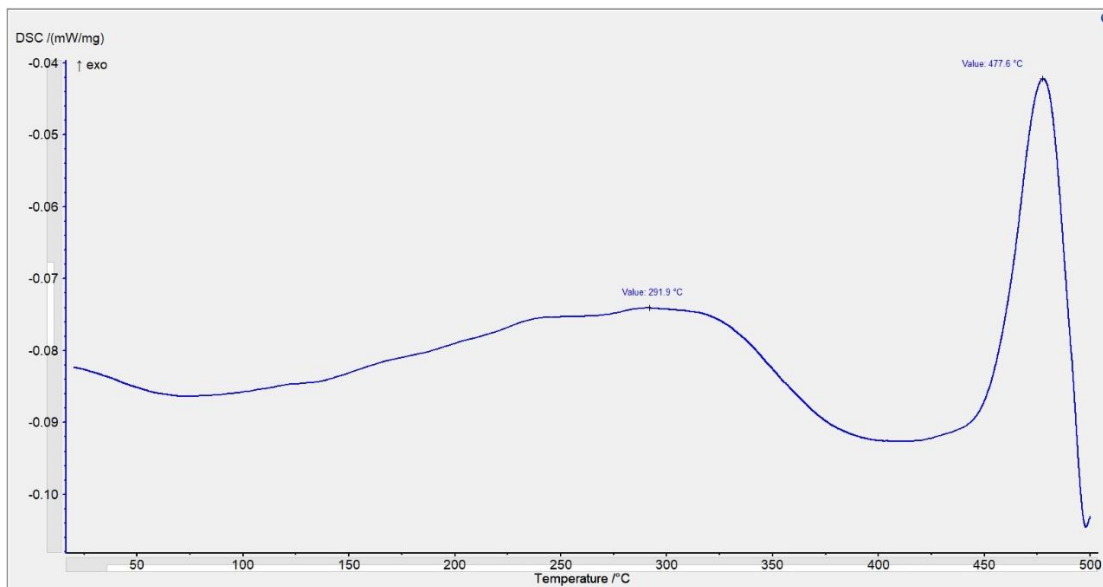
**Σχήμα 47 :** Καμπύλη DSC για το δοκίμιο T6-10 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά)

Στο τρίτο διάγραμμα, το δοκίμιο T8-600 βρίσκεται στην κατάσταση μέγιστης σκληρότητας, άρα η γήρανση έχει προχωρήσει αρκετά, ώστε να έχουν γίνει ήδη οι πρώτοι μετασχηματισμοί φάσεων. Ως επακόλουθο στο διάγραμμα να μπορούν να διακριθούν μόνο ο μετασχηματισμός της  $\beta''$  σε  $\beta'$  και της  $\beta'$  σε  $\beta$ .

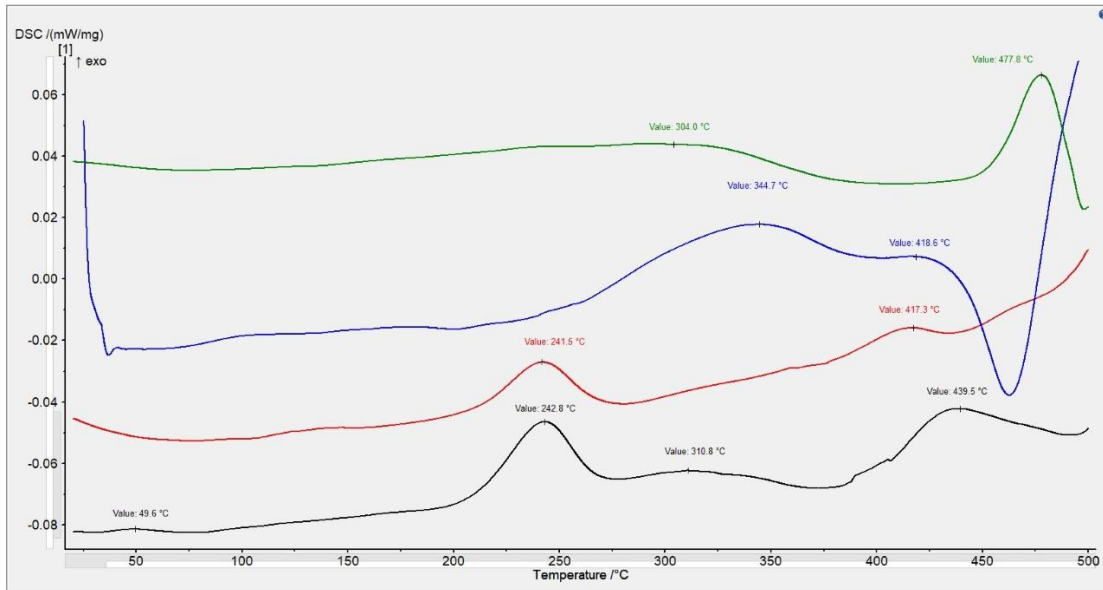


**Σχήμα 48 :** Καμπύλη DSC για το δοκίμιο T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180 °C για 600 λεπτά)

Τέλος, στο διάγραμμα του δοκιμίου T12-600 που βρίσκεται σε κατάσταση υπεργήρανσης, οι περισσότεροι μετασχηματισμοί φάσεων έχουν ήδη ολοκληρωθεί και επομένως όπως αναμένεται δεν υπάρχουν κορυφές, εκτός από εκείνη του σχηματισμού της φάσης β'. Επίσης, στους 478°C απεικονίζεται μια οξεία καμπύλη η οποία ενδεχομένως αντιστοιχεί στο φαινόμενο της επαναδιαλυτοποίησης.



**Σχήμα 49 :** Καμπύλη DSC για το δοκίμιο T12-600 ( 10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 210 °C για 600 λεπτά)



Σχήμα 50 : Σύγκριση καμπυλών DSC για τα 4 δοκίμια μαζί

---

## 5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

---

Προκειμένου να γίνουν αντιληπτά η μεν επίδραση της παραμόρφωσης στην απόκριση της γήρανσης και οι δε συνθήκες της γήρανσης στη σκληρότητα του υπό μελέτη κράματος χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις σκληρότητας, η οπτική μικροσκοπία και η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC). Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων των μεθόδων αυτών δίνει μια σαφέστερη εικόνα στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα και οδηγεί σε βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων με στόχο την καλύτερη επιλογή συνθηκών για την εκάστοτε χρήση του υλικού σε εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Κατ' αρχάς, τα δοκίμια που υπέστησαν παραμορφώσεις είχαν μια μικρή αύξηση στη σκληρότητα λόγω εργοσκληρυνσης πριν ξεκινήσει η γήρανση. Η επίδραση της παραμόρφωσης είναι αισθητή σε όλες τις συνθήκες γήρανσης που μελετήθηκαν και είναι εντονότερη στην αρχή της γήρανσης, ειδικά στους 180 °C και 210 °C, όπου στην αρχή οι αποκλίσεις είναι μεγάλες, αλλά στα 600 λεπτά δεν έχουν μεγαλώσει περαιτέρω.

Επίσης, όσο αυξάνει η θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης, η γήρανση επιταχύνεται, όπως για παράδειγμα στους 210 °C, όπου η σκληρότητα αυξάνεται τάχιστα κατά τα πρώτα λεπτά. Εδώ, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η πολύ μικρή αύξηση της σκληρότητας του δοκιμίου με 10% παραμόρφωση από τα 100 στα 600 λεπτά, επειδή όπως αποδείχθηκε και από την οπτική μικροσκοπία, το δοκίμιο έχει περάσει στο στάδιο της υπεργήρανσης. Δηλαδή, είναι πολύ πιθανό στο διάστημα από 100 έως 600 λεπτά να επιτεύχθηκε η μέγιστη σκληρότητα και στα 600 λεπτά να έχει ήδη αρχίσει να μειώνεται. Αντιθέτως, η σκληρότητα του δοκιμίου με 10% παραμόρφωση φαίνεται να τείνει να αυξηθεί ακόμη και μετά τα 600 λεπτά.

Συνολικά, η μέγιστη σκληρότητα επιτεύχθηκε για γήρανση στους 180 °C για 600 λεπτά, με μικρή βέβαια απόκλιση από την ίδια συνθήκη στους 210 °C. Εξαιρετικής σημασίας είναι επίσης το γεγονός πως στην παραπάνω συνθήκη γήρανσης οι διαφορές στη σκληρότητα μεταξύ των διαφόρων ποσοστών παραμόρφωσης είναι σχετικά μικρές, ιδιαίτερα σε σύγκριση με μικρότερους χρόνους γήρανσης. Αυτό συνεπάγεται ότι σε ένα προφίλ κράματος αλουμινίου 6063 που φέρει διαφόρων βαθμών παραμορφώσεις, δεν θα υπάρξουν μεγάλες διαφορές στη σκληρότητα

συνολικά στον όγκο του υλικού εάν η γήρανσή του πραγματοποιηθεί σε αυτές τις συνθήκες.

Η οπτική μικροσκοπία και η διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης (DSC) επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων. Για παράδειγμα, έπειτα από την προσβολή με υδροφθόριο έγιναν διακριτά τα κατακρημνίσματα που σχηματίστηκαν κυρίως προς το τέλος της γήρανσης, καθώς και οι ζώνες χωρίς κατακρημνίσματα στην συνθήκη της υπεργήρανσης. Επίσης, με την ανάλυση των DSC καμπυλών υποδείχθηκε ποιες φάσεις σχηματίστηκαν σε κάθε ένα από τα δοκίμια.



## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Από τη μελέτη που έγινε για την επίδραση των παραμορφώσεων στην απόκριση κράματος αλουμινίου 6063 κατά τη γήρανση εξάγονται τα συμπεράσματα που ακολουθούν:

- Η μέγιστη τιμή της σκληρότητας παρατηρήθηκε για το δοκίμιο που έφερε αρχική παραμόρφωση 10% και υπέστη τεχνητή γήρανση για 600 λεπτά στους 180°C. Γενικότερα παρατηρήθηκε ότι η αρχική παραμόρφωση διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο σχετικά με την αύξηση της σκληρότητας.
- Στην ίδια συνθήκη τεχνητής γήρανσης, εκτός από τη μέγιστη σκληρότητα, παρατηρήθηκαν και από τις μικρότερες διαφορές σκληρότητας μεταξύ των δοκιμών με διαφορετικά ποσοστά παραμόρφωσης (διαφορά 10HV<sub>1.0</sub> μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής), καθιστώντας τη συνθήκη αυτή την πιο επαρκή από αυτές που μελετήθηκαν για προφίλ αλουμινίου που φέρουν ένα πλήθος διαφορετικών παραμορφώσεων.
- Όσο μεγαλύτερου βαθμού ήταν η παραμόρφωση ενός δοκιμίου και όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία της τεχνητής γήρανσης, τόσο πιο γρήγορη ήταν η σκλήρυνση του δοκιμίου. Το χαρακτηριστικότερο και πιο έντονο παράδειγμα είναι το δοκίμιο που είχε 10% παραμόρφωση και υπέστη τεχνητή γήρανση στους 210 °C όπου η σκληρότητά του μέσα σε 10 μόλις λεπτά αυξήθηκε από 42HV σε 71HV.
- Κατά την τεχνητή γήρανση στους 210°C σημειώθηκαν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές σκληρότητας σε όλα τα δοκίμια στα 600 λεπτά και στο δοκίμιο με 2% παραμόρφωση ακόμη και από τα 100 λεπτά σε σύγκριση με τις μέγιστες τιμές σκληρότητας που επιτεύχθηκαν. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της υπεργήρανσης και σημαίνει πως ξεπεράστηκε το χρονικό ή και θερμοκρασιακό όριο που επιφέρει τις μέγιστες τιμές σκληρότητας.

## 7 ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 1 : Διαμορφωμένο προφίλ αλουμινίου για χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία .....	14
Σχήμα 2 : Σύγκριση δυνατότητας μείωσης βάρους διαφόρων τύπων χάλυβα και κραμάτων αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία [12]. ....	21
Σχήμα 3 : Αποτελέσματα μετρήσεων σκληρότητας έπειτα από διάφορες συνθήκες γήρανσης στην μελέτη των Kolar, Pedersen et al [17]. ....	29
Σχήμα 4 : Μικρογραφίες στο TEM όπου απεικονίζουν στα (a),(b) τα κατακρημνίσματα που υπάρχουν στο κράμα AA6060 έπειτα από γήρανση στους 190°C για 300 λεπτά, με μηδενική παραμόρφωση και στα (c), (d) με παραμόρφωση 10% [17].....	31
Σχήμα 5: Κοπή δοκιμίων από τα προφίλ αλουμινίου με χρήση της πριονοκορδέλας Ergonomic 230.190.....	33
Σχήμα 6: Κοπή δοκιμίων εφελκυσμού με τη χρήση της πρέσας δοκιμίων εφελκυσμού .....	33
Σχήμα 7 : Διεργασία διαλυτοποίησης των δοκιμίων .....	34
Σχήμα 8 : Διεργασία βαφής των δοκιμίων.....	34
Σχήμα 9 : Αριστερά: Παραμόρφωση των δοκιμίων στη μηχανή εφελκυσμού. Δεξιά: Επιμηκυμένα δοκίμια εφελκυσμού μετά το πέρας της διεργασίας.....	35
Σχήμα 10 : Τεχνητή γήρανση δοκιμίων στο φούρνο ανόπτησης των εγκαταστάσεων της ELKEME A.E. ....	36
Σχήμα 11 : Σκληρόμετρο Struers Duramin-40 στις εγκαταστάσεις της ELKEME A.E. .....	38
Σχήμα 12 : Σχεδιασμός των σημείων, στα οποία έγιναν οι μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια τεχνητής γήρανσης. (Σχέδιο από το βιβλίο των Jawaid, Thariq et al[31]).	39
Σχήμα 13 : Σχεδιασμός των σημείων, στα οποία έγιναν οι μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια φυσικής γήρανσης. (Σχέδιο από το βιβλίο των Jawaid, Thariq et al[31]).	39
Σχήμα 14 : Κοπή δειγμάτων οπτικής μικροσκοπίας.....	40
Σχήμα 15 : Εγκιβωτισμός των δειγμάτων.....	41
Σχήμα 16 : Λείανση των εγκιβωτισμένων δειγμάτων .....	42

Σχήμα 17 : Χημική προσβολή με διάλυμα HF .....	43
Σχήμα 18 : Ηλεκτροχημική προσβολή με το διάλυμα Barker's .....	43
Σχήμα 19 : Διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μέτρησης σκληρότητας κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης. ....	48
Σχήμα 20 : Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με μηδενική παραμόρφωση. ....	51
Σχήμα 21 : Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 2%.....	54
Σχήμα 22 : Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 5%.....	57
Σχήμα 23 : Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 10%.....	60
Σχήμα 24 : Διάγραμμα σύγκρισης της επίδρασης κάθε ποσοστού παραμόρφωσης στη σκληρότητα για τεχνητή γήρανση στους 150°C .....	61
Σχήμα 25 : Διάγραμμα σύγκρισης της επίδρασης κάθε ποσοστού παραμόρφωσης στη σκληρότητα για τεχνητή γήρανση στους 180°C .....	61
Σχήμα 26 : Διάγραμμα σύγκρισης της επίδρασης κάθε ποσοστού παραμόρφωσης στη σκληρότητα για τεχνητή γήρανση στους 210°C .....	62
Σχήμα 27 : Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's. ....	63
Σχήμα 28 : Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's. ....	64
Σχήμα 29 : Μικροδομή δοκιμίου T6-600 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's. ....	64
Σχήμα 30 : Μικροδομή δοκιμίου T6-600 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's. ....	65
Σχήμα 31 : Όρια κόκκων στο δοκίμιο T6-600 (σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος Barker's). ....	65
Σχήμα 32 : Μικροδομή δοκιμίου T7-10 (5% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's. ....	66

---

Σχήμα 33 : Μικροδομή δοκιμίου T7-10 (5% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's.	66
.....	66
Σχήμα 34 : Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x5 και με προσβολή διαλύματος Barker's.	67
.....	67
Σχήμα 35 : Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x10 και με προσβολή διαλύματος Barker's.	67
.....	67
Σχήμα 36 : Γραμμές ολίσθησης (slip lines) στους κόκκους του δοκιμίου T8-600 σε μεγέθυνση x20 και με προσβολή διαλύματος Barker's.	68
.....	68
Σχήμα 37 : Γραμμές ολίσθησης (slip lines) σε κόκκο του δοκιμίου T8-600 σε μεγέθυνση x50 μετά από προσβολή διαλύματος Barker's.	68
.....	68
Σχήμα 38 : Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	69
.....	69
Σχήμα 39 : Μικροδομή δοκιμίου Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	70
.....	70
Σχήμα 40 : Μικροδομή δοκιμίου T6-10 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	71
.....	71
Σχήμα 41 : Μικροδομή δοκιμίου T6-10 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	71
.....	71
Σχήμα 42 : Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	72
.....	72
Σχήμα 43 : Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	73
.....	73
Σχήμα 44 : Μικροδομή δοκιμίου T12-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 210°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x50 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).	74
.....	74

---

Σχήμα 45 : Μικροδομή δοκιμίου T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 210°C για 600 λεπτά) σε μεγέθυνση x100 και με προσβολή διαλύματος υδροφθορίου (HF).....	74
Σχήμα 46 : Καμπύλη DSC για το δοκίμιο Φ1 (0% παραμόρφωση και φυσική γήρανση) .....	75
Σχήμα 47 : Καμπύλη DSC για το δοκίμιο T6-10 (2% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180°C για 10 λεπτά).....	76
Σχήμα 48 : Καμπύλη DSC για το δοκίμιο T8-600 (10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 180 °C για 600 λεπτά).....	77
Σχήμα 49 : Καμπύλη DSC για το δοκίμιο T12-600 ( 10% παραμόρφωση και τεχνητή γήρανση στους 210 °C για 600 λεπτά).....	77
Σχήμα 50 : Σύγκριση καμπυλών DSC για τα 4 δοκίμια μαζί .....	78

## 8 ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Κωδικοποίηση κραμάτων διαμόρφωσης αλουμινίου .....	18
Πίνακας 2 : Κωδικοποίηση χυτών κραμάτων αλουμινίου.....	18
Πίνακας 3 : Κωδικοποίηση κατεργασιών που έχει υποστεί ένα κράμα αλουμινίου [11] .....	19
Πίνακας 4 : Εφαρμογές κραμάτων αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία [15,16]	22
Πίνακας 5 : Τυπική χημική σύσταση κράματος 6063 [44].....	32
Πίνακας 6 : Αριθμός δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν και ονοματολογία τους .....	36
Πίνακας 7 : Διαφορετικές συνθήκες τεχνητής γήρανσης .....	37
Πίνακας 8 : Συνθήκες φυσικής γήρανσης στις οποίες μετρήθηκε η σκληρότητα .....	38
Πίνακας 9 : Ονοματολογία των δειγμάτων που προετοιμάστηκαν για οπτική μικροσκοπία.....	40
Πίνακας 10 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με μηδενική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης.....	46
Πίνακας 11 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 2% κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης.....	47
Πίνακας 12 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 10% κατά τη διάρκεια της φυσικής γήρανσης.....	47
Πίνακας 13 : Απεικόνιση των μέσων τιμών σκληρότητας κατά τη φυσική γήρανση συνολικά .....	47
Πίνακας 14 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 0% μετά από γήρανση στους 150°C .....	49
Πίνακας 15 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 0% μετά από γήρανση στους 180°C .....	49
Πίνακας 16 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 0% μετά από γήρανση στους 210°C .....	50
Πίνακας 17 : Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 0% ..	50
Πίνακας 18 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 2% μετά από γήρανση στους 150°C .....	52
Πίνακας 19 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 2% μετά από γήρανση στους 180°C .....	52
Πίνακας 20 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμών με παραμόρφωση 2% μετά από γήρανση στους 210°C .....	53

Πίνακας 21 : Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 2% ..	53
Πίνακας 22 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 5% μετά από γήρανση στους 150°C .....	55
Πίνακας 23 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 5% μετά από γήρανση στους 180°C .....	55
Πίνακας 24 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 5% μετά από γήρανση στους 210°C .....	56
Πίνακας 25 : Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 5% ..	56
Πίνακας 26 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% μετά από γήρανση στους 150°C .....	58
Πίνακας 27 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% μετά από γήρανση στους 180°C .....	58
Πίνακας 28 : Μετρήσεις σκληρότητας δοκιμίων με παραμόρφωση 10% μετά από γήρανση στους 210°C .....	59
Πίνακας 29 : Μέσες μετρήσεις σκληρότητας για τα δοκίμια με παραμόρφωση 10%	59

## 9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Juan C. Gonzalez Palencia, Takaaki Furubayashi, Toshihiko Nakata, “Energy use and CO2 emissions reduction potential in passenger car fleet using zero emission vehicles and lightweight materials”, *Energy*, Vol. 48, Issue 1, pages 548-565, December 2012
- [2] Gerald Anyasodor, Christian Koroschetz, “ Industrial based volume manufacturing of lightweight aluminium alloy panel components with high-strength and complex-shape for car body and chassis structures”, *Journal of Physics Conference Series*, September 2017
- [3] Dr. Fatmagul Tolun, Balikesir university, «Use of aluminum alloys in automotive industry”, *Fifth International Mediterranean Congress on Natural Sciences, Health Sciences and Engineering (MENSEC V) 2019*
- [4] Μουζούλας Κωνσταντίνος, «Μηχανικές κατεργασίες κράματος αλουμινίου 7075», Διπλωματική εργασία, Σχολή μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2012
- [5] Σπυριδοπούλου Σοφία, «Ομογενοποίηση μιγμάτων του κράματος Al6060 σε θερμοκρασίες 570, 580, 590 °C και χαρακτηρισμός του υλικού», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2016
- [6] Σπυρίδωνας Παπαευθυμίου, «Τεχνολογία Υλικών», Ίδρυμα Ευγενίδου, Β' Έκδοση 2017, σελ. 53, 84
- [7] William D. Callister JR., David G. Rethwisch, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών», Εκδόσεις Τζιόλα, 9<sup>η</sup> Έκδοση, 2016, σελ. 447-449
- [8] Musfirah A. H., Jaharah A. G., “Magnesium and aluminum alloys in automotive industry”, *Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 8, pages 4865-4875, 2012
- [9] J. Gilbert Kaufman, “Introduction to aluminum alloys and tempers”, *ASM International*, 2000, σελ. 10
- [10] J. Davis, *ASM Specialty Handbook, Aluminum and aluminum alloys*, Materials Park, OH: ASM International, 1993, σελ. 18



- [11] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντελής «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών» 2η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008, Σελ.561-574
- [12] M. Tisza, Zs Lukacs, “High strength aluminum alloys in car manufacturing”, IOP Conference series: Materials Science and Engineering 418, 2018
- [13] Drive aluminm (American Aluminum Association)  
[https://1pp2jy1h0dtm6dg8i11qjfb1-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2022/01/Automotive-Aluminum-Roadmap\\_FINAL-1.pdf](https://1pp2jy1h0dtm6dg8i11qjfb1-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2022/01/Automotive-Aluminum-Roadmap_FINAL-1.pdf)
- [14] Modern materials for car industry [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66438/1/Hovorun\\_Berladir\\_Pererva\\_JES\\_2017\\_4\\_2\\_F8-F18.pdf;jsessionid=FBC402E4E529A68958C0040F01869760](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66438/1/Hovorun_Berladir_Pererva_JES_2017_4_2_F8-F18.pdf;jsessionid=FBC402E4E529A68958C0040F01869760)
- [15] “Aluminum in cars”, άρθρο από την ιστοσελίδα της εταιρίας “Kloeckner metals”: <https://www.kloecknermetals.com/blog/aluminum-in-cars/>
- [16] “Aluminum alloys in automotive industry”, άρθρο από την ιστοσελίδα «Aluminum insider»: <https://aluminiuminsider.com/aluminium-alloys-automotive-industry-handy-guide/>
- [17] Kolar, M., Pedersen, K. O., Gulbrandsen-Dahl, S., Teichmann, K., & Marthinsen, K. (2011). Effect of pre-deformation on mechanical response of an artificially aged Al-Mg-Si alloy. *Materials transactions*, 52(7), 1356-1362
- [18] Kolar, M., Pedersen, K. O., Gulbrandsen-Dahl, S., Brüggemann, T., & Marthinsen, K. (2010). The effect of deformation on the work hardening behaviour after aging of two commercial Al-Mg-Si alloys. In *Materials Science Forum* (Vol. 638, pp. 261-266). Trans Tech Publications Ltd
- [19] Teichmann, K., Marioara, C. D., Pedersen, K. O., Gulbrandsen-Dahl, S., Kolar, M., Andersen, S. J., & Marthinsen, K. (2010). The effect of deformation on the precipitation behaviour of an AlMgSi alloy A HRTEM study. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Aluminum Alloys 2010*, Yokohama, Japan, pp. 1027-1032.
- [20] Mukhopadhyay, P. (2012). Alloy designation, processing, and use of AA6XXX series aluminium alloys. *International Scholarly Research Notices*, 2012

- [21] Esezobor, D.E., Adeosun, S.O., (2006). Improvement on the strength of 6063 aluminum alloy by means of solution heat treatment, *Materials Science and Technology (MS&T)*, 645-655
- [22] 6xxx alloys: Optimized heat treatment sequences for unique customer benefits  
[https://www.amag-al4u.com/fileadmin/user\\_upload/amag/Downloads/AluReport/EN/AR-2009-3-EN-AR\\_3\\_09\\_EN\\_6xxx.pdf](https://www.amag-al4u.com/fileadmin/user_upload/amag/Downloads/AluReport/EN/AR-2009-3-EN-AR_3_09_EN_6xxx.pdf)
- [23] Zhong, H., Rometsch, P., & Estrin, Y. (2014). Effect of alloy composition and heat treatment on mechanical performance of 6xxx aluminum alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 2174-2178
- [24] Baruah, M., & Borah, A. (2020). Processing and precipitation strengthening of 6xxx series aluminium alloys: A review. *International Journal of Materials Science*, 1(1), 40-48
- [25] Kolar, Ketill Olav Pedersen, Sverre Gulbrandsen-Dahl, Knut Marthinsen (2012). Combined effect of deformation and artificial aging on mechanical properties of Al–Mg–Si Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 22, Issue 8
- [26] Kolar, M., Pedersen, K. O., Gulbrandsen-Dahl, S., & Marthinsen, K. (2012). Effect of simultaneous deformation and artificial ageing on the mechanical properties of an Al–Mg–Si alloy. *International journal of materials research*, 103(8), 962-971
- [27] Garrett, R. P., Lin, J., & Dean, T. A. (2005). An investigation of the effects of solution heat treatment on mechanical properties for AA 6xxx alloys: experimentation and modelling. *international Journal of Plasticity*, 21(8), 1640-1657.
- [28] Nandy, S., Bakkar, M. A., & Das, D. (2015). Influence of ageing on mechanical properties of 6063 al alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1234-1242.
- [29] T. Sheppard, *Extrusion of Aluminum Alloys* book, Processing of aluminum alloys, pp 253-322
- [30] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, «Γενική Μεταλλογνωσία Ι», Αθήνα 1989
- [31] Jawaid, M., Thariq, M., & Saba, N. (Eds.). (2018). *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites*. Woodhead Publishing. Pp 81-102.
-

[32] Quainoo, G. K., & Yannacopoulos, S. (2004). The effect of prestrain on the natural aging and fracture behaviour of AA6111 aluminum. *Journal of materials science*, 39(15), 4841-4847.

[33] Dutkiewicz, J., & Litynska, L. (2002). The effect of plastic deformation on structure and properties of chosen 6000 series aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 324(1-2), 239-243.

[34] Birol, Y. (2005). Pre-straining to improve the bake hardening response of a twin-roll cast Al–Mg–Si alloy. *Scripta Materialia*, 52(3), 169-173.

[35] Σ. Παπαευθυμίου, Κατεργασίες διαμόρφωσης μετάλλων, Σημειώσεις Διαλέξεων Μεταλλοτεχνίας, 1<sup>η</sup> έκδοση 2021

[36] Edwards, G. A., Stiller, K., Dunlop, G. L., & Couper, M. J. (1998). The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta materialia*, 46(11), 3893-3904.

[37] Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., & Picu, R. C. (2010). Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Materials & Design*, 31(2), 972-975.

[38] Yilmazoğlu, G., Doruk, E., Ayaz, Z., Başer, T., & Durgun, İ. The Effect of Heat Treatment Parameters on the Mechanical Properties and Crashworthiness of AA6082 Extruded Profiles.

[39] Koumarioti, I., Ping, S., Vazdirvanidis, A., Pantazopoulos, G., & Zormalia, S. (2010, September). Influence of Homogenizing and Ageing Practices on Microstructure and Dynamic Compression of Crash Relevant Al-Alloy Extrusions. In *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*, The Japan Institute of Light Metals, Yokohama, Japan (pp. 5-9).

[40] Hawas, M. N. (2013). Effect of Ageing Time on Adhesive Wear of AL Alloy AA6061-T6. *journal of kerbala university*, 11(4), 145-152.

[41] Βαζδιρβανίδης Α., «Μελέτη των θερμικών κατεργασιών προϊόντων διέλασης βιομηχανικών κραμάτων αλουμινίου σειράς 6xxx με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μηχανικής αντοχής και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας (crashworthiness)», διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2016

[42] Ν. Τζαμτζής-Πιλάλης, Αναλυτική Χημεία (Φυσικές Μέθοδοι Ανάλυσης), ΕΜΠ, Αθήνα 2009

[43] A. Vazdirvanidis, G. Pantazopoulos, N. Kolioubas, S. Papadopoulou, M. Katsivarda, A. Rikos, and E. Spyropoulou, “Investigation of the effect of homogenization practice on the microstructure of 6060 and 6082 series alloy billets”, Proceedings of the 16th International Aluminum Alloys Conference (ICAA16) 2018

[44] Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6063 - T6 Extrusions

[https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6063-T6-Extrusions\\_158.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6063-T6-Extrusions_158.ashx)

[45] Woźnicki, A., Leśniak, D., Włoch, G., Leszczyńska-Madej, B., & Wojtyna, A. (2015). The effect of homogenization conditions on the structure and properties of 6082 alloy billets. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60.

[46] Rinderer, B. (2011). The metallurgy of homogenisation. In *Materials Science Forum* (Vol. 693, pp. 264-275). Trans Tech Publications Ltd.