



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ  
ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΙ ΜΕΣΑΙΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 6xxx**

υπό  
**ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΑΡΒΑΝΙΤΗ**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2021

© 2021 Αθανάσιος Αρβανίτης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Γρηγόριος Ν. Χαΐδεμενόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Αλέξιος Κερμανίδης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Ελένη Καμούτση Τεχνική υποστήριξη εργαστηρίου Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γρηγόριο Ν. Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη και έγκαιρη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλέξιο Κερμανίδη και την κ. Ελένη Καμούση στην τεχνική υποστήριξη του εργαστηρίου Υλικών, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου.

Ευχαριστώ τους στενούς μου φίλους/ες, οι οποίοι είναι δίπλα μου όταν τους χρειάζομαι και έχω την υποστήριξη τους, και μερικοί/ες εκ των οποίων είναι και συνάδελφοι μου.

Τέλος, εξέχουσα σημασία είχε, έχει και θα έχει η ηθική, ψυχολογική και υλική υποστήριξη των γονέων μου Αγγλαΐας και Χρυσοστόμου, καθώς και του αδερφού μου Παναγιώτη και τους ευχαριστώ ολόψυχα για την ανιδιοτελή αγάπη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

# ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΙ ΜΕΣΑΙΑΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 6xxx

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΑΡΒΑΝΙΤΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόριος Ν. Χαϊδεμενόπουλος,  
Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας

## Περίληψη

Τα κράματα της σειράς 6xxx χρησιμοποιούνται ευρέως σε αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, όπου η αντοχή είναι η κύρια απαίτηση. Πλέον, έχει ξεκινήσει η εισαγωγή τους στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται και στην αύξηση της ολκιμότητας. Η επίδραση της θερμικής κατεργασίας γήρανσης, στη συσχέτιση της αντοχής και της ολκιμότητας, είναι το επίκεντρο της παρούσας μελέτης. Αρχικά γίνεται η προσπάθεια συσχέτισης της αντοχής και της ολκιμότητας, μέσα από τιμές πειραμάτων εφελκυσμού σε διαφορετικές θερμικές κατεργασίες και θερμικές κατεργασίες γήρανσης, ξεχωριστά για το κράμα 6060, όπως και για το κράμα 6063. Στη συνέχεια συγκρίνεται το σύνολο των τιμών του κράματος 6060, με εκείνο του κράματος 6063, για τις περιπτώσεις διέλασης με θερμική κατεργασία τεχνητής γήρανσης. Η ολκιμότητα έχει τάση γραμμικής μείωσης με το όριο διαρροής αλλά και με τη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού, και για τα δύο κράματα, με προηγούμενες μελέτες να υποδεικνύουν το ίδιο για το όριο διαρροής σε κράματα της σειράς 6xxx. Επίσης, το κράμα 6060 έχει καλύτερη ολκιμότητα από το 6063, ενώ το κράμα 6063 έχει καλύτερη αντοχή. Τέλος, συζητιούνται οι κύριες εφαρμογές αυτών των κραμάτων στα αυτοκίνητα, οι οποίες απαιτούν επαρκή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, και αυτό σημαίνει συνδυαστικά καλύτερη αντοχή και ολκιμότητα, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλες τεχνικές και παρεμβάσεις τόσο στην χημική σύσταση, όσο και στις κατεργασίες που εφαρμόζονται.

# **CORRELATION BETWEEN STRENGTH AND DUCTILITY OF LOW AND MEDIUM STRENGTH 6xxx SERIES ALUMINIUM ALLOYS**

ATHANASIOS ARVANITIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2021

Supervisor: Dr. Gregory N. Haidemenopoulos

Professor of Physical Metallurgy

## **Abstract**

The 6xxx series alloys are widely used in architectural and structural applications, where strength is the main requirement. Nowadays, the introduction of these alloys to the automotive industry, has begun, with interest being focused on increasing ductility as well. The effect of aging heat treatment on the correlation of strength and ductility, is the focal point of the current thesis. Initially, there is an attempt to correlate strength and ductility, through values from tensile tests for different heat treatments and ageing heat treatments, separately for 6060 alloy, as well as for 6063 alloy. Then the number of values of 6060 alloy, is being compared to that of 6063, in cases of extrusions subjected to artificial aging heat treatment. Ductility tends to decrease linearly with yield strength and ultimate tensile strength, for both alloys, with previous studies indicating similar results for yield strength in 6xxx series alloys. Moreover, alloy 6060 has better ductility than 6063, while 6063 has better strength. Finally, main automotive applications of these alloys are being discussed, which require adequate energy absorption abilities. This means, simultaneously enhanced strength and ductility, that can be achieved through proper techniques and interventions, both in chemical composition and the processes applied.

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Αλουμίνιο .....	1
1.1.1 Θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου 6xxx.....	2
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	5
Κεφάλαιο 2 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων-Συνήθης επεξεργασία των κραμάτων 6xxx .....	6
2.1 Κύρια κραματικά στοιχεία.....	7
2.2 Δευτερεύοντα κραματικά στοιχεία.....	9
2.3 Βασικές κατεργασίες για διελάσιμα κράματα .....	10
2.3.1 Γήρανση.....	12
2.4 Κατεργασίες μεταλλικών φύλλων στην αυτοκινητοβιομηχανία .....	14
Κεφάλαιο 3 Ιδιότητες .....	16
3.1 Κράμα αλουμινίου 6060 .....	18
3.1.1 Αντοχή και ολκιμότητα για το θερμικά κατεργάσιμο κράμα 6060 .....	19
3.2 Κράμα αλουμινίου 6063 .....	21
3.2.1 Αντοχή και ολκιμότητα για το θερμικά κατεργάσιμο κράμα 6063 .....	22
Κεφάλαιο 4 Σχολιασμός .....	25
4.1 Συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 και 6063 .....	25
4.2 Τρόποι βελτίωσης των ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 και 6063 .....	29
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα .....	32
Βιβλιογραφία.....	34

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Σύστημα προδιορισμού κατειργασμένων κραμάτων αλουμινίου. ....	2
Πίνακας 3.1 Τιμές του Ορίου διαρροής και της ολκιμότητας του κράματος 6060.....	19
Πίνακας 3.2 Τιμές του Ορίου διαρροής και της ολκιμότητας του κράματος 6063. ....	22
Πίνακας 4.1 Μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 και 6063 για κατεργασία T6.....	27



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Περιπτώσεις κατασκευών με αλουμίνιο. ....	4
Εικόνα 1.2 Εξαρτήματα αλουμινίου για εφαρμογές σε αυτοκίνητα. ....	5
Εικόνα 2.1 Εύρη συστάσεων σε Μαγνήσιο και Πυρίτιο για τα κράματα 6060 και 6063. ....	6
Εικόνα 2.2 Στερεή διαλυτότητα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για διμερή κράματα αλουμινίου σε θερμοδυναμική ισορροπία. ....	7
Εικόνα 2.3 Ψευδοδιμερές Διάγραμμα φάσης Al-Mg <sub>2</sub> Si με ευτηκτική σύσταση 13,9 % κατά βάρος. ....	9
Εικόνα 2.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου για τυπικές κατεργασίες ενός κράματος της σειράς 6xxx. ....	12
Εικόνα 2.5 Διάγραμμα Σκληρότητας με τον χρόνο για τέσσερα πειραματικά κράματα. ....	13
Εικόνα 2.6 Συστατικά μέρη από αλουμίνιο στο μοντέλο A2 της εταιρείας Audi. ....	15
Εικόνα 3.1 Η αλληλεπίδραση μεταξύ της κατεργασίας, της δομής και των ιδιοτήτων των μεταλλικών υλικών. ....	16
Εικόνα 3.2 Διαγράμματα παραμορφώσεως στην θραύση εf σε συνάρτηση με το Α) Όριο διαρροής $\sigma_y$ και τη Β) Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού $\sigma_{uts}$ του κράματος 6060. ....	20
Εικόνα 3.3 Ραβδόγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων για διάφορες κατεργασίες του κράματος 6060. ....	21
Εικόνα 3.4 Διαγράμματα παραμορφώσεως στην θραύση εf σε συνάρτηση με το Α) Όριο διαρροής $\sigma_y$ και τη Β) Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού $\sigma_{uts}$ του κράματος 6063. ....	23
Εικόνα 3.5 Ραβδόγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων για διάφορες κατεργασίες του κράματος 6063. ....	24
Εικόνα 4.1 Διαγράμματα των κραμάτων 6060-6063 παραμορφώσεως στη θραύση εf και Α) Ορίου διαρροής $\sigma_y$ και Β) Μέγιστης αντοχής εφελκυσμού $\sigma_{uts}$ . ....	26
Εικόνα 4.2 Ραβδόγραμμα με τις μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα κράματα 6060 και 6063 για κατεργασία T6. ....	27
Εικόνα 4.3 Μηχανικές ιδιότητες διελάσιμων προφίλ του κράματος 6060 κατά EN 755-2 ..	28
Εικόνα 4.4 Μηχανικές ιδιότητες διελάσιμων προφίλ του κράματος 6063 κατά EN 755-2. ....	28

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

---

Τα τελευταία χρόνια έχει ενταθεί η χρήση των διελάσιμων κραμάτων αλουμινίου της σειράς 6xxx στην αυτοκινητοβιομηχανία, πέραν της ευρείας εφαρμογής τους στην κατασκευή προφίλ για αρχιτεκτονικούς σκοπούς. Από όλες τις σειρές αλουμινίων, η 6xxx, είναι η πιο κοινή όταν πρόκειται για διέλαση, λόγω του συνδυασμού της αντοχής, των υψηλών ταχυτήτων κατεργασίας, και της υψηλής ποιότητας επιφανείας που επιτυγχάνεται με αυτά. Τα κράματα 6060 και 6063, παράγονται σε μεγαλύτερο βαθμό με διέλαση, από τα κράματα της σειράς 6xxx, λόγω της χαμηλότερης ποσότητας κραματικών στοιχείων που περιέχουν. Η ανάγκη μείωσης των ρύπων είναι ένα επίκαιρο πρόβλημα και επιτυγχάνεται με τη μείωση του βάρους, εισάγοντας κράματα αλουμινίου στα αυτοκίνητα. Επίσης ανακυκλώνονται, συμβάλλοντας και στην οικονομία. Για την εφαρμογή τους επομένως, γίνονται πολλές μελέτες που αφορούν τις ιδιότητες αυτών των κραμάτων.

### 1.1 Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο εντοπίζεται στην τρίτη ομάδα του περιοδικού πίνακα, έχει ατομική μάζα 26,98 και πυκνότητα 2,7 περίπου ( $\text{kg/m}^3$ ). Είναι από τα πιο διαδεδομένα μέταλλα που υπάρχουν στον φλοιό της Γής και δεν συναντάται ελεύθερο αλλά σε ενώσεις. Είναι ελαφρό, κατεργάζεται εύκολα και έχει σημείο τήξης τους 660 °C. Έχει καλή αντίσταση στην διάβρωση λόγω του προστατευτικού στρώματος οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνειά του. Είναι επίσης μαλακό και έχει χαμηλή αντοχή σε σχέση με μέταλλα όπως ο σίδηρος. Για αυτό τον λόγο κραμάνεται και με άλλα στοιχεία που μπορούν να βελτιώσουν τις ιδιότητες του. Τα κράματα του έχουν μεγάλη ζήτηση σε αεροναυπηγικές, κατασκευαστικές και εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας [1]. Σύμφωνα με το διεθνές σύστημα προσδιορισμού κραμάτων (IADS), το οποίο είναι ένα 4-ψήφιο σύστημα, κατηγοριοποιούνται τα κράματα αλουμινίου, τα οποία διακρίνονται σε κατεργασμένα (wrought) και χυτά (casting). Τα κράματα της σειράς 6xxx δεν χρησιμοποιούνται ευρέως ως χυτά, και επομένως στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ομάδες των κατεργασμένων κραμάτων. Για τα κράματα 2xxx έως 8xxx, το πρώτο ψηφίο ορίζει την ομάδα του κράματος,

το δεύτερο υποδηλώνει παραλλαγές του αρχικού κράματος εάν παίρνει τιμές από 1 έως 9, και τα δύο τελευταία, απλώς καθορίζουν τα διαφορετικά κράματα. Στη σειρά 1xxx, το δεύτερο ψηφίο καταδεικνύει αν υπάρχει ή όχι έλεγχος των «ακαθαρσιών», και τα δύο τελευταία σχετίζονται με το ελάχιστο ποσοστό αλουμινίου [2].

**Πίνακας 1.1** Σύστημα προδιορισμού κατεργασμένων κραμάτων αλουμινίου [3].

99.00% (ελάχιστο) αλουμίνιο	1XXX
Χαλκός	2XXX
Μαγγάνιο	3XXX
Πυρίτιο	4XXX
Μαγνήσιο	5XXX
Μαγνήσιο και Πυρίτιο	6XXX
Ψευδάργυρος	7XXX
Άλλα	8XXX

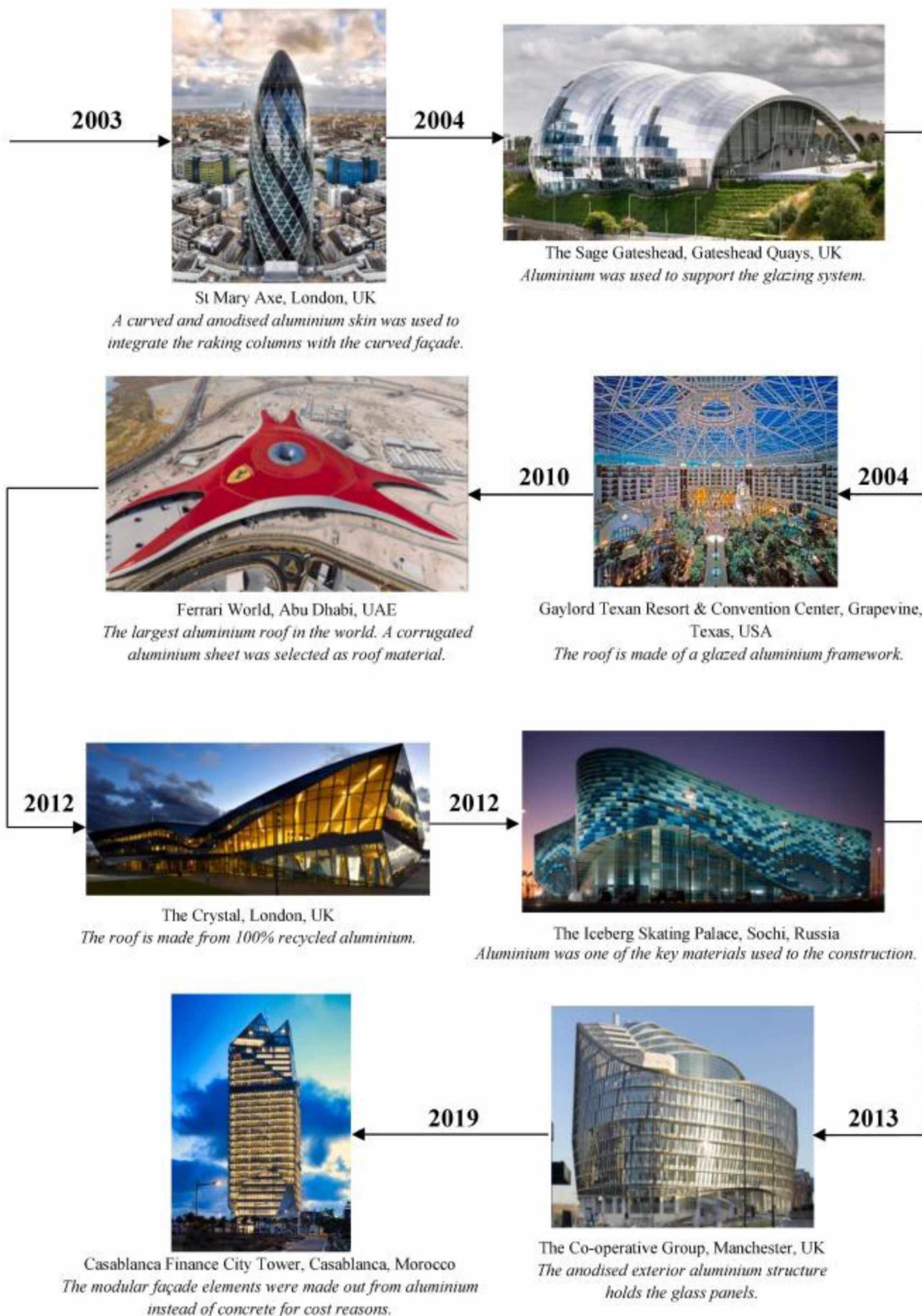
### 1.1.1 Θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου 6xxx

Από τα κράματα αλουμινίου θερμικά κατεργάσιμα, γενικώς, είναι τα 2xxx, 6xxx, και 7xxx. Αυτά τα κράματα, ισχυροποιούνται κατά κύριο λόγο, με σωματίδια καθίζησης, τα οποία σχηματίζονται κατά τις διεργασίες θέρμανσης και ψύξης. Οι τυποποιήσεις των θερμικών κατεργασιών αποτελούν μέρος του διεθνούς συστήματος προσδιορισμού κραμάτων, ξεκινάνε με το γράμμα T, ακολουθούμενο από έναν αριθμό, και συνοψίζονται παρακάτω [2]:

- T1: Ψύξη από υψηλής θερμοκρασίας κατεργασία διαμόρφωσης και φυσική γήρανση σε σταθερή κατάσταση.
- T2: Ψύξη από υψηλής θερμοκρασίας κατεργασία διαμόρφωσης, ψυχρηλασία και φυσική γήρανση σε σταθερή κατάσταση.
- T3: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, ψυχρηλασία και φυσική γήρανση σε σταθερή κατάσταση.
- T4: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και φυσική γήρανση σε σταθερή κατάσταση.

- T5: Ψύξη από υψηλής θερμοκρασίας κατεργασία διαμόρφωσης και τεχνητή γήρανση.
- T6: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και τεχνητή γήρανση.
- T7: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και υπεργήρανση.
- T8: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, ψυξηλασία και τεχνητή γήρανση.
- T9: Θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, τεχνητή γήρανση και ψυξηλασία.
- T10: Ψύξη από υψηλής θερμοκρασίας κατεργασία διαμόρφωσης, ψυξηλασία και τεχνητή γήρανση.

Τα κύρια κραματικά στοιχεία στη σειρά 6xxx είναι το Μαγνήσιο (Mg) και το Πυρίτιο (Si). Σε κράματα Al-Mg-Si με χαμηλή προσθήκη χαλκού (Cu) ή χωρίς, έχει προταθεί η ακόλουθη σειρά καθίζησης: υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα (SSSS) → Ομάδες ατόμων Μαγνησίου, Πυριτίου → Ζώνες Γκινιέρ-Πρέστον (GP) → β'' (Al<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>) → β' (Mg<sub>9</sub>Si<sub>5</sub>), U1, U2, B' → β (Mg<sub>2</sub>Si), Si. Το ίζημα β'', έχει βελονοειδές σχήμα και είναι το κύριο ίζημα ισχυροποίησης που ευθύνεται για την μεγάλη αντοχή, εμποδίζοντας έντονα την κίνηση των γραμμοαταξιών [4]. Η διέλαση αυτών των κραμάτων επιτυγχάνεται εύκολα. Έτσι τα δύο-τρίτα των διελασίμων προϊόντων είναι από αλουμίνιο και το 90 % αυτών είναι από αλουμίνιο 6xxx [5]. Κατ' εξοχήν, αυτά τα κράματα χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα, λόγω της αντοχής που μπορούν να προσφέρουν, του βάρους τους και της καλής τους τελικής επιφάνειας (φινίρισμα). Τα ανερχόμενα οικολογικά προβλήματα που έχουν προκύψει τα τελευταία χρόνια, δημιούργησαν την ανάγκη κατασκευής ελαφριών οχημάτων για περιορισμό των ρύπων. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με τα κράματα 6xxx, τα οποία είναι θερμοσκληρυνόμενα, έχουν εξαιρετική ικανότητα για διέλαση και καλή αντίσταση στην διάβρωση. Η διελασιμότητα ή ικανότητα για διέλαση, καθορίζεται από τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί στην κατεργασία αυτή, ακριβώς πριν την εμφάνιση επιφανειακών ατελειών [6]. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η ικανότητα παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας κατά την κρούση είναι σχεδιαστικό κριτήριο και η αντοχή σε συνδυασμό με την ολκιμότητα, καθορίζουν αυτήν την ικανότητα [7]. Επιπλέον, είναι συμφέροντα και από οικονομικής απόψεως, καθώς η επεξεργασία του αλουμινίου για κατασκευαστικές εφαρμογές, έχει λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις σε σύγκριση με τους χάλυβες και έχει 100% ανακυκλωσιμότητα [8]. Στις Εικόνες 1.1 και 1.2 φαίνονται μερικές χρήσεις του αλουμινίου.



**Εικόνα 1.1** Περιπτώσεις κατασκευών με αλουμίνιο [8].



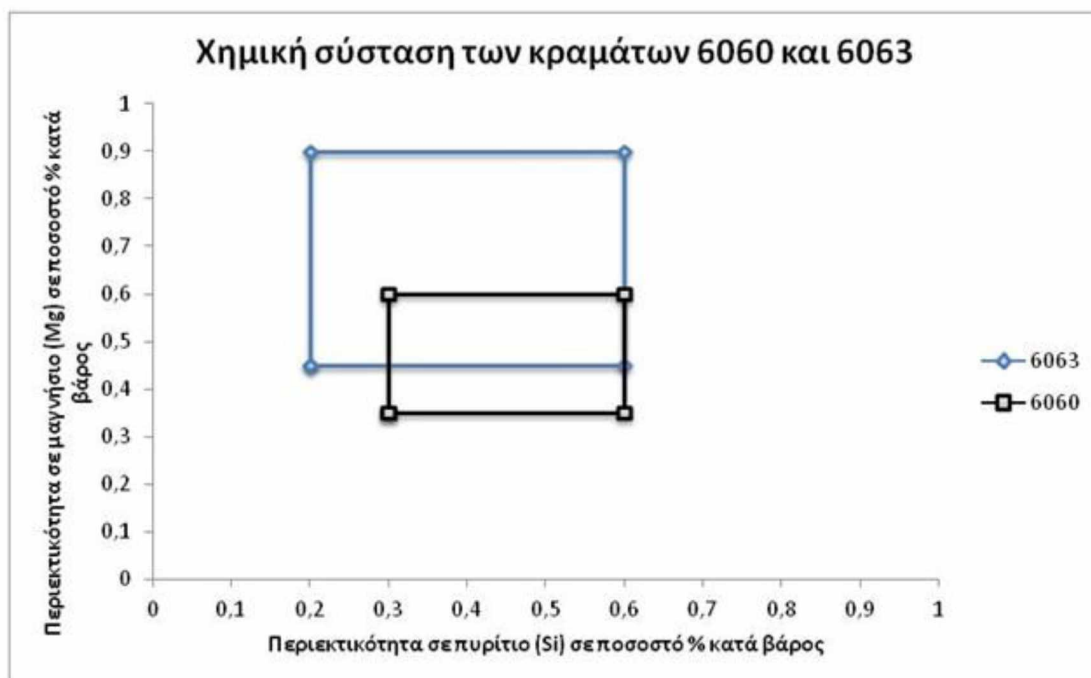
Εικόνα 1.2 Εξαρτήματα αλουμινίου για εφαρμογές σε αυτοκίνητα [9].

## 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Μαζί με την αντοχή, συμπεραίνεται, πως οι σύγχρονες εφαρμογές στα αυτοκίνητα απαιτούν και αυξημένη ολκιμότητα. Για αυτό το λόγο, έχει δοθεί έμφαση στην χημική σύσταση των κραμάτων 6xxx [10], [11], [12], όπως επίσης και στις κατεργασίες που ακολουθούνται [13], [14], [15], [16], [17]. Αυτοί οι δύο παράγοντες όταν βελτιστοποιηθούν, δίνουν τον καλύτερο συνδυασμό αντοχής και ολκιμότητας ώστε να τηρούνται οι προδιαγραφές για τις βιομηχανίες. Εξειδικεύοντας σε αυτό το θέμα, έχουν γίνει έρευνες τόσο για το κράμα 6060 [18], [19], [20], όσο και για το κράμα 6063 [21], [22], [23].

## Κεφάλαιο 2 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων-Συνήθης επεξεργασία των κραμάτων δxxх

Όπως έχει αναφερθεί, τα κύρια κραματικά στοιχεία των κραμάτων δxxх, είναι το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο. Τα άτομα αυτά αντιδρούν μεταξύ τους, σχηματίζοντας ενδομεταλλικές ενώσεις  $Mg_2Si$  κατά τις θερμικές κατεργασίες και προσφέρουν αντοχή. Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ των κραμάτων 6060 και 6063 είναι η ελαφρώς μεγαλύτερη ποσότητα Μαγνησίου του τελευταίου. Αυτός είναι και ο λόγος που το κράμα 6060 θεωρείται χαμηλής αντοχής, ενώ το κράμα 6063 θεωρείται μεσαίας αντοχής. Η σύσταση των κραμάτων 6060 και 6063 δείχνεται στην Εικόνα 2.1.

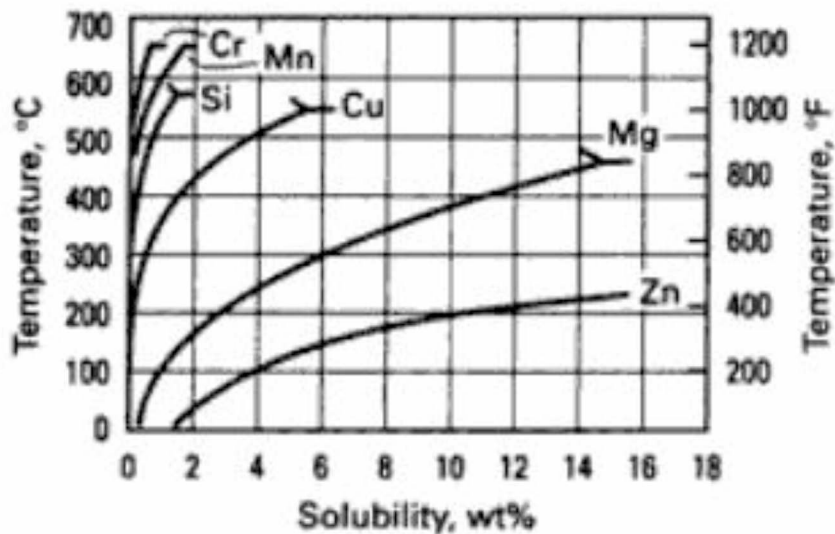


Εικόνα 2.1 Εύρη συστάσεων σε Μαγνήσιο και Πυρίτιο για τα κράματα 6060 και 6063.



## 2.1 Κύρια κραματικά στοιχεία

Τα κύρια κραματικά στοιχεία που συνεισφέρουν στην ισχυροποίηση στερεού διαλύματος είναι το Μαγνήσιο και το Πυρίτιο. Το Πυρίτιο, ωστόσο, έχει χαμηλότερη συνεισφορά στην ισχυροποίηση στερεού διαλύματος, λόγω της χαμηλότερης διαλυτότητας του στην μήτρα του αλουμινίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Έτσι, τείνει να σχηματίζει σωματίδια δεύτερων φάσεων, συμμετέχει στην ισχυροποίηση με καθίζηση πιο έντονα και μπορεί να επιταχύνει την κινητική της καθίζησης [2], [4]. Τα άτομα του μαγνησίου, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους τους από του αλουμινίου, έχουν την δυνατότητα να παρεμποδίζουν αποτελεσματικά την κίνηση των γραμμοαταξιών [11].

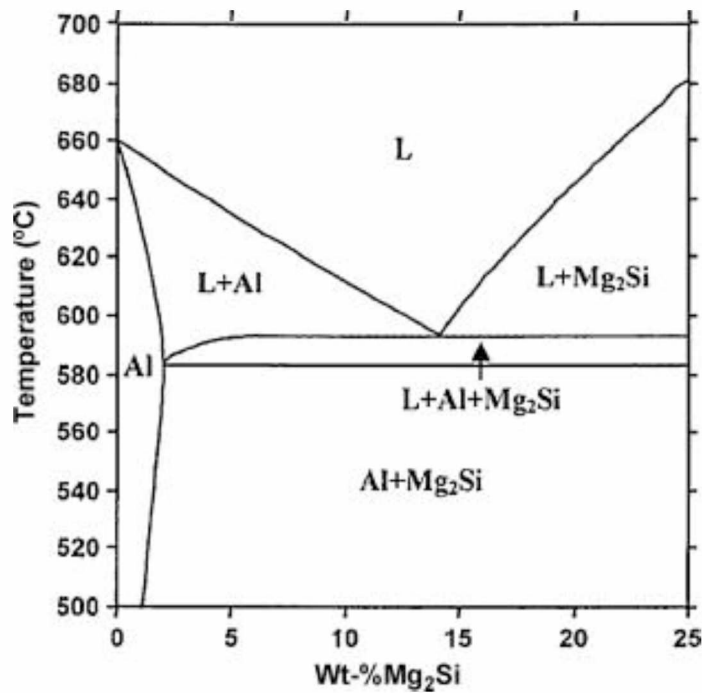


Εικόνα 2.2 Στερεή διαλυτότητα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για διμερή κράματα αλουμινίου σε θερμοδυναμική ισορροπία [2].

Μερικές φορές, σωματίδια πλούσια σε Πυρίτιο δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας γήρανσης στα σύνορα των κόκκων, απουσία άλλων κραματικών στοιχείων [12], με αποτέλεσμα την μείωση της ολκιμότητας. Απαιτείται προσοχή στον λόγο Μαγνησίου/Πυριτίου ώστε να υπάρχει η κατάλληλη ισχυροποίηση με καθίζηση, αλλά και να μην περιορίζεται η ολκιμότητα. Οι ποσότητες αυτών των στοιχείων στο υπερκορεσμένο



(supersaturated) στερεό διάλυμα επηρεάζουν την κινούσα δύναμη για καθίζηση και επομένως τον αριθμό των σωματιδίων που θα σχηματιστούν [4]. Σε μερικές περιπτώσεις, παρουσία και άλλων κραματικών στοιχείων, η περίσσεια Πυριτίου δεσμεύει το Μαγνήσιο και περιορίζει την ύπαρξη του στην μήτρα του αλουμινίου. Το Μαγνήσιο στα κράματα δxxx, συμβάλλει στο φαινόμενο της δυναμικής εργογήρανσης (dynamic strain ageing) το οποίο είναι ένα φαινόμενο δυναμικής αλληλεπίδρασης γραμμοαταξιών και διαχεόμενων κραματικών στοιχείων [24], [11]. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση της ευαισθησίας ρυθμού παραμορφώσεως (strain-rate sensitivity) λόγω της μείωσης ταχύτητας των γραμμοαταξιών. Η ευαισθησία ρυθμού παραμορφώσεως επηρεάζει την παραμόρφωση μετά το σημείο λαιμού, μέχρι τη θραύση, ενώ η εργοσκήρυνση επηρεάζει την ομοιόμορφη παραμόρφωση μέχρι το σημείο λαιμού, που ορίζεται ως η διαμορφωσιμότητα του υλικού [15]. Με αυτόν τον τρόπο, το Πυρίτιο μπορεί να έχει θετική επίδραση στην ολκιμότητα. Η εργοσκήρυνση ελέγχεται σημαντικά από την ποσότητα Μαγνησίου. Επομένως, ένας ισορροπημένος ατομικός λόγος Μαγνησίου/Πυριτίου, προτείνεται να κυμαίνεται γύρω από την τιμή 2:1, που είναι και ο στοιχειομετρικός λόγος της ενώσεως  $Mg_2Si$ , κάτι που αντιστοιχεί σε τιμές λόγου ατομικού βάρους από 1,5 έως 1,73 [4], [12], ώστε οι αρνητικές επιπτώσεις στην ολκιμότητα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Η ελαφρά μεγαλύτερη ποσότητα Πυριτίου (λόγος ατομικού βάρους < 1,73), συμβάλλει στην ύπαρξη μιας όλκιμης μήτρας και στην ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων καθίζησης  $Mg_2Si$  [25]. Επίσης η περίσσεια του Πυριτίου, δημιουργεί μεγαλύτερη πυκνότητα μεταβατικών φάσεων όπως οι ζώνες GP και η β'', ο συνδυασμός των οποίων προσφέρει την μεγαλύτερη ισχυροποίηση και βοηθά στην κινητική της καθίζησης [26]. Κάτι τέτοιο, ενδείκνυται για τα κράματα 6060 και 6063, καθώς έχει προκύψει ενδιαφέρον για την χρήση τους στην βιομηχανία αυτοκινήτων. Στην Εικόνα 2.3, παρουσιάζεται το διάγραμμα φάσης του συστήματος Al- $Mg_2Si$ .



Εικόνα 2.3 Ψευδοδιμερές Διάγραμμα φάσης Al-Mg<sub>2</sub>Si με ευτηκτική σύσταση 13,9 % κατά βάρος [25].

## 2.2 Δευτερεύοντα κραματικά στοιχεία

Τα σημαντικότερα δευτερεύοντα κραματικά στοιχεία σε αυτή την σειρά των κραμάτων είναι ο Σίδηρος (Fe), ο Χαλκός (Cu) και το Μαγγάνιο (Mn). Επιπλέον, υπάρχουν μικροποσότητες και άλλων στοιχείων, όπως το Χρώμιο (Cr), το Τιτάνιο (Ti) και ο Ψευδάργυρος (Zn), που χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων και γενικά της μικροδομής.

- Σίδηρος : Ο Σίδηρος είναι ένα στοιχείο που αναπόφευκτα θα υπάρχει στα κραματικά συστήματα Αλουμινίου-Μαγνησίου-Πυριτίου, λόγω της δυσχέρειας με την οποία απομακρύνεται από το λιωμένο μέταλλο. Η πολύ χαμηλή διαλυτότητα του σε στερεό διάλυμα με μήτρα το αλουμίνιο, διευκολύνει την παρουσία του σε σωματίδια που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης [12]. Μερικά από αυτά τα σωματίδια είναι τα κυβικά  $\alpha$ -AlFeSi και  $\beta$ -AlFeSi. Στη θερμική κατεργασία ομογενοποίησης (homogenization), συμβαίνει μετασχηματισμός των  $\beta$ -σωματιδίων σε  $\alpha$ . Τα  $\beta$ -σωματίδια είναι πιο ψαθυρά και οδηγούν σε περιορισμένη διαμορφωσιμότητα και ολκιμότητα. Η εισαγωγή του Σιδήρου, μπορεί επίσης να επηρεάζει και τα χαρακτηριστικά των κόκκων [2], και όταν υφίσταται σε

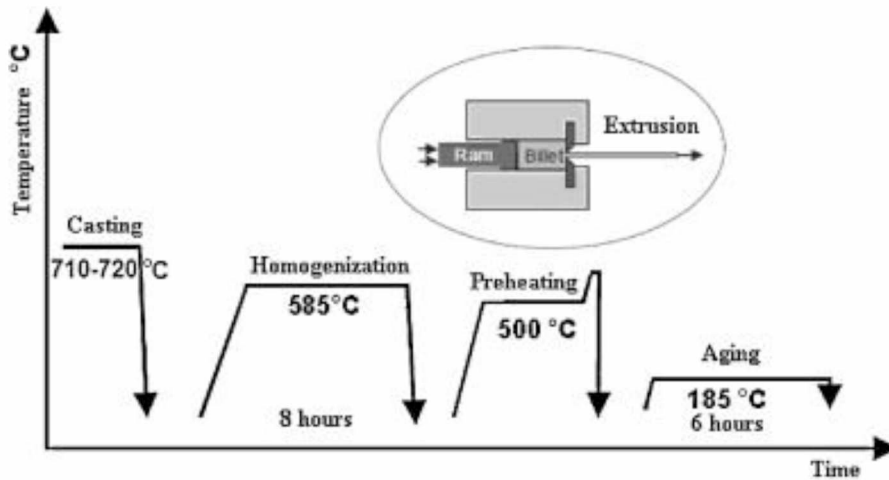
στερεό διάλυμα προσφέρει αξιόλογη ισχυροποίηση [12]. Η συνύπαρξη του με το Πυρίτιο σε αυτά τα σωματίδια, όπως και σε διάφορα άλλα μπορεί να αποβεί θετική για την ολκιμότητα, αφήνοντας λιγότερο Πυρίτιο που μπορεί να καθιζάνει στα σύνορα των κόκκων σε μετέπειτα θερμικές κατεργασίες [12].

- Χαλκός : Ο Χαλκός μεταβάλλει την σειρά καθίζησης στα κράματα δxxx. Δηλαδή, έχει ως εξής: υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα (SSSS) → Ομάδες ατόμων/ Ζώνες Γκινιέρ-Πρέστον (GP) → πρόδρομη-β'' → β'' → β',Q' → β,Q [27] . Το στοιχείο αυτό σε στερεό διάλυμα προκαλεί έντονη ισχυροποίηση. Η εισαγωγή του υποβαθμίζει την αντίσταση του υλικού σε διάβρωση [11]. Λέγεται πως ο Χαλκός δεσμεύει το πυρίτιο, σε συστήματα με περίσσεια Πυριτίου, και επιπρόσθετα καθώς αλλάζει η σειρά καθίζησης, η συνοχή των σωματιδίων καθίζησης με την μήτρα του αλουμινίου είναι καλύτερη. Βελτιώνεται έτσι εμμέσως η ολκιμότητα [12].
- Μαγγάνιο : Το Μαγγάνιο διευκολύνει τον μετασχηματισμό των β-AlFeSi σωματιδίων στα πιο όλκιμα α, δηλαδή η παρουσία του ενισχύει τον αριθμό των α-σωματιδίων σε σχέση με τα β. Επίσης μικρά σωματίδια (dispersoids) που περιέχουν Μαγγάνιο και σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της ομογενοποίησης, συμβάλλουν στη διατήρηση της παραμορφωμένης μικροδομής λόγω της διέλασης και δρουν ως εμπόδια για τις γραμμοαταξίες, αυξάνοντας την εργοσκήρυνση [12]. Ακόμη, έχει προταθεί πως αυτά τα σωματίδια προωθούν την σταυρολίσθηση (cross-slip) των γραμμοαταξιών, προκαλώντας πιο ομοιόμορφες παραμορφώσεις [12]. Ένας πιο έμμεσος τρόπος με τον οποίο το Μαγγάνιο συνεισφέρει στην ολκιμότητα, είναι με τη δέσμευση του Πυριτίου προς σχηματισμό σωματιδίων. Ωστόσο, το Μαγγάνιο μπορεί μετά από τις διάφορες κατεργασίες να παραμείνει σε στερεό διάλυμα και τότε η ισχυροποίηση που προσδίδει είναι σημαντική.

### 2.3 Βασικές κατεργασίες για διελάσιμα κράματα

Οι αλληλεπιδράσεις των κραματικών στοιχείων, που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των κατεργασιών, θερμικών και μη, συνιστούν την τελική μικροδομή ενός κραματικού συστήματος. Οι συνήθεις κατεργασίες που ακολουθούνται στην βιομηχανία, στα διελάσιμα κράματα δxxx, είναι οι εξής: χύτευση σε σχήμα κορμού (log), θερμική κατεργασία ομογενοποίησης και ψύξη, επεξεργασία σε μικρότερα τεμάχια, κυλινδρικά ή ορθογώνια (billets), προ-θέρμανση, θερμή διέλαση (hot extrusion) και θερμική κατεργασία γήρανσης

(aging) [28]. Το αρχικό βήμα είναι η χύτευση του λιωμένου μετάλλου σε ειδικά καλούπια. Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, επειδή δεν συμβαίνει παντού ταυτόχρονα, δημιουργούνται ανομοιογένειες όσον αφορά την κατανομή των κραματικών στοιχείων στο υλικό και αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διαφορισμός (segregation). Η ομογενοποίηση, που πραγματοποιείται αμέσως μετά, περιλαμβάνει την θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες (κάτω από την *solidus*), παραμονή σε αυτήν την θερμοκρασία και τέλος ψύξη. Σκοπός αυτής της κατεργασίας είναι η αντιστροφή του διαφορισμού και η επίτευξη μιας πιο ομοιόμορφης κατανομής των κραματικών στοιχείων. Ακόμη, επιτυγχάνονται η πυρήνωση (nucleation) και ανάπτυξη (growth) σωματιδίων  $Mg_2Si$  τα οποία ξαναδιαλύονται καθώς ανεβαίνει η θερμοκρασία, η μετατροπή των β-σωματιδίων σε α, «στρογγύλεμα» των σκληρών σωματιδίων που μειώνουν την ολκιμότητα και τέλος σχηματισμός σωματιδίων που ελέγχουν το μέγεθος των κόκκων στη μετέπειτα διέλαση/έλαση [29]. Στην ψύξη ξανασυμβαίνει καθίζηση σωματιδίων. Το μέγεθος τους πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να υπάρχει μειωμένη ισχυροποίηση στερεού διαλύματος για διευκόλυνση της θερμής κατεργασίας (διέλαση/έλαση), και ταυτόχρονη διαλυτοποίηση κατά τη διάρκεια της αντίστοιχης κατεργασίας [29]. Η διαλυτοποίηση των σωματιδίων στη διάρκεια της κατεργασίας είναι σημαντική, διότι αυτά τήκονται τοπικά (incipient melting) και συνεπώς προσδίδουν χαμηλή ποιότητα επιφανείας και υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού [30]. Για αυτό το λόγο ο ρυθμός ψύξης στη κατεργασία της ομογενοποίησης είναι σημαντικός. Η κατεργασία της διέλασης, χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν στα κράματα της σειράς 6xxx, και περιλαμβάνει ώθηση του υλικού από πρέσα (direct extrusion), μέσα από κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα, για επίτευξη του επιδιωκόμενου σχήματος. Η προ-θέρμανση που προηγείται, έχει ως σκοπό την διάλυση των «χονδρών» σωματιδίων  $Mg_2Si$  που ενδέχεται να τηχθούν κατά την διέλαση [31]. Στην Εικόνα 2.4, παρουσιάζεται διαγραμματικά η σειρά των κατεργασιών για ένα κράμα αλουμινίου της σειράς 6xxx, το 6063. Ανάλογα με το σχήμα ή προφίλ που επιθυμείται κάθε φορά, εφαρμόζεται και η κατάλληλη κατεργασία διαμόρφωσης.



Εικόνα 2.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου για τυπικές κατεργασίες ενός κράματος της σειράς 6xxx [6].

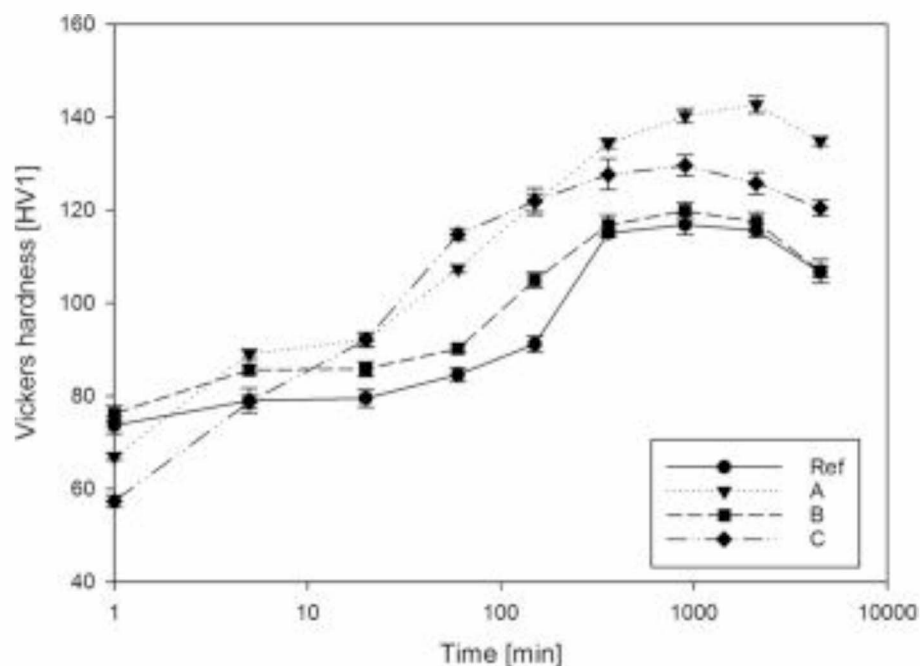
### 2.3.1 Γήρανση

Η τελική μικροδομή και άρα οι τελικές ιδιότητες καθορίζονται από την θερμική κατεργασία γήρανσης, κατά την οποία συμβαίνει ισχυροποίηση με καθίζηση μιας δεύτερης φάσεως ή ενδομεταλλικής ενώσεως και περιλαμβάνει τρία βήματα [32]:

- 1) Τη θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης (solution treatment), με θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus για διάλυση των φάσεων και ενώσεων και τον σχηματισμό ενός ομογενούς στερεού διαλύματος.
- 2) Αμέσως μετά, την απότομη ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου, που ονομάζεται και βαφή (quench). Λόγω της μεγάλης ταχύτητας ψύξεως, δεν υπάρχει χρόνος για διάχυση και έτσι, οι συγκεντρώσεις των στοιχείων στην μήτρα του αλουμινίου, υπερβαίνουν το όριο στερεάς διαλυτότητας στην θερμοκρασία δωματίου, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα. Επομένως η κινούσα δύναμη για καθίζηση νέων φάσεων είναι μεγάλη.
- 3) Τελικά, η καθίζηση των νέων φάσεων μπορεί να υποβοηθηθεί θερμικά, με θέρμανση κάτω από την γραμμή solvus και τότε η γήρανση εννοείται ως τεχνητή γήρανση (artificial aging). Σε περίπτωση που η γήρανση συμβαίνει σε θερμοκρασία δωματίου τότε γίνεται λόγος για φυσική γήρανση (natural aging).

Κατά τη διάρκεια της γήρανσης, συμβαίνουν σημαντικές μεταβολές στην μικροδομή. Η καθίζηση της εκάστοτε φάσεως ισορροπίας, που υποδεικνύεται από το

διάγραμμα φάσεων, δεν συμβαίνει αμέσως. Αντίθετα, προηγείται ο σχηματισμός μεταβατικών φάσεων που δεν βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτό συμβαίνει διότι, η ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για την πυρήνωση αυτών των φάσεων είναι μικρότερη από την φάση ισορροπίας, παρόλο που αυτή έχει μεγαλύτερη κινούσα δύναμη για σχηματισμό. Το αποτέλεσμα είναι, οι πρώτες φάσεις που σχηματίζονται να έχουν πλήρη συνοχή με την μήτρα με χαμηλή τιμή της διεπιφανειακής τους ενέργειας. Καθώς αναπτύσσονται τα σωματίδια, η ενέργεια παραμορφώσεως λαμβάνει μεγάλες τιμές, και έτσι η προτεραιότητα μετατοπίζεται στην ελαχιστοποίηση της τιμής της, η οποία συνοδεύεται και από απώλεια συνοχής (coherency loss) των φάσεων με την μήτρα. Έτσι η φάση ισορροπίας έχει διεπιφάνεια μη-συνοχής με την μήτρα. Η αντοχή του κράματος εξαρτάται από τον χρόνο και την θερμοκρασία γήρανσεως, καθώς οι διαφορετικές φάσεις που αναπτύσσονται στην σειρά καθίζησης, έχουν διαφορετική ειδική αντίσταση στην παρεμπόδιση της κίνησης των αταξιών [32]. Σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, στη διάρκεια της γήρανσης, παρατηρείται ένα μέγιστο στη σκληρότητα που επιτυγχάνεται. Μετά από αυτό το σημείο, παρατηρείται μείωση στη σκληρότητα. Αυτό οφείλεται στην διεύρυνση (coarsening) της διασποράς των σωματιδίων, δηλαδή αύξηση του μεγέθους και της απόστασης μεταξύ των σωματιδίων που οδηγεί στην μείωση της σκληρότητας και ονομάζεται υπεργήρανση (overaging). Ένα παράδειγμα, φαίνεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.5 Διάγραμμα Σκληρότητας με τον χρόνο για τέσσερα πειραματικά κράματα [12].

## 2.4 Κατεργασίες μεταλλικών φύλλων στην αυτοκινητοβιομηχανία

Όσον αφορά την κατασκευή των εξωτερικών φύλλων και μερών των αυτοκινήτων, η τυπική σειρά κατεργασιών που ακολουθείται, είναι η εξής: χύτευση, θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, θερμή έλαση, ψυχρή έλαση, θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης, θερμική κατεργασία προ-γήρανσης (pre-ageing ή για συντομία PA), κατεργασία διαμόρφωσης που ονομάζεται τύπωση (stamping) και το τελικό στάδιο γήρανσης μετά την βαφή με χρώμα, των μεταλλικών φύλλων (paint bake ageing) [4]. Ωστόσο, αρκετά είναι και εκείνα τα εξαρτήματα στα αυτοκίνητα, που κατεργάζονται με διέλαση, σύμφωνα με την Ενότητα 2.3, λόγω της καλής τους διαμορφωσιμότητας και τελικής επιφάνειας, και ειδικά στα κράματα 6060 και 6063 που είναι σχετικά χαμηλής κραμάτωσης, κάτι που διευκολύνει την κατεργασία διέλασης. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται η χρήση του αλουμινίου 6060 σε ορισμένα εξαρτήματα για ένα όχημα της εταιρείας Audi. Η προ-γήρανση είναι θερμική κατεργασία γήρανσης, που συνήθως προηγείται του τελικού σταδίου γήρανσης, και έχει ως στόχο την αντιστροφή του αρνητικού φαινομένου της φυσικής γήρανσης, που λαμβάνει χώρα κατά την αποθήκευση των υλικών. Χωρίς προ-γήρανση η σκληρότητα που μπορεί να επιτευχθεί τελικά, δεν αυξάνεται σημαντικά. Με την προ-γήρανση φαίνεται να επικρατεί χαμηλή διαμορφωσιμότητα και ολκιμότητα, λόγω της μειωμένης εργοσκληρυνσης και σκλήρυνσης ρυθμού παραμορφώσεως, που αυτή προκαλεί. Η χαμηλή διαμορφωσιμότητα πριν το τελικό στάδιο της γήρανσης, συνεπάγεται υψηλή σκληρότητα, μετά από αυτήν [15]. Μία εξήγηση είναι πως, με την προ-γήρανση μειώνονται τα κραματικά στοιχεία που βρίσκονται στην μήτρα του υλικού και τα οποία θα συνέβαλαν στην εργοσκληρυνση. Συνεπώς, επικρατεί χαμηλή διαμορφωσιμότητα. Οι ομάδες ατόμων (clusters), που δημιουργούνται με την προ-γήρανση, δρουν ως πυρήνες για τα σωματίδια καθίζησης κατά τον επικείμενο κύκλο γήρανσης, ενώ οι αντίστοιχες ομάδες που δημιουργούνται κατά την φυσική γήρανση δεν έχουν αυτή την δυνατότητα [15]. Με αυτόν τον τρόπο η προ-γήρανση ενισχύει την τελική σκληρότητα. Μία άλλη εξήγηση είναι πως μετά την φυσική γήρανση, τα προ-γηρασμένα κράματα περιέχουν περισσότερες οπές σε σχέση με την αποκλειστική φυσική γήρανση και επικρατεί χαμηλή σκλήρυνση ρυθμού

παραμορφώσεως (strain-rate hardening) και συνεπώς χαμηλή διαμορφωσιμότητα, λόγω του φαινομένου δυναμικής εργογήρανσης [15]. Πιο συγκεκριμένα, για κράματα της σειράς 6xxx, βρέθηκε πως μετά από κάποιο διάστημα φυσικής γήρανσης, η πλειοψηφία των συμπλεγμάτων οπών-κραματικών στοιχείων μετασχηματίζονται σε ομάδες κραματικών στοιχείων χωρίς οπές. Με την προ-γήρανση αυτές οι ομάδες σχηματίζονται στο διάστημα της προ-γήρανσης και τα συμπλέγματα οπών-κραματικών στοιχείων που απομένουν σχηματίζουν νέες ομάδες ή συνενώνονται με τις υπάρχουσες, διαδικασία η οποία καθυστερείται λόγω της μείωσης των κραματικών στοιχείων λόγω της προ-γήρανσης και έτσι η παρουσία συμπλεγμάτων οπών-κραματικών στοιχείων είναι πιο έντονη σε σχέση με εκείνη των κραμάτων φυσικής γήρανσης [24]. Έτσι εξηγούνται οι περισσότερες οπές στα προ-γηρασμένα κράματα και η παρουσία τους αυξάνει την κινητική της καθίζησης κατά το τελικό στάδιο γήρανσης, συμβάλλοντας στην αύξηση της σκληρότητας [15]. Παρ' όλα αυτά, η προ-γήρανση πριν την φυσική γήρανση, κατά το τελευταίο στάδιο γήρανσης ικανοποιεί καλύτερα τα σχεδιαστικά κριτήρια αντοχής και ολκιμότητας, σε σύγκριση με την παρουσία μόνο της φυσικής γήρανσης. Η προ-γήρανση και η φυσική γήρανση κατά σειρά μειώνουν την αντοχή και παρουσιάζουν σχετικά καλή ολκιμότητα, και αυτοί οι παράγοντες διευκολύνουν την διαμορφωσιμότητα των πάνελ για τα αυτοκίνητα. Έπειτα με την θερμική κατεργασία γήρανσης αυξάνεται και πάλι η αντοχή των πάνελ για αντίσταση στις κρούσεις [4].

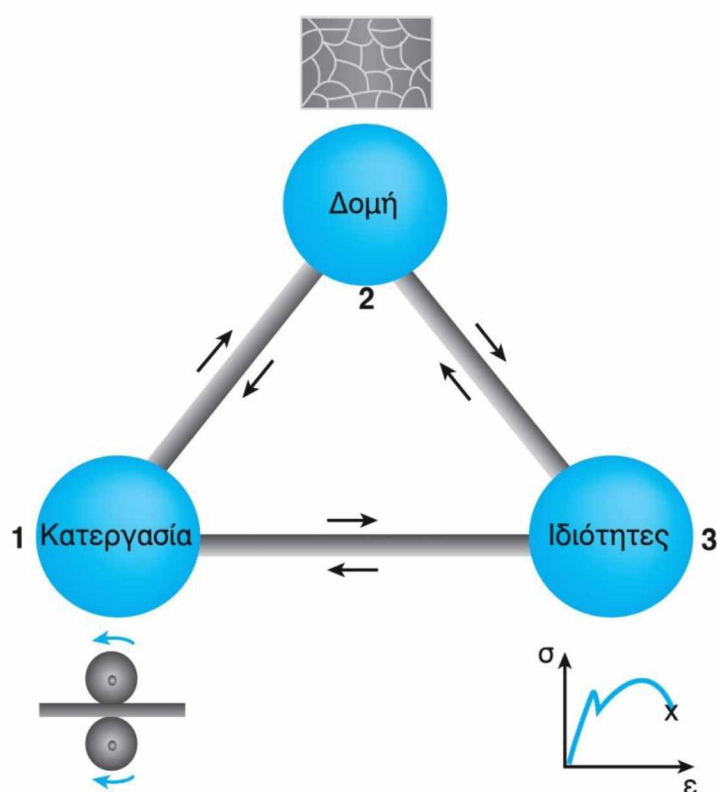


Εικόνα 2.6 Συστατικά μέρη από αλουμίνιο στο μοντέλο A2 της εταιρείας Audi [18].



## Κεφάλαιο 3 Ιδιότητες

Οι ιδιότητες των υλικών, προκύπτουν ως αποτέλεσμα των κατεργασιών που ακολουθούνται, οι οποίες και καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν μεταξύ τους τα κραματικά στοιχεία, και συνιστούν την τελική (μικρο)δομή του συστήματος (Εικόνα 3.1).



**Εικόνα 3.1** Η αλληλεπίδραση μεταξύ της κατεργασίας, της δομής και των ιδιοτήτων των μεταλλικών υλικών [32].

Σημαντικές ιδιότητες των κραμάτων της σειράς 6xxx είναι η σκληρότητα, το όριο διαρροής του υλικού, η μέγιστη αντοχή, η ολκιμότητα και η διαμορφωσιμότητα του και απαιτείται ένας καλός συνδυασμός αυτών. Ο κύριος μηχανισμός ισχυροποίησης σε αυτά τα κράματα είναι η καθίζηση σωματιδίων κατά την θερμική κατεργασία γήρανσης και προσφέρει μεγάλη αντοχή. Τα κραματικά στοιχεία σε στερεό διάλυμα συνεισφέρουν επίσης σημαντικά στην ισχυροποίηση των κραμάτων αλουμινίου λόγω των τασικών τους

πεδίων που αλληλεπιδρούν με εκείνα των γραμμοαταξιών. Ακόμη, τα κραματικά στοιχεία στην μήτρα περιορίζουν το φαινόμενο της δυναμικής αποκατάστασης (dynamic recovery). Κατά τη διάρκεια του φαινομένου αυτού, γραμμοαταξίες κινούμενες σε αντίθετες κατευθύνσεις αλληλοαναιρούνται, διευκολύνοντας τη συνέχιση της παραμόρφωσης. Η μείωση του φαινομένου, επομένως, προκαλεί και ισχυροποίηση λόγω εργοσκλήρυνσης εξ' αιτίας της υψηλής συγκέντρωσης γραμμοαταξιών, που οφείλεται στα στοιχεία του στερεού διαλύματος. Ο συνήθης μηχανισμός θραύσης στα όλκιμα μέταλλα, άρα και στα κράματα αλουμινίου δxxx, είναι η πυρήνωση των οπών που ξεκινάει συνήθως από τα σωματίδια, η ανάπτυξη και τέλος η συνένωση τους [7], [14], [33]. Η ολκιμότητα καθορίζεται από το κλάσμα όγκου και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, την συνοριακή καθίζηση στους κόκκους, τις ζώνες χωρίς σωματίδια καθίζησης (Precipitate Free Zones) που σε συνδυασμό με τα σωματίδια καθίζησης στα σύνορα των κόκκων προωθούν την περικρυσταλλική θραύση (intergranular fracture) [34], και από τη υφή (texture), που αναπτύσσεται κατά τις κατεργασίες διαμόρφωσης [14]. Όλοι αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται φυσικά από τις κατεργασίες που εφαρμόζονται. Η παραμόρφωση στη θραύση, μειώνεται γραμμικά με την αντοχή (όριο διαρροής), όπως έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις κραμάτων της σειράς δxxx [7], [33], [35], [36]. Η γραμμική αυτή σχέση έχει να κάνει με την μικροδομή που σχετίζεται με την διαδικασία της θραύσης [36]. Το μέγεθος των κόκκων παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες που μπορεί να αποκτήσει το υλικό. Μικρό μέγεθος κόκκων, σημαίνει πως η παραμόρφωση μπορεί να διαμοιραστεί σε περισσότερους κόκκους οδηγώντας σε περισσότερο ομοιόμορφη παραμόρφωση, και επομένως καλύτερη ολκιμότητα [4]. Επίσης, είναι γνωστό, πως τα λεπτόκοκκα υλικά προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή, σε σχέση με τα χονδρόκοκκα, κάτι που υποδεικνύει και η μαθηματική σχέση Hall-Petch:

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad (3.1)$$

όπου  $\sigma_y$  το όριο διαρροής του υλικού,  $d$  η μέση διάμετρος των κόκκων,  $k_y$  ο συντελεστής Hall-Petch και  $\sigma_i$  η πλεγματική αντίσταση ή το όριο διαρροής μονοκρυστάλλου [32]. Η ταυτόχρονη βελτίωση της ολκιμότητας και της αντοχής είναι ζητούμενο για τα κράματα δxxx. Μία σχετικά καινούρια τεχνική, με την οποία προσδίδεται μεγάλη αντοχή, είναι η ισοδιαμετρική γωνιακή διέλαση (equal channel angular extrusion), με την οποία το υλικό εισέρχεται στην μήτρα και εξέρχεται από αυτήν με πίεση, σε διαφορετική κατεύθυνση από

αυτής της εισόδου, διατηρώντας το σχήμα του. Η υψηλή αντοχή οφείλεται στο φαινόμενο Hall-Petch, διότι το υλικό που δημιουργείται είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκο (Ultra Fine Grain). Με κατάλληλη θερμική επεξεργασία επιτυγχάνεται καλός συνδυασμός αντοχής και ολκιμότητας. Ωστόσο αυτή είναι μία εργαστηριακή μέθοδος και δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανική κλίμακα για μαζική παραγωγή, λόγω του κόστους και του χρόνου επεξεργασίας [37].

### **3.1 Κράμα αλουμινίου 6060**

Το κράμα αλουμινίου 6060 είναι, σχετικά με άλλα κράματα της σειράς 6xxx, χαμηλής κραμάτωσης με συστάσεις που κυμαίνονται από 0,3-0,6 Πυρίτιο και 0,35-0,6 Μαγνήσιο σε ποσοστά επί τοις εκατό κατά βάρος (Εικόνα 2.1). Αυτό το κράμα, όπως και το κράμα 6063, είναι εύκολα διελάσιμο καθώς η διελασιμότητα είναι συνάρτηση των ποσοτήτων Μαγνησίου και Πυριτίου, με μεγάλες περιεκτικότητες σε αυτά τα στοιχεία, να δυσχεραίνουν την ικανότητα για διέλαση [38]. Συνεπώς, η παραγωγή των κραμάτων αυτών, είναι μεγάλη. Οι ιδιότητες που το κάνουν ελκυστικό είναι η καλή αντίσταση στην διάβρωση, η καλή διαμορφωσιμότητα και κατεργασιμότητα σε θερμοκρασίες δωματίου, καθώς και η αντοχή του η οποία αν και είναι χαμηλή, αυξάνεται με την θερμική κατεργασία γήρανσης. Οι εφαρμογές του είναι κατ' εξοχήν κατασκευαστικές, ωστόσο έχουν εισαχθεί τα τελευταία χρόνια και σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ο τομέας αυτός βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη, οπότε και οι μελέτες πάνω σε αυτά τα κράματα είναι επίσης συνεχείς, για την κατανόηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, της μικροδομής τους καθώς και των παραμέτρων που αφορούν την κατεργασία τους.

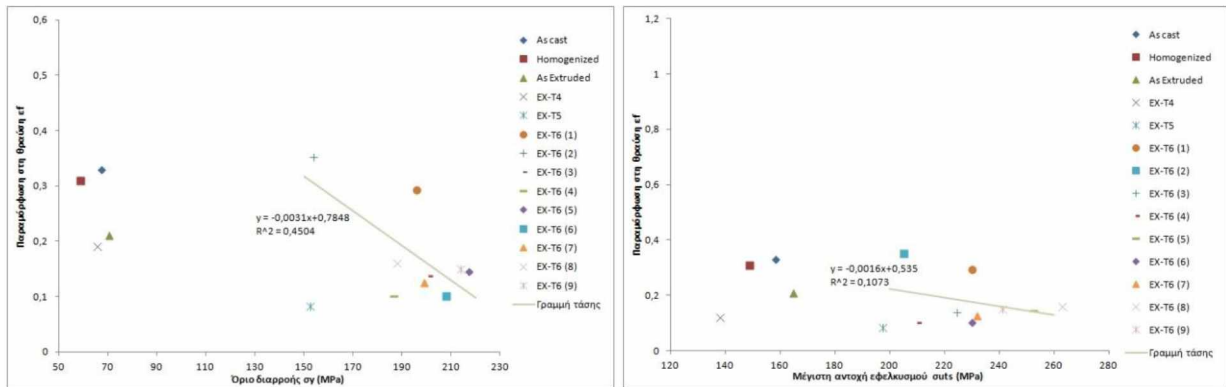
### 3.1.1 Αντοχή και ολκιμότητα για το θερμικά κατεργάσιμο κράμα 6060

Βάσει πειραματικών μετρήσεων, [20], [18], [39], [40], [19], [41], [42], [43] γίνεται η συσχέτιση του ορίου διαρροής και της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού με την ολκιμότητα για διαφορετικές κατεργασίες που ακολουθούνται στο συγκεκριμένο κράμα. Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά τιμές της αντοχής και της ολκιμότητας που παρατηρήθηκαν.

Πίνακας 3.1 Τιμές του Ορίου διαρροής και της ολκιμότητας του κράματος 6060.

Είδος Κατεργασίας	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{ults}$ (MPa)	$\epsilon_f$
As cast	67,35	158,4	0,33
Homogenized	58,7	149	0,309
As Extruded	70,5	165	0,21
EX-T4	65,8	138,1	0,19
EX-T5	152,6	197,4	0,083
EX-T6 (1)	196	230	0,293
EX-T6 (2)	154	205	0,352
EX-T6 (3)	200,9	224,4	0,138
EX-T6 (4)	186,7	210	0,101
EX-T6 (5)	217,2	252,4	0,145
EX-T6 (6)	208	230	0,101
EX-T6 (7)	199	232	0,125
EX-T6 (8)	188	263	0,16
EX-T6 (9)	214	241	0,15

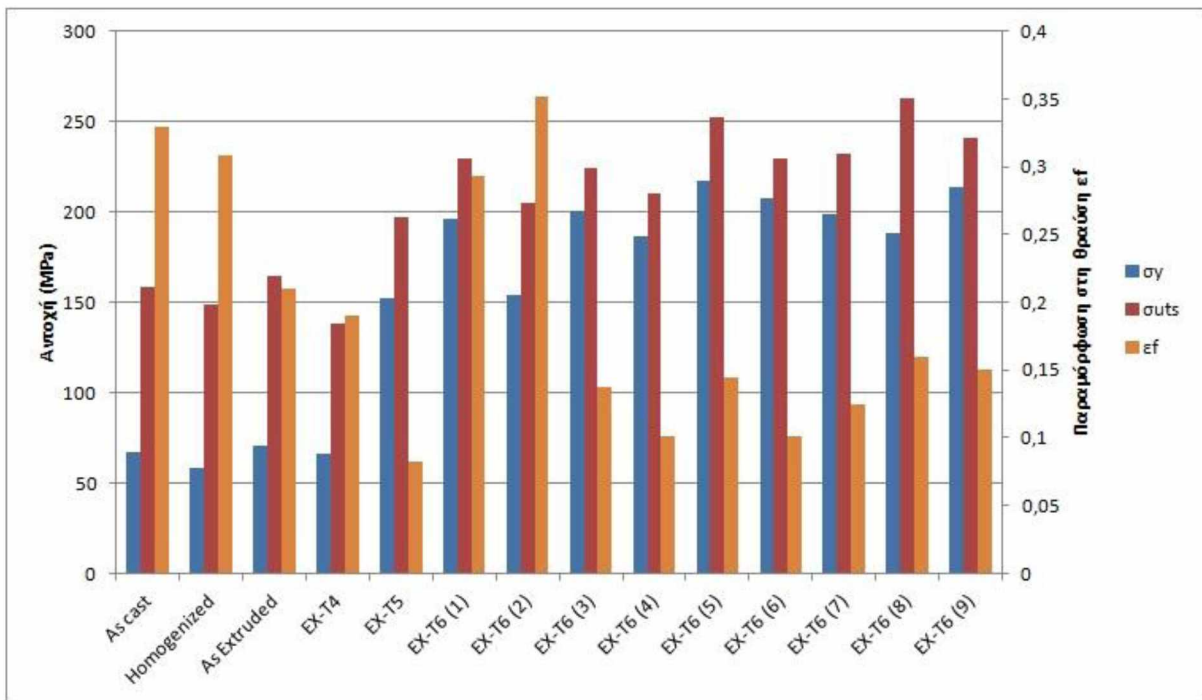
Οι συμβολισμοί σε (), αναπαριστούν το ίδιο είδος κατεργασίας σε διαφορετική πειραματική μελέτη. Επίσης ο συμβολισμός EX, σημαίνει διέλαση και ακολουθείται από θερμική κατεργασία τεχνητής γήρανσης (T6). Οι ιδιότητες του κράματος και η διακύμανσή τους παρουσιάζονται σχηματικά στα διαγράμματα των Εικόνων 3.2 και 3.3.



A)

B)

**Εικόνα 3.2** Διαγράμματα παραμορφώσεως στην θραύση  $\epsilon_f$  σε συνάρτηση με το Α) Όριο διαρροής  $\sigma_y$  και τη Β) Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού  $\sigma_{uts}$  του κράματος 6060.



Εικόνα 3.3 Ραβδόγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων για διάφορες κατεργασίες του κράματος 6060.

### 3.2 Κράμα αλουμινίου 6063

Το κράμα αλουμινίου 6063, όπως και το κράμα 6060, είναι χαμηλής κραμάτωσης με συστάσεις που κυμαίνονται από 0,2-0,6 Πυρίτιο και 0,45-0,9 Μαγνήσιο σε ποσοστά επί τοις εκατό κατά βάρος (Εικόνα 2.1). Διαθέτει και αυτό καλή ικανότητα για διέλαση, αντοχή λόγω της καθίζησης των σωματιδίων ισχυροποίησης, διαμορφωσιμότητα και αντίσταση στην διάβρωση καθώς και καλή ποιότητα τελικής επιφανείας (φινίρισμα) όπως και το κράμα 6060. Θεωρείται κράμα μεσαίας αντοχής και βρίσκει σημαντικές εφαρμογές στην αρχιτεκτονική, στην διακόσμηση [44], και στην αυτοκινητοβιομηχανία μαζί με το κράμα 6060, που υπάρχει αρκετό ενδιαφέρον γύρω από αυτά τα κράματα και την μελέτη τους.

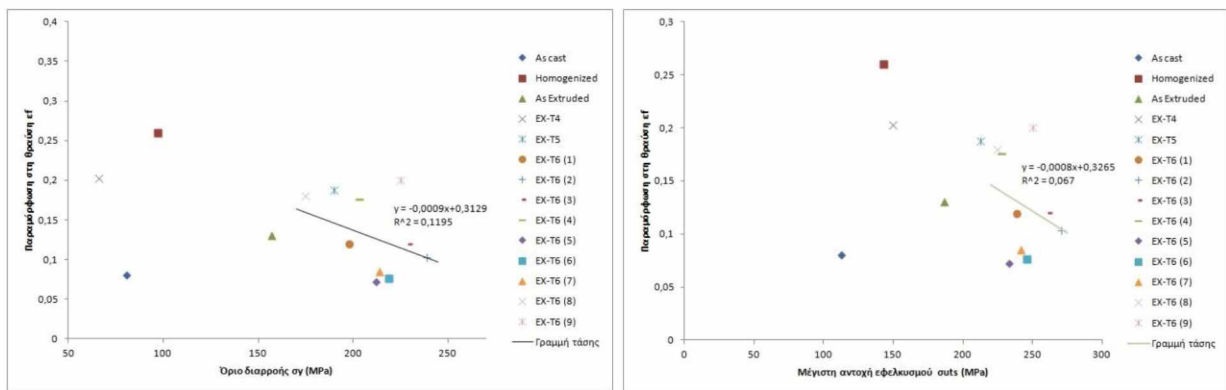
### 3.2.1 Αντοχή και ολκιμότητα για το θερμικά κατεργάσιμο κράμα 6063

Βάσει πειραματικών μετρήσεων [21], [45], [23], [22], [46], [47], [48], [49], [50] γίνεται η συσχέτιση του ορίου διαρροής και της μέγιστης αντοχής εφελκυσμού με την ολκιμότητα για διαφορετικές κατεργασίες που ακολουθούνται στο συγκεκριμένο κράμα. Στους Πίνακες 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά, τιμές της αντοχής και της ολκιμότητας που παρατηρήθηκαν.

Πίνακας 3.2 Τιμές του Ορίου διαρροής και της ολκιμότητας του κράματος 6063.

Είδος Κατεργασίας	$\sigma_y$ (MPa)	σ <sub>uts</sub> (MPa)	$\epsilon_f$
As cast	80,75	112,93	0,08
Homogenized	97	143	0,26
As Extruded	157	186,61	0,13
EX-T4	66,22	149,64	0,203
EX-T5	189,9	212,92	0,188
EX-T6 (1)	198,12	238,95	0,1196
EX-T6 (2)	239	271	0,103
EX-T6 (3)	229	261	0,12
EX-T6 (4)	203,5	227,68	0,1759
EX-T6 (5)	212	233	0,072
EX-T6 (6)	219	246	0,076
EX-T6 (7)	214	242	0,085
EX-T6 (8)	175	225	0,18
EX-T6 (9)	225	250	0,2

Οι ιδιότητες του κράματος και η διακύμανσή τους παρουσιάζονται σχηματικά στα διαγράμματα των Εικόνων 3.4 και 3.5.

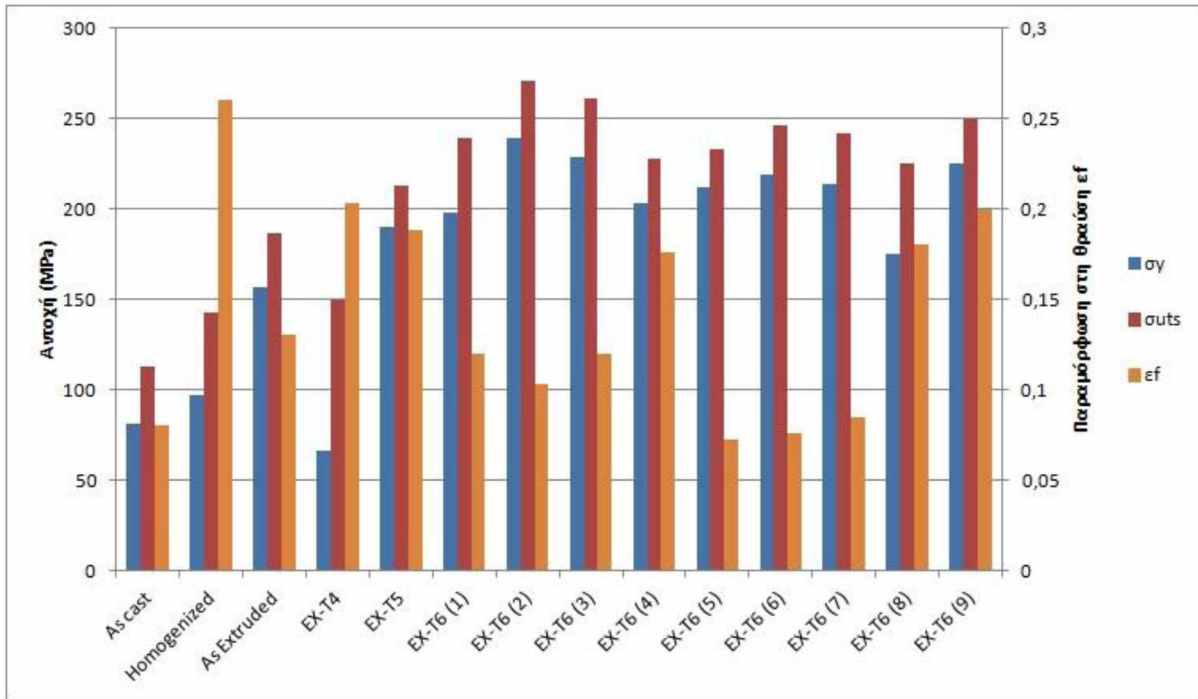


A)

B)

**Εικόνα 3.4** Διαγράμματα παραμορφώσεως στην θραύση εφ σε συνάρτηση με το Α) Όριο διαρροής  $\sigma_y$  και τη Β) Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού  $\sigma_{uts}$  του κράματος 6063.





Εικόνα 3.5 Ραβδόγραμμα μηχανικών ιδιοτήτων για διάφορες κατεργασίες του κράματος 6063.

## Κεφάλαιο 4 Σχολιασμός

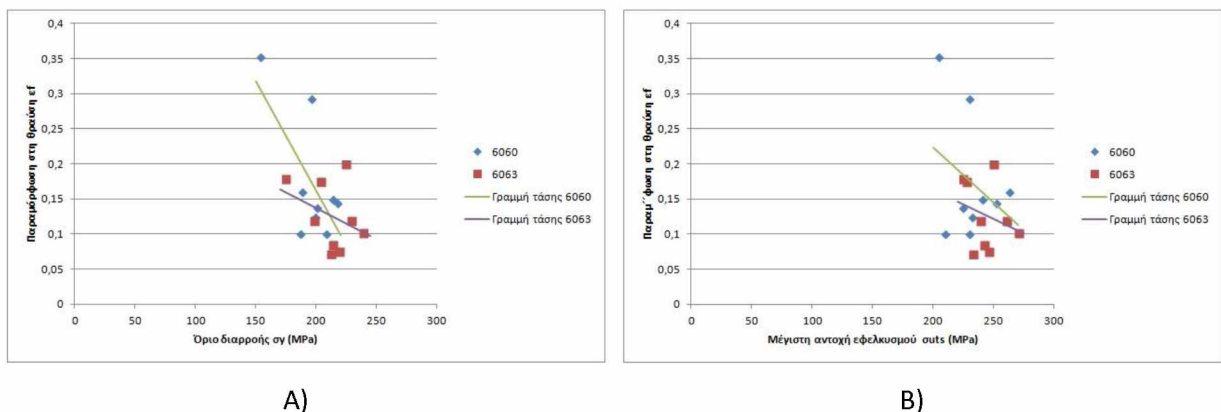
---

Τα διελάσιμα κράματα 6060 και 6063, ως θερμικά κατεργάσιμα, χρησιμοποιούνται κυρίως, έπειτα από θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης και επικείμενη τεχνητή γήρανση (T6). Για να υπάρχουν αποτελέσματα μέγιστης ισχυροποίησης από καθίζηση (peak aging), παράμετροι όπως ο χρόνος και η θερμοκρασία της κατεργασίας, πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα. Για αυτό το λόγο οι τιμές των Πινάκων 3.2 και 3.3, που φέρουν το σύμβολο T6 αναφέρονται κυρίως σε τέτοιες συνθήκες ή κοντά σε αυτές. Υπάρχουν επίσης τιμές των κραμάτων σε χυτή κατάσταση (As cast), ομογενοποιημένη (Homogenized), έπειτα από διέλαση (As extruded) καθώς και από τις κατεργασίες T4 και T5, και αποτυπώνεται έτσι, στις Εικόνες 3.2, 3.3, 3.4 και 3.5 η εξάρτηση μεταξύ των ιδιοτήτων ανάλογα με την θερμική κατεργασία τεχνητής γήρανσης που ακολουθήθηκε σε διαφορετικές περιπτώσεις.

### 4.1 Συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 και 6063

Από τις Εικόνες 3.2 και 3.4, είναι εμφανής η τάση για γραμμική μείωση της παραμόρφωσης στη θραύση καθώς αυξάνεται το όριο διαρροής και η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού, αντίστοιχα για τα κράματα 6060 και 6063. Τονίζεται, ότι αυτή η σχέση προκύπτει για υλικά με παρόμοιο ιστορικό κατεργασιών (T6), και επομένως παρόμοια μικροδομή. Ωστόσο οι αναφορές που υπάρχουν για την συμπεριφορά αυτή, είναι πιο εκτεταμένες για το όριο διαρροής [35], [36], από εκείνες για την μέγιστη αντοχή εφελκυσμού. Και στα δύο κράματα, οι συντελεστές  $R^2$ , που είναι ένα μέτρο για το πόσο καλά προσεγγίζεται η γραμμική συμπεριφορά, έχουν μεγαλύτερες τιμές για το όριο διαρροής, από ότι για τη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού (Εικόνες 3.2, 3.4). Γενικά η ολκιμότητα των κραμάτων αλουμινίου, επηρεάζεται από το κλάσμα όγκου και την κατανομή των σωματιδίων [35]. Επίσης, ο μηχανισμός θραύσης στα κράματα αλουμινίου σχετίζεται με την πυρήνωση και ανάπτυξη των οπών, που ξεκινάει συνήθως σε αυτά τα σωματίδια. Επομένως, μικρότερο όριο διαρροής, μειώνει την πυκνότητα των οπών και επιτρέπει στο υλικό να παραλάβει μεγαλύτερες παραμορφώσεις, όταν οι τάσεις φτάνουν σε κρίσιμο επίπεδο και οι οπές ξεκινάνε την συνένωση τους [51]. Ακόμη, είναι πιθανό, πως

μερικές μετρήσεις, δεν ανταποκρίνονται σε κατάσταση μέγιστης ισχυροποίησης (peak aging), αλλά την προσεγγίζουν. Αυτό σημαίνει μικρότερη ισχυροποίηση από καθίζηση και περισσότερα κραματικά στοιχεία σε στερεό διάλυμα που συνεισφέρουν στην εργοσκλήρυνση. Η αυξημένη εργοσκλήρυνση, συνδέεται με αυξημένη διαμορφωσιμότητα και κατ' επέκταση καλύτερη ολκιμότητα. Επιπλέον τα υλικά με μεγαλύτερη αντοχή, έχουν λιγότερα κραματικά στοιχεία σε στερεό διάλυμα και αναπτύσσουν ζώνες χωρίς σωματίδια καθίζησης στα σύνορα των κόκκων, γεγονός που προωθεί την περικρυσταλλική θραύση και μειώνει την ολκιμότητα [14]. Πρέπει να επισημανθεί, πως τα δοκίμια εφελκυσμού από τα οποία πάρθηκαν και οι μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων, είχαν ελαφρώς διαφορετικές διαστάσεις, όπως πάχος, ενεργό μήκος (gauge length) και πλάτος, και μερικά ήταν κυλινδρικά. Η επίδραση της γεωμετρίας στις μηχανικές ιδιότητες ωστόσο, θεωρείται μικρή. Τα υλικά που δεν έχουν υποστεί κατεργασία γήρανσης έχουν σημαντικά μειωμένη αντοχή και υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες. Όσον αφορά τις κλίσεις των τάσεων, αυτές σχετίζονται με τις παραμέτρους των κατεργασιών γήρανσης (θερμοκρασία, χρόνος), με την διαφορετικότητα των πειραματικών δεδομένων, καθώς και με το πλήθος τους. Συγκριτικά, το κράμα 6063 σε σχέση με το κράμα 6060, είναι ελαφρώς ισχυρότερο, και αυτό φαίνεται από την Εικόνα 4.1, καθώς οι τιμές του τείνουν πιο δεξιά στον οριζόντιο άξονα των τάσεων, τόσο για το όριο διαρροής όσο και για την μέγιστη αντοχή εφελκυσμού.

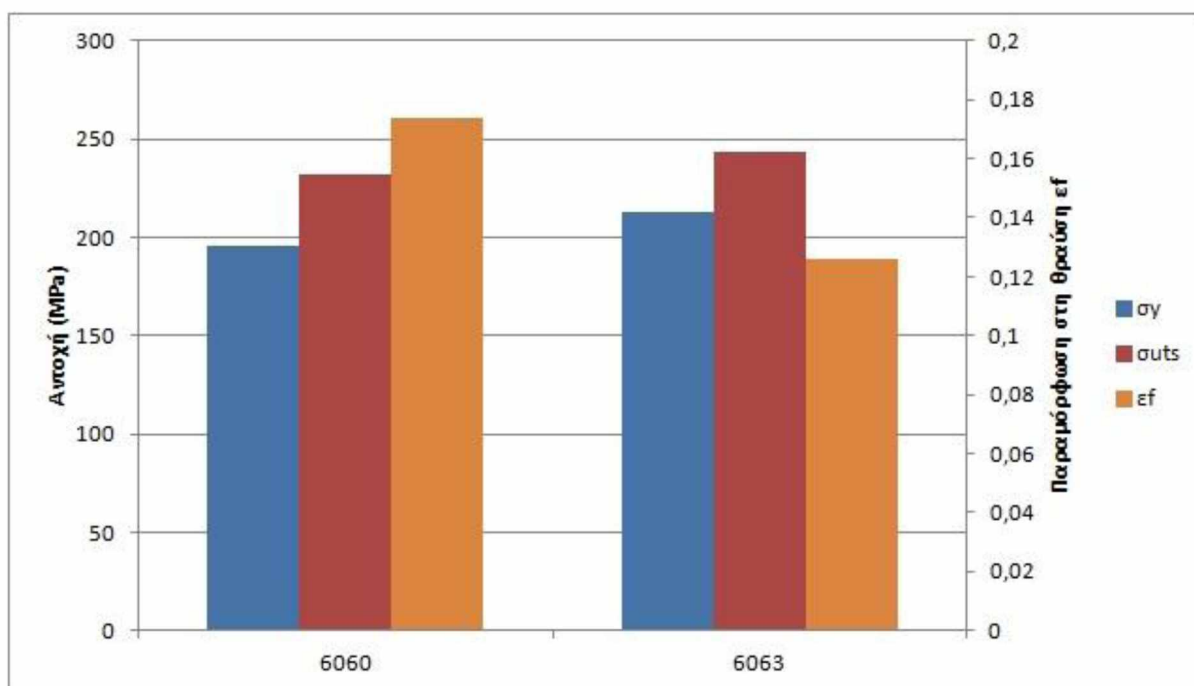


**Εικόνα 4.1** Διαγράμματα των κραμάτων 6060-6063 παραμορφώσεως στη θραύση εf και A) Ορίου διαρροής σy και B) Μέγιστης αντοχής εφελκυσμού σuts .

Παίρνοντας τις μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τις μετρήσεις με κατεργασία T6 από τους Πίνακες 3.1 και 3.2, και για τα δύο κράματα, παρατηρείται το ίδιο πράγμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1 και στην Εικόνα 4.2. Επίσης, η μέση τιμή για την ολκιμότητα στο κράμα 6060 είναι μεγαλύτερη από εκείνη του κράματος 6063, επιβεβαιώνοντας τη μείωση της ολκιμότητας για μεγαλύτερο όριο διαρροής, για αυτά τα δύο κράματα.

**Πίνακας 4.1** Μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 και 6063 για κατεργασία T6.

Κράμα	$\bar{\sigma}_y$	$\bar{\sigma}_{uts}$	$\bar{\epsilon}_f$
6060	195,9778	231,9778	0,173889
6063	212,7356	243,7478	0,125722



**Εικόνα 4.2** Ραβδόγραμμα με τις μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα κράματα 6060 και 6063 για κατεργασία T6.

Η κύρια διαφορά των κραμάτων 6060 και 6063 είναι, όπως έχει αναφερθεί, η κατά λίγο αυξημένη ποσότητα Μαγνησίου κατά βάρος του 6063. Έτσι, το κράμα 6063, έχει ελαφρώς υψηλότερη αντοχή, λόγω της ισχυροποίησης στερεού διαλύματος αλλά και της συνεισφοράς στην ισχυροποίηση μέσω του σχηματισμού σωματιδίων καθίζησης κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Στις Εικόνες 4.3 και 4.4, φαίνονται οι ελάχιστες τιμές που πρέπει να έχουν οι μηχανικές ιδιότητες, για τα διελάσιμα προφίλ των κραμάτων 6060 και 6063 αντίστοιχα, και για συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες, σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές.

Alloy	Temper	Wall Thickness e mm*	Tensile strength Rm Mpa min	Proof stress Rpo,2 Mpa min	Elongation		Brinell Hardness HB**
					A50mm % min	A % min	
EN -AW 6060	T4	$e \leq 25$	120	60	14	16	45
	T5	$e \leq 5$	160	120	6	8	55
	T6	$e \leq 3$	190	150	6	8	65
		$3 < e \leq 25$	170	140	6	8	60
	T66	$e \leq 3$	215	160	6	8	70
		$3 < e \leq 25$	195	150	6	8	65

**Εικόνα 4.3** Μηχανικές ιδιότητες διελάσιμων προφίλ του κράματος 6060 κατά EN 755-2 [52].

Alloy	Temper	Wall Thickness e mm*	Tensile strength Rm Mpa min	Proof stress Rpo,2 Mpa min	Elongation		Brinell Hardness HB**
					A50mm % min	A % min	
EN -AW 6063	T4	$e \leq 25$	130	65	12	14	45
	T5	$e \leq 3$	175	130	6	8	55
		$3 < e \leq 25$	160	110	5	7	50
	T6	$e \leq 10$	215	170	6	8	65
		$10 < e \leq 25$	195	160	6	8	60
		$e \leq 10$	245	200	6	8	75

**Εικόνα 4.4** Μηχανικές ιδιότητες διελάσιμων προφίλ του κράματος 6063 κατά EN 755-2 [53].

Το ποσοστό των διελάσιμων προϊόντων, που αποτελούνται από τα κράματα 6060 και 6063 είναι αρκετά μεγάλο, λόγω της καλής ικανότητας και διέλαση. Έτσι, υπάρχει μεγάλη παραγωγή σε αυτά τα κράματα με χαμηλό σχετικά κόστος. Επομένως, συνήθεις εφαρμογές αυτών των κραμάτων, ως διελάσιμα εξαρτήματα είναι, στο σκελετό του

αυτοκινήτου, σε πλαίσια για πόρτες και παράθυρα, σε προφυλακτήρες και σε δοκάρια για παράπλευρες κρούσεις, σε στοιχεία που απορροφούν τις κρούσεις (crash boxes) καθώς και σε εξαρτήματα που συγκρατούν τη μηχανή στο αμάξωμα (engine cradle) [9], [54]. Ως μεταλλικά φύλλα σε εξωτερικά μέρη του αυτοκινήτου, όπως, οροφή, πόρτες, καπό και πορτ μπαγκάζ, δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται αυτά τα κράματα και δεν υπάρχουν προδιαγραφές για μεταλλικά φύλλα στα συγκεκριμένα κράματα. Με κατάλληλες τεχνικές στην επεξεργασία των κραμάτων αυτών, ο κατασκευαστής, προσπαθεί να επιτύχει τέτοια αντοχή και ολκιμότητα, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των αυτοκινητοβιομηχανιών, εφόσον αυτές είναι οι ιδιότητες που καθορίζουν την απορρόφηση ενέργειας σε μία ενδεχόμενη κρούση.

## 4.2 Τρόποι βελτίωσης των ιδιοτήτων των κραμάτων 6060 και 6063

Τα κράματα αυτά, έπειτα από την διέλαση, για την κατασκευή διελάσιμων στοιχείων, υφίστανται θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης. Στη συνέχεια, αποθηκεύονται σε θερμοκρασία δωματίου για διάστημα μέχρι έξι μηνών [55] και πριν την τελική κατεργασία γήρανσης, εάν κριθεί απαραίτητο, εφαρμόζεται κάποιου είδους κατεργασία διαμόρφωσης ώστε να επιτευχθεί το απαραίτητο σχήμα. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.4, η προ-γήρανση που εφαρμόζεται μετά την διαλυτοποίηση, συνεισφέρει στην αύξηση της αντοχής και περιορίζει έτσι, τις αρνητικές επιπτώσεις της φυσικής γήρανσης. Αυτό γίνεται σε βάρος της διαμορφωσιμότητας [15], και επομένως οι παράμετροι της κατεργασίας προ-γήρανσης, πρέπει να επιλεγθούν προσεκτικά, σε περίπτωση που εφαρμοστεί κατεργασία διαμόρφωσης πριν την τεχνητή γήρανση. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της προ-γήρανσης, είναι πως σταθεροποιεί τις ιδιότητες του υλικού στο διάστημα της αποθήκευσης. Η τυπική κατεργασία γήρανσης, αφού έχει βαφεί το αυτοκίνητο, περιλαμβάνει θέρμανση στους 175 ° C για μισή ώρα [26]. Στις πειραματικές μετρήσεις, ωστόσο, ο χρόνος γήρανσης είναι αρκετές ώρες, για να υπάρξει σημαντική αύξηση της αντοχής, και δεν μεσολαβούν μεγάλα χρονικά διαστήματα μέχρι την γήρανση. Με την προ-γήρανση, οι ζώνες Γκινιέρ-Πρέστον, που σχηματίζονται δρουν ως θέσεις ετερογενούς πυρήνωσης για τα σωματίδια τύπου β", κατά τον σύντομο βιομηχανικό κύκλο γήρανσης

και προσφέρουν εξίσου σημαντική ισχυροποίηση. Συνήθως, μετά τη διέλαση τα προφίλ αλουμινίου επιμηκύνονται με ψυχρή κατεργασία, σε κάποιο βαθμό, για να ισιώσουν και να μειωθούν οι παραμένουσες τάσεις στο υλικό [56]. Για το κράμα 6063, βρέθηκε πως επιμήκυνση κατά 4 % προσέδωσε καλύτερη ολκιμότητα στο υλικό, ενώ το όριο διαρροής δε διέφερε σημαντικά, σε σχέση με επιμήκυνση 0,5 % [56]. Το υλικό με επιμήκυνση 4 %, φέρει μεγαλύτερη πυκνότητα αταξιών, οι οποίες δρουν ως θέσεις ετερογενούς πυρήνωσης και επίσης βοηθούν στην κινητική της καθίζησης κατά τη γήρανση, καθώς οι γραμμοαταξίες αποτελούν δρόμους γρήγορης διάχυσης [57]. Επομένως για τους ίδιους χρόνους γηράνσεως (για μέγιστη ισχυροποίηση), το υλικό με 4 % παραμόρφωση, προσεγγίζει την κατάσταση υπεργήρανσης με λιγότερα και μεγαλύτερα σωματίδια λόγω της διεύρυνσης της διασποράς, σε σχέση με το παραμορφωμένο υλικό κατά 0,5 %, εμφανίζοντας έτσι καλύτερη ολκιμότητα, χωρίς σημαντική θυσία στην αντοχή. Η καλύτερη ολκιμότητα σε περιπτώσεις υπεργήρανσης συνήθως σχετίζεται με φαινόμενα αποκατάστασης, τα οποία διευκολύνουν τη κίνηση των αταξιών. Στην περίπτωση παραμόρφωσης 4 % η καλύτερη ολκιμότητα, μπορεί και να οφείλεται στις κυψέλες (cells) που αναπτύσσονται μετά την ψυχρηλασία, σε συνδυασμό με τα σωματίδια καθίζησης που αναπτύσσονται σε αυτό το δίκτυο των αταξιών, ακινητοποιώντας τις, λειτουργώντας έτσι ως πηγή αταξιών και επιτρέποντας έτσι την συνέχιση της παραμόρφωσης λόγω της μικροδομής με τις κυψέλες [57]. Για ένα κράμα 6060, για παραμορφώσεις έως 10 % πριν την γήρανση, παρατηρήθηκε ελαφριά αύξηση του ορίου διαρροής και της ολκιμότητας, σε σχέση με παραμορφώσεις 0 %, 2 % και 5% και αυτό οφείλεται στις αυξημένες συγκεντρώσεις γραμμοαταξιών που προσφέρονται ως θέσεις ετερογενούς πυρήνωσης [58]. Το φαινόμενο της υπεργήρανσης δεν παρατηρήθηκε, πιθανώς λόγω του συντομότερου χρόνου γήρανσης σε σύγκριση με τον χρόνο γήρανσης για το κράμα 6063 που αναφέρθηκε. Επομένως ανάλογα με τον βαθμό της επιμήκυνσης και τον χρόνο γήρανσης, μπορούν να επιτευχθούν συγκεκριμένα αποτελέσματα στις ιδιότητες του υλικού. Σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του υλικού, έχει και ο ρυθμός ψύξης από την κατεργασία διαλυτοποίησης. Η ψύξη με νερό οδηγεί σε μεγαλύτερη αντοχή συνήθως και μικρότερη αντοχή για ψύξη με αέρα. Αυτό παρατηρήθηκε και για το κράμα 6060, και οφείλεται στην καθίζηση σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας πιο αργής ψύξης, που ελαττώνει την ποσότητα κραματικών στοιχείων για την γήρανση στη συνέχεια και το αποτέλεσμα είναι λιγότερα σωματίδια καθίζησης και μεγαλύτερα [59]. Όσον αφορά την κατεργασία της ομογενοποίησης, μεγαλύτεροι χρόνοι, οδήγησαν σε

καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, στην περίπτωση του κράματος 6063 [22]. Πιθανή εξήγηση για αυτό είναι πως με την μετατροπή των  $\beta$ -AlFeSi σωματιδίων σε  $\alpha$ -AlFeSi, που αποτελούν αργές αντιδράσεις, απελευθερώνεται μεγαλύτερη ποσότητα Πυριτίου σε στερεό διάλυμα μετά την ψύξη, κάτι που μπορεί να αυξήσει την κινούσα δύναμη για καθίζηση στην γήρανση [22]. Τέλος, πολύ σημαντικός παράγοντας που συνδέεται με τις μηχανικές ιδιότητες, είναι και η κραμάτωση, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2. Δηλαδή, ο λόγος Μαγνησίου-Πυριτίου, η ποσότητα του Χαλκού και οι ποσότητες σε Μαγγάνιο, Ψευδάργυρο και άλλα στοιχεία, όλα μπορούν να συμβάλλουν στην τροποποίηση του κράματος για ένα καλό συνδυασμό αντοχής και ολκιμότητας.



## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

---

Οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται ισχυρά από τις κατεργασίες που ακολουθούνται, και μάλιστα κυρίως τις θερμικές, για τα κράματα της σειράς 6xxx. Η κατάλληλη χημική σύσταση του κράματος παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στις τελικές ιδιότητες. Μέσα από διαφορετικές μετρήσεις πειραμάτων για θερμική κατεργασία γήρανσης, εξάχθηκαν τιμές για την αντοχή και την ολκιμότητα των διελάσιμων κραμάτων 6060 και 6063. Τα κύρια συμπεράσματα από την παρούσα εργασία είναι τα εξής :

- Σχετικά με την χημική σύσταση, κράματα της σειράς 6xxx τα οποία χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, εκ των οποίων και τα διελάσιμα 6060 και 6063, ανταποκρίνονται θετικά στην περίσσεια Πυριτίου ( $Mg/Si < 1,73$ ) όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες. Το ίδιο ισχύει και για την προσθήκη Χαλκού, μέχρι κάποιο βαθμό, τόσο στην αντοχή όσο και στην ολκιμότητα. Ακόμη, η προσθήκη Μαγγανίου, πέραν της χρησιμότητας του στον έλεγχο της μικροδομής, δύναται να προσφέρει και καλύτερη ολκιμότητα.
- Τα κράματα 6060 και 6063 έχουν χαμηλή συνολική ποσότητα σε Μαγνήσιο και Πυρίτιο, συγκρινόμενα με άλλα κράματα της σειράς 6xxx. Αυτό καθιστά την διέλαση μία ελκυστική κατεργασία για τα εν λόγω κράματα εξ' αιτίας των μεγαλύτερων ταχυτήτων που μπορούν να επιτευχθούν όπως και των περίπλοκων σχημάτων, με σημαντικά πλεονεκτήματα στην παραγωγή από πλευράς χρόνου.
- Ο γεωμετρικός τύπος των σημείων στο διάγραμμα παραμόρφωσης στη θραύση – ορίου διαρροής, προσεγγίζει τη γραμμική μείωση της παραμόρφωσης στη θραύση με το όριο διαρροής και για τα δύο εξεταζόμενα κράματα. Αυτή η συμπεριφορά έχει παρατηρηθεί και σε άλλα κράματα της σειράς 6xxx. Για τα δύο αυτά κράματα συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε η γραμμική αυτή μείωση και στο αντίστοιχο διάγραμμα παραμόρφωσης στη θραύση – μέγιστης αντοχής εφελκυσμού. Μάλιστα, η συσχέτιση του ορίου διαρροής με την παραμόρφωση στη θραύση, φαίνεται να είναι καλύτερη από εκείνη για την μέγιστη αντοχή εφελκυσμού και στα δύο κράματα. Επιβεβαιώνεται, ακόμη, πως το κράμα 6063 έχει καλύτερη αντοχή, αλλά χειρότερη ολκιμότητα από το κράμα 6060.

- Διελάσιμα συστατικά μέρη των αυτοκινήτων χρησιμοποιούνται κυρίως ως δομικά στοιχεία ( σκελετός ) και ως στοιχεία που απορροφούν κρούσεις. Ως τέτοια, λοιπόν, πρέπει να ικανοποιούν συνδυαστικά τις απαιτήσεις αντοχής και τις απαιτήσεις σε ολκιμότητα που θέτει η αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς αυτές είναι σημαντικές παράμετροι που καθορίζουν την απορρόφηση ενέργειας. Με κατάλληλη κατεργασία προ-γήρανσης ή/και επιμήκυνσης του προφίλ, πριν την τελική θερμική κατεργασία τεχνητής γήρανσης, ενδέχεται να υπάρχει βελτίωση στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Παρεμβάσεις, επίσης, στις θερμικές κατεργασίες διαλυτοποίησης και ομογενοποίησης, μπορούν να προσφέρουν σημαντικές αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες.
- Στην παρούσα εργασία δεν μελετήθηκαν φαινόμενα ανισοτροπίας και η επίδραση τέτοιων φαινομένων στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων 6060 και 6063. Δηλαδή, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν μετρήσεις από δοκίμια τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση της διέλασης. Ακόμη, παρά το γεγονός πως με την προ-γήρανση μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά πλεονεκτήματα στην αντοχή για πολλά κράματα της σειράς 6xxx, χρήσιμη θα ήταν και μια συστηματική μελέτη για την προ-γήρανση και την επίδρασή της στις ιδιότητες, συγκεκριμένα για τα διελάσιμα κράματα 6060 και 6063.

## Βιβλιογραφία

- [1] Β. ΔΟΥΒΙΤΣΑΣ, Εγκυκλοπαίδεια Δομή, τόμ. ΙΙ, Αθήνα: ΔΟΜΗ Α.Ε, pp. 374-376.
- [2] J. D. & Associates, Aluminium and Aluminium Alloys, William W.Scott, Jr..
- [3] E. S. Jr., Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Pergamon, 2001.
- [4] Y. D. Kai Li, «Simultaneously enhanced strength and ductility of 6xxx Al alloys via manipulating meso-scale and nano-scale structures guided with phase equilibrium,» *Journal of Materials Science & Technology*, pp. 139-148, 2020.
- [5] F. Ozturk, «Effects of aging parameters on formability of 6061-O alloy,» *Materials & Design*, pp. 4847-4852, 2010.
- [6] M. Usta, «The effect of extrusion speed on the structure and corrosion properties of aged and non-aged 6063 aluminium alloy,» *Materials Chemistry and Physics*, pp. 1357-1360, 2011.
- [7] S. Thomesen, «Influence of stress state on plastic flow and ductile fracture of three 6000-series aluminium alloys,» *Materials Science and Engineering: A*, 2020.
- [8] E. Georgantzia, «Aluminium alloys as structural material: a review of research,» *Engineering Structures*, 2021.
- [9] J. HIRSCH, «Recent development in aluminium for automotive applications,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 1995-2002, 2014.
- [10] H. ZHONG, «Effect of alloy composition and heat treatment on mechanical performance of 6xxx aluminium alloys,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 2174-2178, 2014.
- [11] L. Cao, «The influence of Mg/Si ratio and Cu content on the stretch formability of 6xxx aluminium alloys,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 688-697, 2016.
- [12] M. S.Remoe, «The effect of alloying elements on the ductility of Al-Mg-Si alloys,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 60-72, 2017.
- [13] L. Li, «Effect of aging treatment on the microstructure and flow behaviour of 6063 aluminium alloy compressed over a wide range of strain rates,» *International Journal of Impact Engineering*, pp. 72-80, 2016.
- [14] T.Borvik, «Work-hardening and ductility of artificially aged AA6060 aluminium alloy,» *Mechanics of Materials*, pp. 100-117, 2016.
- [15] L. C. Xiaodong Wu, «Influence of pre-ageing on the stretch formability of Al-Mg-Si automotive sheet alloys,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 79-85, 2017.
- [16] H. J.Roven, «Dynamic precipitation during severe plastic deformation of an Al-Mg-Si aluminium alloy,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 54-58, 2008.
- [17] M.Hockauf, «Simultaneous improvement of strength and ductility of Al-Mg-Si alloys by combining equal-channel angular extrusion with subsequent high-temperature short-time ageing,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 167-171, 2009.
- [18] A. Mroz, «The complex influence of aluminium aging on the dynamic response of the thin-walled AL-6060 alloy profile,» *Thin-Walled Structures*, pp. 147-153, 2014.
- [19] L.-M. Rymer, «Artificial aging time influencing the crack propagation behaviour of the aluminium alloy 6060 processed by equal channel angular pressing,» *Materials Science*

*and Engineering: A*, 2021.

- [20] Z. Xu, «Mechanical properties and surface characteristics of an AA6060 alloy strained in tension at cryogenic and room temperature,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 350-358, 2015.
- [21] L.-x. LI, «Influence of heat treatment conditions on bending characteristics of 6063 aluminium alloy sheets,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 1498-1506, 2017.
- [22] P. S. O.-S. A. LRIVAS, «EFFECT OF THE MICROSTRUCTURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND SURFACE FINISH OF AN EXTRUDED AA-6063 ALUMINIUM ALLOY,» *Advanced Materials Science & Technology*, pp. 15-23, 1999.
- [23] E. S. P. S. C. G. Gonzalez, «Effect of 0,1 % vanadium addition on precipitation behaviour and mechanical properties of Al-6063 commercial alloy,» *Journal of Materials Science*, pp. 7361-7373, 2006.
- [24] L. Cao, «Effect of pre-ageing on dynamic strain ageing in Al-Mg-Si alloys,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 323-331, 2017.
- [25] X. Liu, «Microstructural formation in hypereutectic Al-Mg<sub>2</sub>Si with extra Si,» *Journal of Alloys and Compounds*, pp. 212-216, 2009.
- [26] K. Hono, «Pre-precipitate clusters and precipitation processes in Al-Mg-Si alloys,» *Acta Materialia*, pp. 1537-1548, 1999.
- [27] H. Liu, «Effect of natural aging and pre-straining on the hardening behaviour and microstructural response during artificial aging of an Al-Mg-Si-Cu alloy,» *Materials & Design*, pp. 329-339, 2016.
- [28] L. Donati, «Microstructure analysis of aluminum extrusion: Prediction of microstructure on AA6060 alloy,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 156-162, 2008.
- [29] G. Haidemenopoulos, «Modelling of microsegregation and homogenization of 6061 extrudable Al-alloy,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 63-73, 2007.
- [30] Y. Birol, «The effect of homogenization practice on the microstructure of AA6063 billets,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 250-258, 2004.
- [31] Y. BIROL, «Precipitation during homogenization cooling in AlMgSi alloys,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 1875-1881, 2013.
- [32] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, Τζιόλα, 2007.
- [33] T. Borvik, «Effects of particles and solutes on strength, work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys,» *Mechanics of Materials*, pp. 58-72, 2014.
- [34] Z. Jia, «Influence of interrupted quenching and pre-ageing on the bake hardening of Al-Mg-Si alloy,» *Materials Science and Engineering: A*, pp. 991-998, 2016.
- [35] T. Borvik, «Influence of microstructure on work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys,» *Materials & Design*, pp. 31-44, 2015.
- [36] D. Lloyd, «The scaling of the tensile ductile fracture strain with yield strength in Al alloys,» *Scripta Materialia*, pp. 341-344, 2003.
- [37] G. G. J. M. P. P. Paloma Adeva, «Science Direct,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/equal-channel-angular-extrusion>.
- [38] J. Royset, «Al-Mg-Si billets with high extrudability-state of the art and beyond,»

- materials today: PROCEEDINGS*, pp. 185-192, 2019.
- [39] M. C. M. R. P. W. S. Lukasz Polus, «The Evaluation of the Fracture Surface in the AW-6060 T6 Aluminium Alloy under a Wide Range of Loads,» *Metals*, 2019.
- [40] *Laboratory of Materials, University of Thessaly*.
- [41] C. Menapace, «Effect of a dual-rate ageing treatment on the tensile properties of a commercial 6060 Al alloy,» *Materials Science and Engineering: A*, 2021.
- [42] C. B. O. A. L. P. M. S. Silva, «Effect of Chemical Composition Variation on Microstructure and Mechanical Properties of a 6060 Aluminium Alloy,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 129-134, 2004.
- [43] G. D. Urso, «The influence of process parameters on mechanical properties and corrosion behaviour of friction stir welded aluminium joints,» *Procedia Engineering*, pp. 591-596, 2017.
- [44] R. A. Siddiqui, «Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 234-240, 2000.
- [45] I. P. S. P. A. T. A. R. M. K. G. S. G. P. Athanasios Vazdirvanidis, «Examination of Formability Properties of 6063 Alloy Extruded Profiles for the Automotive Industry,» *Metals*, 2019.
- [46] K. Alaneme, «Fracture toughness (K1c) and tensile properties of as-cast and age-hardened aluminium (6063)-silicon carbide particulate composites,» *Scientia Iranica*, pp. 992-996, 2012.
- [47] J. Asensio-Lozano, «Effect of Processing Steps on the Mechanical Properties and Surface Appearance of 6063 Aluminium Extruded Products,» *Materials*, pp. 4224-4242, 2014.
- [48] K. Ozsoy, «Examining mechanical properties of profiles manufactured aluminium extrusion dies using powder bed fusion,» *Measurement*, 2021.
- [49] C. M. A. Munitz, «Aging impact on mechanical properties and microstructure of Al-6063,» *Journal of Materials Science*, pp. 2529-2538, 2000.
- [50] S. Nandy, «Influence of Ageing on Mechanical Properties of 6063 Al Alloy,» *materials today: PROCEEDINGS*, pp. 1234-1242, 2015.
- [51] F. Hannard, «Characterization and micromechanical modelling of microstructural heterogeneity effects on ductile fracture of 6xxx aluminium alloys,» *Acta Materialia*, pp. 558-572, 2016.
- [52] «Aluminco,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](https://www.aluminco.com/media/155961/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6060_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf).
- [53] «Aluminco,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.aluminco.com/media/155967/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6063\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](https://www.aluminco.com/media/155967/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6063_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf).
- [54] E. A. Association, «European Aluminium,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.european-aluminium.eu/media/1539/aam-products-2-extruded-products.pdf>.
- [55] R. Prillhofer, «Property Criteria for Automotive Al-Mg-Si Sheet Alloys,» *Materials*, pp. 5047-5068, 2014.
- [56] H. Granum, «Effect of pre-stretching on the mechanical properties of three artificially

- aged 6xxx series aluminium alloys,» *materials today COMMUNICATIONS*, 2021.
- [57] K. Qvale, «An experimental study on pre-stretched double-chamber 6000-series aluminium profiles subjected to quasi-static and dynamic axial crushing,» *Thin-Walled Structures*, 2021.
- [58] K. MARTHINSEN, «Combined effect of deformation and artificial aging on mechanical properties of Al-Mg-Si alloy,» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, pp. 1824-1830, 2012.
- [59] B. H. Frodal, «The role of quench rate on the plastic flow and fracture of three aluminium alloys with different grain structure and texture,» *International Journal of Engineering Science*, 2020.