

# Επίδραση Κατεργασίας Τεχνητής Γήρανσης στις Μηχανικές Ιδιότητες

Κράματος Αλουμινίου 2024-T3

Χρήστος Λούστας (AM:1055)

E: [cloustasver90@outlook.com](mailto:cloustasver90@outlook.com)

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

2014.



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 13700/1  
Ημερ. Εισ.: 27-03-2015  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ  
2014  
ΛΟΥ

© Χρήστος Αλέξανδρος Λούστας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας 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. Κερμανίδης Αλέξης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Χαϊδεμενόπουλος Γρηγόρης  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Ζερβάκη Άννα  
ΕΔΙΠ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κκ. Κερμανίδη Αλέξη , για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κ. Χαϊδεμενόπουλο Γρηγόρη και κα. Ζερβάκη Άννα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ευχαριστώ επίσης τα μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής & Αντοχής των Υλικών για την καθοδήγηση τους καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων που χρειάστηκαν. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου και στον αδερφό μου, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Χρήστος Αλέξανδρος Λούστας

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της επίδρασης θερμοκρασίας και χρόνου γήρανσης στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 2024-T3. Στο πλαίσιο της πειραματικής διερεύνησης, δοκίμια Al 2024 εκτέθηκαν σε τεχνητή γήρανση σε ειδική συσκευή θερμικών κατεργασιών για διάφορους χρόνους και θερμοκρασίες και στην συνέχεια σε μηχανική δοκιμή για την εξαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι το όριο διαρροής όπως και το όριο θραύσης, αυξάνονται σε σχέση με το αρχικό υλικό μέχρι ενός χρονικού σημείου γήρανσης και έπειτα από αυτό, μειώνονται όσο συνεχίζει η τεχνητή γήρανση. Η μέγιστη επιμήκυνση θραύσης διαπιστώθηκε πως δεν μπορεί να αυξηθεί πολύ σε σχέση με το αρχικό υλικό, καθώς παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση αρχικά αλλά έπειτα μειωνόταν όσο ο χρόνος γήρανσης αυξανόταν. Επίσης παρατηρήθηκε πως όσο αυξανόταν η θερμοκρασία γήρανσης τόσο πιο απότομες και γρήγορες ήταν οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Από την σύγκριση και την συζήτηση αυτών των αποτελεσμάτων, τα οποία εμφανίζονται υπό την μορφή πινάκων αλλά και διαγραμμάτων, γίνεται περισσότερο κατανοητή η συμπεριφορά του συγκεκριμένου υλικού κατά την γήρανση γενικότερα και κατά συνέπεια η ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
1.1	Γενικά	9
1.2	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	9
1.3	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	10
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	<b>11</b>
2.1	Το Αλουμίνιο και τα Κράματά του	11
2.1.1	Κράματα Διαμόρφωσης του Αλουμινίου	12
2.1.2	Αλουμίνιο 2024-T3	15
2.2	Θερμική Κατεργασία Γήρανσης Κράματος Al 2024	15
2.3	Μηχανικές Ιδιότητες των Μετάλλων	18
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Πειραματική Διαδικασία</b>	<b>19</b>
3.1	Θερμική Κατεργασία	19
3.2	Δοκιμές Εφελκυσμού	21
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>23</b>
4.1	Σύγκριση Διαγραμμάτων Τάσης-Παραμόρφωση	23
4.2	Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων	30
4.2.1	Μεταβολή Όριου Διαρροής	30
4.2.2	Μεταβολή Όριου Θραύσης	32
4.2.3	Μεταβολή Επιμήκυνσης Θραύσης	34
4.2.4	Μεταβολή Ειδική Ενέργεια Παραμόρφωσης	36
4.2.5	Μεταβολή Συντελεστή Εργοσκλήρυνσης	38
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>39</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>		<b>40</b>

## Κατάλογος Πινάκων

1.1	Κύριες προσθήκες κραμάτων αλουμινίου και η επίδρασή τους	12
2.1	Κατά βάρος σύσταση (%) του κράματος Al 2024	15
3.1	Χρονική διάρκεια τεχνητής γήρανσης ανά θερμοκρασία	22
4.1	Αριθμητικές τιμές ορίου διαρροής	30
4.2	Αριθμητικές τιμές ορίου θραύσης	32
4.3	Αριθμητικές τιμές επιμήκυνσης θραύσης	34
4.4	Αριθμητικές τιμές ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης	36
4.5	Αριθμητικές τιμές συντελεστή εργοσκλήρυνσης	38

## Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Διάγραμμα φάσεων Al-Cu με τις καμπύλες solvus και διαδικασία ισχυροποίησης σε βήματα	16
2.2	Μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4%Cu με τον χρόνο γήρανσης για δύο θερμοκρασίες	17
2.3	Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης και ορισμός του ορίου διαρροής, του ορίου θραύσης	18
3.1	Δοκίμια Εφελκυσμού Κράματος Al-2024	19
3.2	Thermawatt TGM 3262	19
3.3	Δοχείο εμπάπτυσης με πάγο	20
3.4	Θερμόμετρο ακριβείας	20
3.5	Φούρνος ακριβείας Thermawatt TGT 50	21
3.6	Διαστάσεις Δοκιμίων Εφελκυσμού	22
3.7	Τοποθέτηση δοκιμίου στην μηχανή εφελκυσμού	22
3.8	Δοκίμιο με προσαρτημένο επιμηκυνσιόμετρο στην μηχανή εφελκυσμού	22
4.1	Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων Al 2024-T3 πριν και μετά την στερεή διαλυτοποίηση	23
4.2	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης στους 170 °C	24
4.3	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης στους 190 °C	25
4.4	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης στους 210 °C	26
4.5	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης δύο ωρών	27
4.6	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης έξι ωρών	27
4.7	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης εννέα ωρών	28



4.8	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμών τεχνητής γήρανσης δέκα πέντε ωρών	28
4.9	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμών τεχνητής γήρανσης είκοσι τεσσάρων ωρών	29
4.10	Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμών τεχνητής γήρανσης εξήντα τριών ωρών	29
4.11	Διάγραμμα ορίου διαρροής-χρόνου-θερμοκρασίας	31
4.12	Διάγραμμα ορίου θραύσης-χρόνου-θερμοκρασίας	33
4.13	Διάγραμμα επιμήκυνσης θραύσης-χρόνου-θερμοκρασίας	35
4.14	Διάγραμμα ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης-χρόνου-θερμοκρασίας	37
4.15	Διάγραμμα συντελεστών εργοσκληρυνσης για 63 ώρες γήρανσης	38

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Το κράμα αλουμινίου (2024-T3) χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια στο τομέα της αεροναυπηγικής λόγω των καλών ειδικών μηχανικών του ιδιοτήτων. Είναι ένα κράμα Al-Cu και ανήκει στα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου, που σημαίνει ότι επιδέχεται βελτίωση των ιδιοτήτων αντοχής του μέσω θερμικής κατεργασίας. Η τελική αντοχή, εργοσκληρυνση και ολκιμότητα του, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατεργασία που έχει υποστεί και η κατανόηση μεταξύ παραμέτρων γήρανσης και ιδιοτήτων είναι εξαιρετικά σημαντική. Αίτιο της αλλαγής των ιδιοτήτων μέσω θερμικής κατεργασίας είναι οι μεταβολές που συμβαίνουν στην μικροδομή του υλικού.

Πάνω από μια θερμοκρασία, περίπου 490 °C, το αλουμίνιο 2024 καθίσταται ένα στερεό διάλυμα, το οποίο έπειτα εάν ψυχθεί απότομα (βαφή) διατηρεί την δομή που έχει εκείνη την στιγμή. Η δομή αυτή όμως αλλάζει με τον χρόνο ακόμα και όταν παραμένει το υλικό σε θερμοκρασία δωματίου. Εάν δε θερμανθεί περαιτέρω μετά την ψύξη σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες (γήρανση), σχηματίζονται στην δομή του φάσεις ισχυροποίησης. Αυτή η εξέλιξη της μικροδομής οδηγεί σε αύξηση τόσο της σκληρότητας όσο και της αντοχής του κράματος. Πέραν όμως ενός βέλτιστου χρόνου γήρανσης παρατηρείται μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο υλικό, που μελετούσαν την γήρανση του αλουμινίου 2024-T3 και την επίδραση αυτής στην σκληρότητα, στην αντοχή σε κόπωση και στην διάβρωση καθώς και στις μηχανικές του ιδιότητες [1] [2] [3] [4]. Παρόλα αυτά, λόγω του μεγάλου εύρους συνδυασμών χρόνων γήρανσης-θερμοκρασιών, η έρευνα της επίδρασης της γήρανσης στις μηχανικές ιδιότητες χρήζει περαιτέρω μελέτης.

### 1.2 Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια συστηματική πειραματική μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος 2024-T3 μετά από κατεργασία τεχνητής γήρανσης. Από την εργασία αυτή προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα :

- Πειραματικά δεδομένα σχετικά με την μεταβολή του ορίου διαρροής, του ορίου θραύσης, της παραμόρφωσης θραύσης και της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης για διαφορετικές συνθήκες τεχνητής γήρανσης.
- Επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου τεχνητής γήρανσης στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.
- Προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου γήρανσης, για αποφυγή υπεργήρανσης.

### 1.3 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία χωρίζεται σε 5 Κεφάλαια. Το **1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** είναι η εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάζεται το θέμα, ο στόχος καθώς και η οργάνωση της εργασίας. Στο **2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στα θερμικά κατεργάσιμα κράματα και τις μεθόδους τεχνητής. Στο **3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται παρουσίαση της πειραματικής μεθοδολογίας. Δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις προδιαγραφές σύμφωνα με τις οποίες έγιναν τα πειράματα και περιγράφονται οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές δοκιμές. Στο **4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης υπό τη μορφή διαγραμμάτων και πινάκων και γίνεται σχολιασμός αυτών. Τέλος, στο **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** εξάγονται συμπεράσματα, βασισμένα στα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και προτείνονται τομείς που θα μπορούσαν να διερευνηθούν επιπλέον.

## 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Το Αλουμίνιο και τα Κράματά του

Το αργίλιο ή αλουμίνιο είναι το χημικό στοιχείο με σύμβολο Al και ατομικό αριθμό 13. Είναι ένα αργυρόλευκο μέταλλο - στοιχείο που ανήκει στην ομάδα IIIA (13) του περιοδικού συστήματος μαζί με το βόριο. Είναι το πιο άφθονο μέταλλο στο φλοιό της Γης και συνολικά το τρίτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο συνολικά στον πλανήτη μας, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Κατά βάρος αποτελεί περίπου το 8% του στερεού φλοιού. Ωστόσο είναι πολύ δραστικό χημικά ώστε να βρίσκεται στη φύση ως ελεύθερο μέταλλο. Αντίθετα, βρίσκεται ενωμένο σε πάνω από 270 διαφορετικά ορυκτά. Η κύρια πηγή για τη βιομηχανική παραγωγή του μετάλλου είναι ο βωξίτης.

Το αλουμίνιο έχει (φαινομενικά) μεγάλη ικανότητα στο να αντιστέκεται στη διάβρωση. Αυτό στην ουσία συμβαίνει γιατί με την έκθεση του μετάλλου στην ατμόσφαιρα σχηματίζει στιγμιαία ένα λεπτό επιφανειακό, μη ορατό, στρώμα οξειδίου, που εμποδίζει τη βαθύτερη διάβρωσή του (φαινόμενο της παθητικοποίησης). Λόγω της μεγάλης χημικής συγγένειας με το οξυγόνο, αν αφεθεί στον αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα  $Al_2O_3$ , πάχους περίπου 50 Å, το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία. Επίσης, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής του πυκνότητας και της μεγάλης του ικανότητας να δημιουργεί μεγάλη ποικιλία κραμάτων, έγινε στρατηγικό μέταλλο για την αεροδιαστημική (και όχι μόνο) βιομηχανία. Είναι, επίσης, εξαιρετικά χρήσιμο στη χημική βιομηχανία, τόσο αυτούσιο ως καταλύτης, όσο και με τη μορφή διαφόρων ενώσεων του [5].

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί, κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου ισούται με 75% αυτής του χαλκού, λαμβανομένης, όμως, υπόψιν της χαμηλής του πυκνότητας, το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται ως καλύτερος αγωγός.

Όπως και το καθαρό αλουμίνιο έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και έχουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος. Η επίδραση των προσθηκών στις ιδιότητες του αλουμινίου φαίνονται στον **πίνακα 2.1**.

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

**Πίνακας 2.1 :** Κύριες προσθήκες κραματικών στοιχείων αλουμινίου και η επίδρασή τους. [6]

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί.

Η σύσταση και στους δύο τύπους δηλώνεται με έναν τετραψήφιο αριθμό ο οποίος υποδηλώνει τις κύριες προσμίξεις, και σε ορισμένες περιπτώσεις το βαθμό καθαρότητας. Για χυτά κράματα τα δύο τελευταία ψηφία χωρίζονται με τελεία. Μετά από αυτά τα ψηφία ακολουθεί μια παύλα και ο προσδιορισμός της βασικής κατεργασίας – ένα γράμμα και πιθανά ένας μονοψήφιος έως τριψήφιος αριθμός, με τον οποίο προσδιορίζεται η μηχανική ή/και η θερμική κατεργασία που έχει υποστεί το κράμα. Για παράδειγμα, F,H και O αναπαριστούν αντιστοίχως καταστάσεις των κραμάτων μόλις έχουν παρασκευαστεί, ενδοτράχυνσης και ανόπτησης. T3 σημαίνει ότι το κράμα έχει υποστεί κατεργασία διαλύματος, ψυξηλατηθεί και στη συνέχεια έχει υποστεί φυσική γήρανση (σκλήρυνση μέσω γήρανσης). Μια θερμική κατεργασία διαλύματος ακολουθούμενη από τεχνητή γήρανση υποδηλώνεται με T6. [7]

### 2.1.1 Κράματα Διαμόρφωσης του Αλουμινίου

Τα κράματα διαμόρφωσης χωρίζονται σε:

A) *κράματα που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.* Πρόκειται για κράματα των σειρών 1000, 3000, 5000. Τα κράματα αυτά είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή μεσομεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως, με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

B) *κράματα που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμικές κατεργασίες.* Πρόκειται για κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000

**1xxx Καθαρό Αλουμίνιο.** Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο, από το βασικό 1100 (99,00% min. Al) μέχρι τα σχετικά καθαρότερα 1050/1350 (99,50% min. Al) και 1175 (99,75% min. Al). Μερικοί τύποι, σαν το 1350 που χρησιμοποιείται ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές, έχουν σφιχτές ανοχές στο ποσοστό των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για τη μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η σειρά 1xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η αντοχή είναι το βασικό στοιχείο σχεδιασμού. Περισσότερη έμφαση πρέπει να δίνεται σε εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διάβρωση, καλή ολκιμότητα και/ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, όπως φύλλα για συσκευασία, χημικό εξοπλισμό, σασί αυτοκινήτων η φορτηγών και όπου απαιτείται χρήση λαμαρίνας.

**2xxx Κράματα Al-Cu.** Η σειρά 2xxx υφίσταται θερμική κατεργασία και συνδυάζει σε κάποια κράματα υψηλή αντοχή (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες), ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις καλή συγκολλησιμότητα. Δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, έτσι βάφεται η επενδύεται κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014). Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που συνδέονται με σπειρώματα η πριτσίνια. Κάποια ειδικά κράματα της σειράς (π.χ. 2219 και 2048) συγκολλούνται, και έτσι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σε αεροσκάφη όπου η μέθοδος της συγκόλλησης προτιμάται.

Το κράμα 2195 είναι νέο σχετικά κράμα με Li για διαστημικές εφαρμογές, έχοντας πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και παρουσιάζοντας καλή συγκολλησιμότητα. Υπάρχουν επίσης διάφοροι τύποι κραμάτων (π.χ. 2124, 2324, 2419) με υψηλή ακαμψία και στους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των ακαθαρσιών που είναι υπεύθυνες για την μείωση της αντοχής, και αναπτύχθηκαν για τη βιομηχανία αεροσκαφών. Τα κράματα 2011, 2017 και 2117 χρησιμοποιούνται ευρέως για βίδες και ροδέλες.

**3xxx Κράματα Al-Mn.** Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα. Έχει πολύ καλή επιδεκτικότητα σε επιχάλκωση. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται ευρέως σε σκεύη κουζίνας και για χημικό εξοπλισμό όπως και σε κτιριακές υποδομές. Το κράμα 3105 είναι ένα από τα βασικά για στέγες και πλαϊνές επικαλύψεις κτιρίων. Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς. Τα κράματα 3004 και το 3104 είναι μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων κραμάτων λόγω της χρήσης τους στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.

**4xxx Κράματα Al-Si.** Από τα δυο περισσότερο χρησιμοποιούμενα κράματα της σειράς 4xxx, το 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, θερμικά κατεργάσιμο που χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών. Από την άλλη πλευρά το 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα. Το ίδιο χαρακτηριστικό (της εύκολης σφυρηλασίας) οδηγεί στις εφαρμογές της σειράς. Πολύ καλή ολκιμότητα που οφείλεται στην ψηλή περιεκτικότητα σε Si, στη περίπτωση των σφυρήλατων προϊόντων εξασφαλίζει το γέμισμα περίπλοκων καλουπιών, στη δε περίπτωση του υλικού συγκόλλησης εξασφαλίζει πλήρωση των ρωγμών και των κενών των τεμαχίων που συγκολλούνται.

**5xxx Κράματα Al-Mg.** Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυχρηλασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση ακόμη και σε θαλάσσιο περιβάλλον, και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρυογενικό περιβάλλον κοντά στο απόλυτο 0° K. Συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω η σειρά 5xxx βρίσκει μεγάλες εφαρμογές σε κτιριακά και κατασκευές, κατασκευές γεφυρών δοχεία αποθήκευσης και πιεστικά εφαρμογές συστημάτων για θερμοκρασίες -270 °C και εφαρμογές κοντά στη θάλασσα.

**6xxx Κράματα Al-Mg-Si.** Τα κράματα της σειράς 6xxx δέχονται θερμική κατεργασία, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση. Συγκολλούνται εύκολα. Μια μοναδική τους ιδιότητα είναι η ικανότητα για διέλαση που τα κάνει την πρώτη εκλογή για αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές λύσεις όπου επίσης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή.

Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση. Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη γέφυρα Foresmo της Νορβηγίας και είναι το κράμα που η Audi έχει επιλέξει για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της.

**7xxx Κράματα Al-Zn.** Τα κράματα της σειράς 7xxx υφίστανται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι Al-Zn-Mg-Cu έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου. Υπάρχουν διάφορα κράματα της σειράς που παράγονται για την εξαιρετική τους ακαμψία, κυρίως τα 7150 και 7475 που με πολύ καλό έλεγχο του επιπέδου των ακαθαρσιών μεγιστοποιούν τον συνδυασμό αντοχής και ακαμψίας.

Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx ιστορικά είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας. Τα κράματα αυτά δεν θεωρούνται συγκολλησιμα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με πριτσίνια.

Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, έτσι σε τέτοιες συνθήκες συνήθως επενδύονται η αν πρόκειται για φύλλα χρησιμοποιούνται επαλουμινωμένα (Alclad). Στις περιπτώσεις που υπάρχει υποψία για κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων (stress corrosion cracking) πρέπει να εφαρμόζεται θερμική T73 αντί για T6.

**8xxx Κράματα Al-με άλλα στοιχεία.** Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία Fe, Ni, και Li. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: Τα Fe και Ni παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αντιπροσωπευτικό 8017).

### 2.1.2 Αλουμίνιου 2024-T3

Στην περίπτωση του Al<sub>2024</sub>-T<sub>3</sub> το κράμα εμβαπτίζεται σε θερμό διάλυμα και στην συνέχεια μορφοποιείται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες [8]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το κράμα αλουμινίου Al 2024-T<sub>3</sub>, η σύστασή του παρατίθεται στον **πίνακα 2.2**.

Συστατικό	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
Κατά βάρος σύσταση (%)	Βάση	0.5	0.5	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.1	0.25

**Πίνακας 2.2:** Κατά βάρος σύσταση (%) του κράματος Al 2024 [9].

Οι κόκκοι του Al<sub>2024</sub>-T<sub>3</sub> κράματος έχουν μέγεθος από 50 έως 700μm, με μεγαλύτερο μήκος προς τη διεύθυνση εξέλασης, τα διμεταλλικά σωματίδια εμφανίζουν μέγεθος 30μm [10]. Εμφανίζει αντοχή σε εφελκυσμό 84 MPa, μέτρο ελαστικότητας (yield strength) 345 MPa και ειδικό βάρος 2.73 g/cm<sup>3</sup>. Οι μηχανικές του ιδιότητες σε συνδυασμό με τη χαμηλή του πυκνότητα το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές αεροναυπηγικής [9]. Τα σωματίδια S φάσης (Al<sub>2</sub>CuMg) αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό (~61%) διαμεταλλικών σωματιδίων που περιέχονται στο Al 2024-T<sub>3</sub> κράμα, ενώ αποτελούν το ~2.7% της επιφάνειάς του.

## 2.2 Θερμική Κατεργασία Γήρανσης Κράματος Al 2024

Θερμική κατεργασία ονομάζεται το σύνολο των διεργασιών που περιλαμβάνει τη θέρμανση και ψύξη μεταλλικού προϊόντος σε στερεά κατάσταση και σε καθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες με σκοπό την πρόσδοση συγκεκριμένων αναγκαιών και επιθυμητών ιδιοτήτων σ' αυτό.

Η θερμική κατεργασία για την ισχυροποίηση των κραμάτων αλουμινίου πραγματοποιείται με καθίζηση. Η καθίζηση μιας δεύτερης φάσεως ή μιας ενδομεταλλικής ενώσεως από ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους για την ισχυροποίηση των κραμάτων. Το ίζημα της δεύτερης φάσεως, με τη μορφή λεπτής διασποράς σωματιδίων, εμποδίζει την ολίσθηση των αταξιών και αυξάνει την αντοχή του κράματος. Η καθίζηση είναι ένας διαχυτικός μετασχηματισμός φάσεων και πραγματοποιείται με πυρήνωση και ανάπτυξη.

Στο κράμα αλουμινίου 2024-T<sub>3</sub> η ισχυροποίηση αυτή γίνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl<sub>2</sub>, φάσεις θ και θ', σε περιοχές με χαμηλό ποσοστό Mg, όσο και των CuMgAl<sub>2</sub>, φάση S, σε περιοχές με μεγαλύτερο ποσοστό

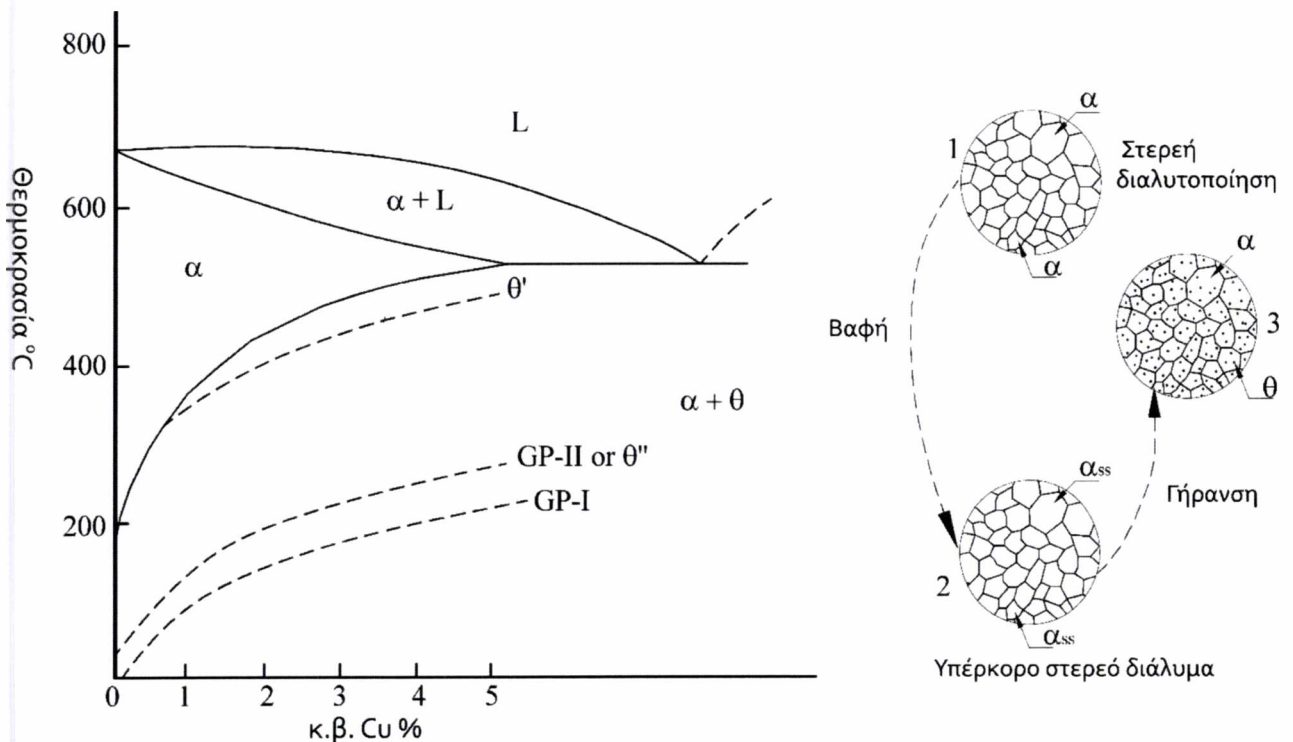
Η θερμική κατεργασία για την καθίζηση αυτών των φάσεων αποτελείται από τρία βήματα όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.1** (δεξιά):

A) Θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus για τη διάλυση των φάσεων θ, S και τον σχηματισμό ομογενούς στερεού διαλύματος Al-Cu (φάση α). Η κατεργασία αυτή ονομάζεται διαλυτοποίηση (solution treatment).



Β) Απότομη ψύξη στη θερμοκρασία δωματίου. Λόγω της απουσίας διαχύσεως, το στερεό διάλυμα της φάσεως  $\alpha$  παραμένει ως έχει με τη διαφορά ότι καθίσταται υπέρκορο (supersaturated) στη θερμοκρασία δωματίου. Έτσι αναπτύσσεται μια μεγάλη κινούσα δύναμη  $\Delta G$  για την καθίζηση των φάσεων  $\theta, S$ . Η απότομη ψύξη ονομάζεται βαφή (quench).

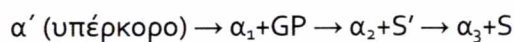
Γ) Θέρμανση σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες. Η ενεργοποίηση της διαχύσεως σε συνδυασμό με τη μεγάλη κινούσα δύναμη προκαλεί την καθίζηση των φάσεων  $\theta, S$ . Η κατεργασία αυτή ονομάζεται γήρανση (aging).



**Σχ. 2.1 :** Τμήμα του διαγράμματος φάσεων του συστήματος Al-Cu με τις καμπύλες solvus των ζωνών GP και των φάσεων  $\theta', \theta''$  (αριστερά) καθώς και η διαδικασία ισχυροποίησης σε βήματα (δεξιά).

Η γήρανση διακρίνεται σε τεχνητή γήρανση (artificial aging) αν το κράμα θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου και σε φυσική γήρανση (natural aging) αν η καθίζηση πραγματοποιείται αυθόρμητα σε θερμοκρασία δωματίου. Σύμφωνα λοιπόν με τα πιο πάνω η θερμική κατεργασία για την καθίζηση της φάσεως  $\theta, S$  αποτελείται από τη διαλυτοποίηση, τη βαφή και τη γήρανση. Πολλές φορές η ισχυροποίηση με καθίζηση ονομάζεται και σκλήρυνση με γήρανση (age hardening).

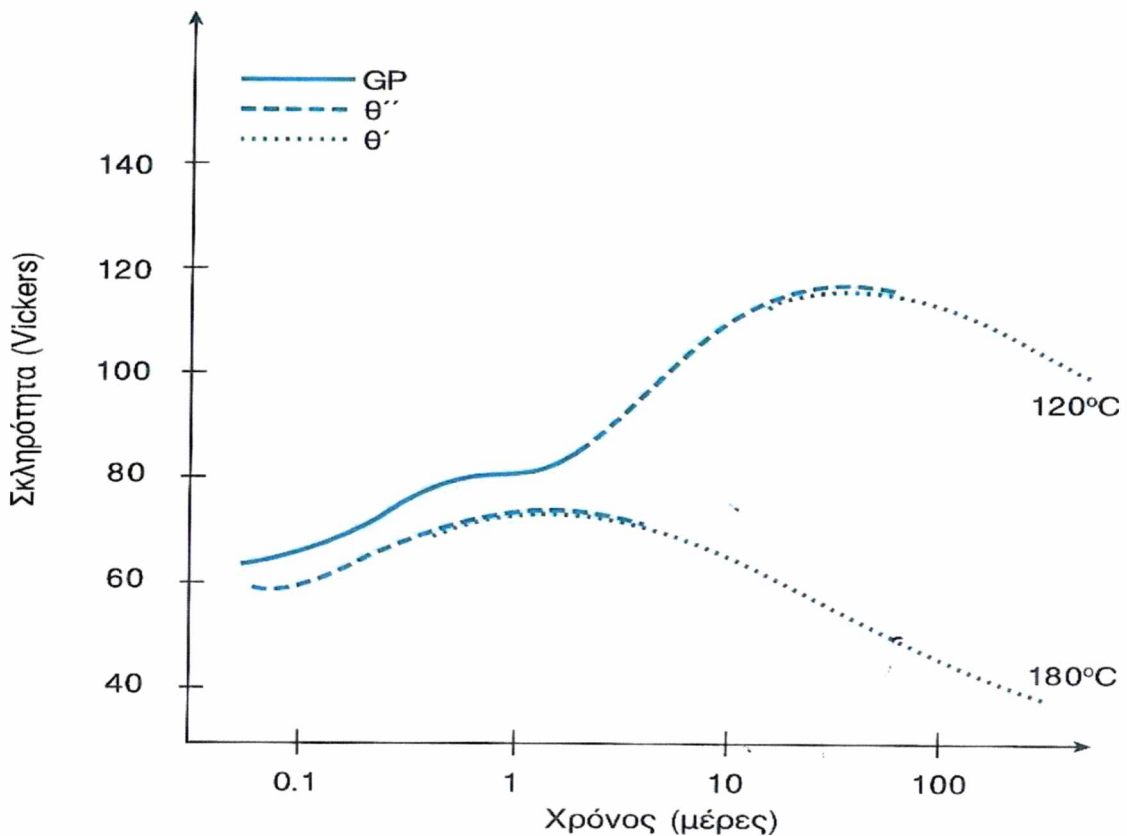
Κατά τη γήρανση δεν σχηματίζεται αμέσως η φάση ισορροπίας, αλλά προηγείται ο σχηματισμός μεταβατικών φάσεων οι οποίες, από θερμοδυναμική άποψη είναι μετασταθείς. Η σειρά καθιζήσεως είναι:



Το υπέρκορο διάλυμα  $\alpha'$  προκύπτει μετά την απότομη ψύξη από τη θερμοκρασία που πραγματοποιείται η διαλυτοποίηση. Στη συνέχεια, κατά τη γήρανση, σχηματίζονται πρώτα οι ζώνες GP.

Πρόκειται για ζώνες πλούσιες σε χαλκό που διατηρούν πλήρη συνοχή με τη μήτρα. Την καθίζηση των ζωνών GP ακολουθεί ο σχηματισμός μεταβατικής φάσης  $S'$ , διαθέτοντας μια κρυσταλλική δομή μεταξύ της μητρικής φάσεως  $\alpha$  και της φάσεως  $S$ . Έτσι, κατά τη σειρά της καθιζήσεως, καθώς τα σωματίδια αναπτύσσονται, η συνοχή μειώνεται. Από πλήρης που είναι στην αρχή της καθιζήσεως (ζώνες GP) μειώνεται σε ημισυνοχή ( $S'$ ) και καταλήγει σε μη-συνοχή ( $S$ ). Αυτή η απώλεια συνοχής κατά την καθίζηση οφείλεται στην ενέργεια παραμορφώσεως που συνοδεύει τον σχηματισμό σωματιδίων, η οποία αυξάνεται με το μέγεθος των σωματιδίων. Έτσι το σύστημα προτιμά να μη διατηρήσει τη συνοχή μεταξύ σωματιδίων και μήτρας για να ελαχιστοποιήσει τη συνολική ελεύθερη ενέργεια. [11]

Στο **σχήμα 2.1** (αριστερά) και στο **σχήμα 2.2** παρουσιάζεται το σχετικό τμήμα του διαγράμματος φάσεων Al-Cu με της καμπύλες solvus των ζωνών GP και των φάσεων  $\theta'$ ,  $\theta''$  και τη μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4%Cu με τον χρόνο γήρανσης για δύο θερμοκρασίες.

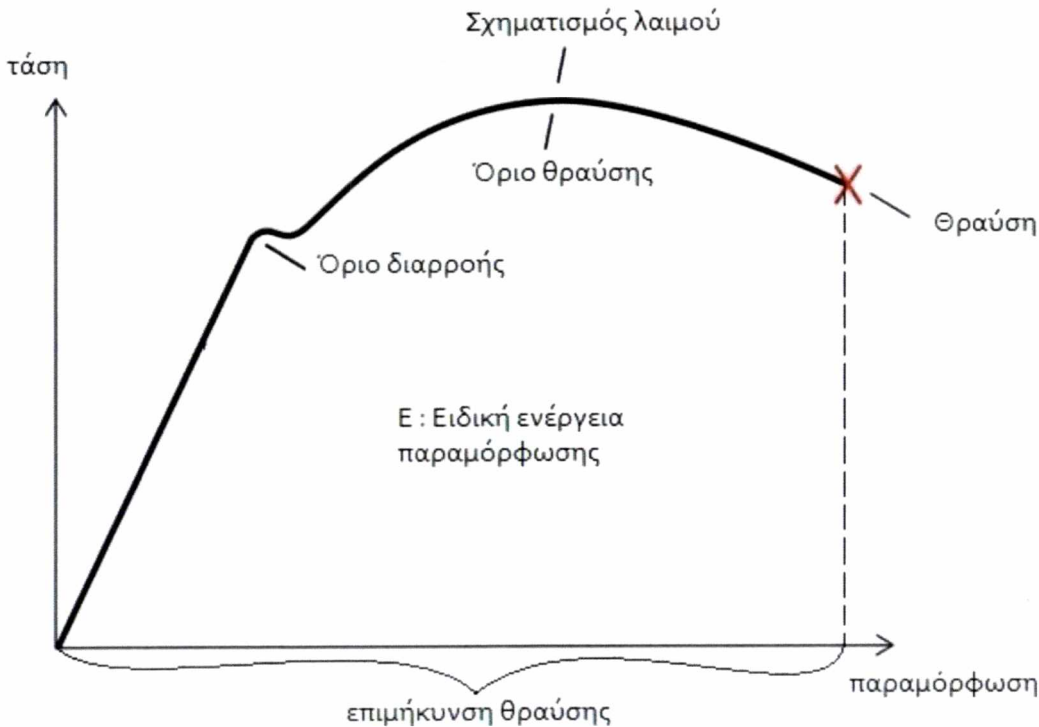


**Σχ. 2.2 :** Μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4%Cu με τον χρόνο γήρανσης για δύο θερμοκρασίες. [11]

### 2.3 Μηχανικές Ιδιότητες των Μετάλλων

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών, από το πείραμα του εφελκυσμού, είναι το όριο θραύσης σε εφελκυσμό  $\sigma_{uts}$  (MPa), το όριο διαρροής  $\sigma_y$  (MPa), η επιμήκυνση θραύσης  $\epsilon_f$  και το Μέτρο Ελαστικότητας του Young  $E$  (GPa). Επίσης άλλη μια σημαντική μηχανική ιδιότητα είναι η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης. Στο **σχήμα 2.3** παρουσιάζεται ένα τυπικό ονομαστικό διάγραμμα εφελκυσμού για ένα όλκιμο μέταλλο με τα σημεία επάνω στο διάγραμμα που καθορίζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη. Το όριο διαρροής ορίζει την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης δηλαδή είναι η οριακή τάση η οποία μόλις ξεπεραστεί το υλικό υφίσταται μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Το όριο θραύσης σε εφελκυσμό είναι η μέγιστη τάση που καταγράφεται κατά την δοκιμή εφελκυσμού, εκεί δηλαδή που αρχίζει ο σχηματισμός λαιμού στο δοκίμιο ενώ η επιμήκυνση θραύσης ορίζεται από την διαφορά του τελικού μήκους του δοκιμίου (μετά το πέρας της δοκιμής εφελκυσμού) από το αρχικό μήκος του ως προς το αρχικό μήκος αυτό [12]. Το μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση του διαγράμματος στην γραμμική ελαστική περιοχή και η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης είναι το εμβαδόν που περικλείει η καμπύλη στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.

Λόγω του γεγονότος ότι το όριο διαρροής πολλές φορές δεν είναι ευδιάκριτο, προσδιορίζεται η συμβατική τάση διαρροής,  $\sigma_{0.2\%}$ , που είναι η τάση την στιγμή που η πλαστική παραμόρφωση είναι 0.2%.



Σχ. 2.3 : Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης και ορισμός του ορίου διαρροής, του ορίου θραύσης.

### 3. Πειραματική Διαδικασία

Οι μηχανικές ιδιότητες που μελετήθηκαν είναι τα όρια διαρροής και θραύσης, η επιμήκυνση θραύσης και η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν η εξής :

- διαλυτοποίηση των δοκιμών και βαφή
- τεχνητή γήρανση σε διαφορετικές θερμοκρασίες και χρόνους
- λείανση και δοκιμή εφελκυσμού και
- αποτίμηση των αποτελεσμάτων.

Η διαδικασία αναλύεται στην συνέχεια. Για το συγκεκριμένο εγχείρημα που προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε το αεροναυπηγικού κράμα Al 2024 σε θερμική κατεργασία T3, το πάχος του ελάσματος που πάρθηκαν τα δοκίμια ήταν 3,2 mm.

#### 3.1 Θερμική Επεξεργασία

Τα δοκίμια αρχικά δέθηκαν σε δεσμίδες των πέντε (Σχ. 3.1) λόγω των περιορισμών που υπήρχαν στο εργαστήριο, το μέγεθος των φούρνων, ώστε να γίνει η στερεή διαλυτοποίησή τους. Η διαλυτοποίηση έγινε στους ειδικούς φούρνους θερμικών κατεργασιών Thermawatt TGM 3262 (Σχ. 3.2) ισχύος 3kW του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στους  $490 \pm 5$  °C. Ο χρόνος παραμονής των δοκιμών ήταν μισή ώρα και αμέσως μετά ακολουθούσε ψύξη (<10 °C) σε νερό με πάγο (Σχ. 3.3). Η θερμοκρασία διαλυτοποίησης ελεγχόταν αυτόματα από τους φούρνους, ενώ για την εξασφάλιση σταθερής θερμοκρασίας του νερού υπήρχε συνεχής ανανέωση του πάγου και επιβεβαίωση με χρήση ειδικού θερμομέτρου θερμοστοιχείου (Σχ. 3.4). Όλα τα δοκίμια αμέσως μετά την ψύξη τοποθετήθηκαν στην κατάψυξη για αποφυγή φυσικής γήρανσης.



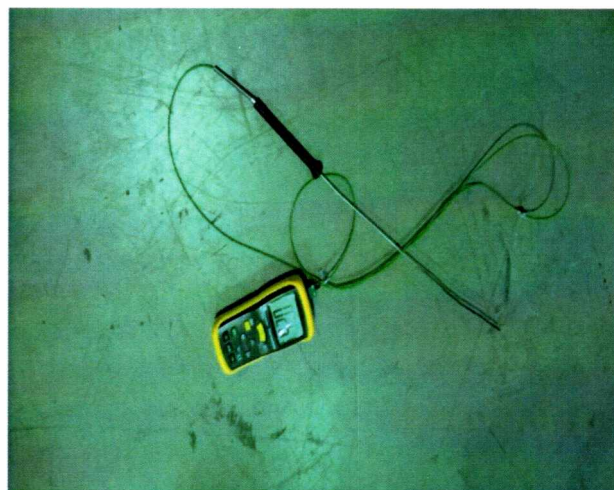
Σχ. 3.1 : Δοκίμια εφελκυσμού κράματος Al-2024.



Σχ. 3.2 : Φούρνοι Thermawatt TGM 3262.



Σχ. 3.3 : Δοχείο εμβάπτισης με πάγο.



Σχ. 3.4 : Θερμόμετρο ακριβείας.

Έπειτα, ακολούθησε η τεχνητή γήρανση, η οποία έγινε στον ειδικό φούρνο ειδικών θερμοκρασιών ακριβείας της Thermawatt TGT 50 ισχύος 0,7kW (Σχ. 3.5) στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες 170 , 190 και 210 °C. Σε κάθε χρόνο γήρανσης μελετήθηκαν δυο δοκίμια για εξασφάλιση σωστών αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι τεχνητής γήρανσης φαίνονται στον **πίνακα 3.1**. Τα δοκίμια αμέσως μετά την γήρανση επανατοποθετήθηκαν στην κατάψυξη αφού πρώτα έγινε ταξινόμηση για την αποφυγή λαθών.

Θερμοκρασία	0 h	0.5 h	1 h	2 h	4 h	6 h	9 h	15 h	24 h	48 h	63 h	98 h	
170°C	2						2	2	2	2	2	2	12
190°C				2		2	2	2	2		2		12
210°C		2	2	2	2	2	2	2				2	14

Σύνολο: 40

Πίνακας 3.1: Χρονική διάρκεια τεχνητής γήρανσης ανά θερμοκρασία.



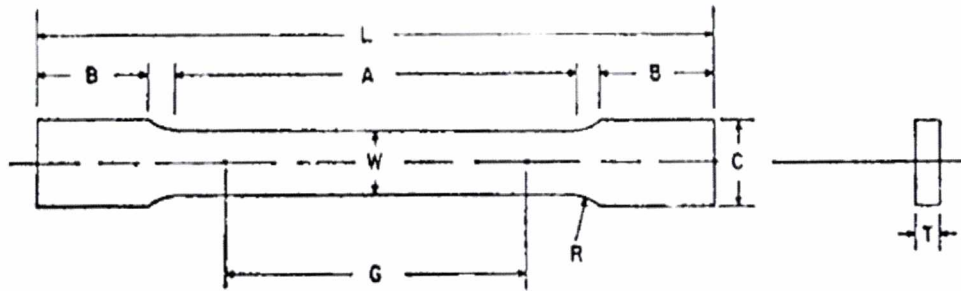
Σχ. 3.5 : Φούρνος ακριβείας Thermawatt TGT 50.

### 3.2 Μηχανικές Δοκιμές Εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 8M-01 [13]. Στο **σχήμα 3.6** παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμίων σύμφωνα με την προδιαγραφή. Κάθε δοκίμιο, αφού πρώτα λειάνθηκε σε όλο το μήκος της μειωμένης διατομής, τοποθετήθηκε στην μηχανή εφελκυσμού Instron 8801 του εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (**Σχ. 3.7**).

Η επιμήκυνση μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα προσαρτημένο επιμηκυσσιόμετρο στο μήκος αναφοράς του δοκιμίου (**Σχ. 3.8**). Οι δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενη και σταθερή μετατόπιση του εμβόλου της μηχανής με ταχύτητα 0,5 mm/min.

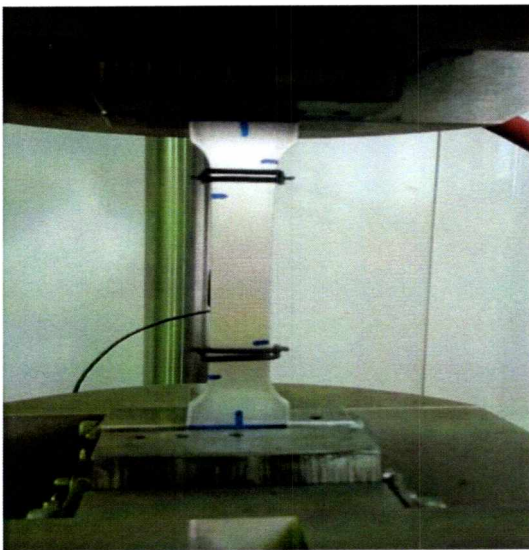
Μετά την δοκιμή εφελκυσμού έγινε αποτίμηση του ονομαστικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης από το οποίο υπολογίστηκαν η μηχανικές ιδιότητες. Σαν όριο διαρροής υπολογίστηκε η συμβατική τάση  $\sigma_{0.2\%}$ , το όριο θραύσης υπολογίστηκε ως το ανώτερο σημείο της καμπύλης σ-ε ενώ η επιμήκυνση θραύσης ως το σημείο τομής της ευθείας αποφόρτισης στο σημείο θραύσης με τον άξονα παραμορφώσεων. Από τα διαγράμματα εφελκυσμού υπολογίστηκε επίσης η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης  $U_{εiδ}$  μέσω του ολοκληρώματος της καμπύλης σ-ε.



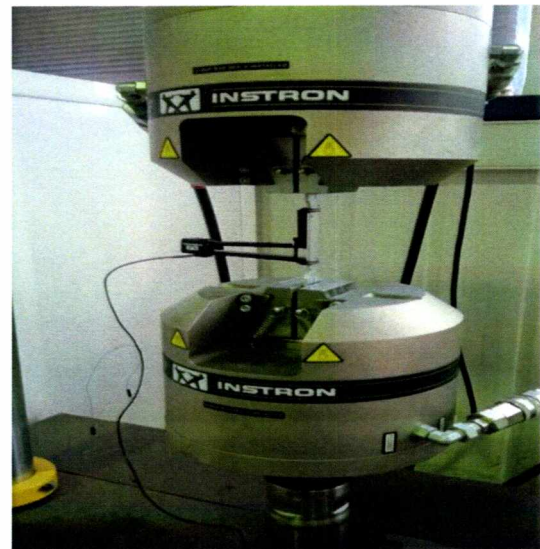
Διαστάσεις, mm

G - Μήκος μέτρησης της παραμόρφωσης	$50.0 \pm 0.1$
W - Πλάτος	$12.5 \pm 0.2$
T - Πάχος του υλικού	3.2
L - Συνολικό μήκος	200
A - Μήκος της μειωμένης διατομής	57
B - Μήκος του τμήματος λαβής	50
C - Πλάτος του τμήματος λαβής	20

Σχ. 3.6 : Διαστάσεις Δοκιμίων Εφελκυσμού.



Σχ. 3.7 : Τοποθέτηση δοκιμίου στην μηχανή στην μηχανή εφελκυσμού.

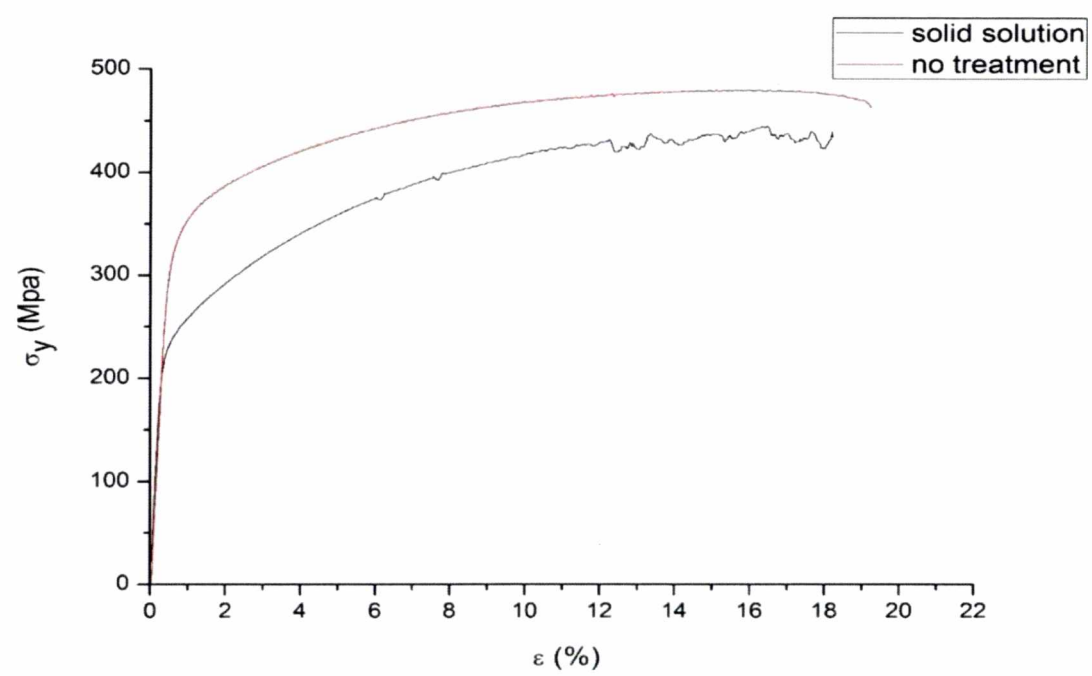


Σχ. 3.8 : Δοκίμιο με προσαρτημένο επιμηκυσιόμετρο στην Μηχανή Εφελκυσμού

## 4. Αποτελέσματα

### 4.1 Σύγκριση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης

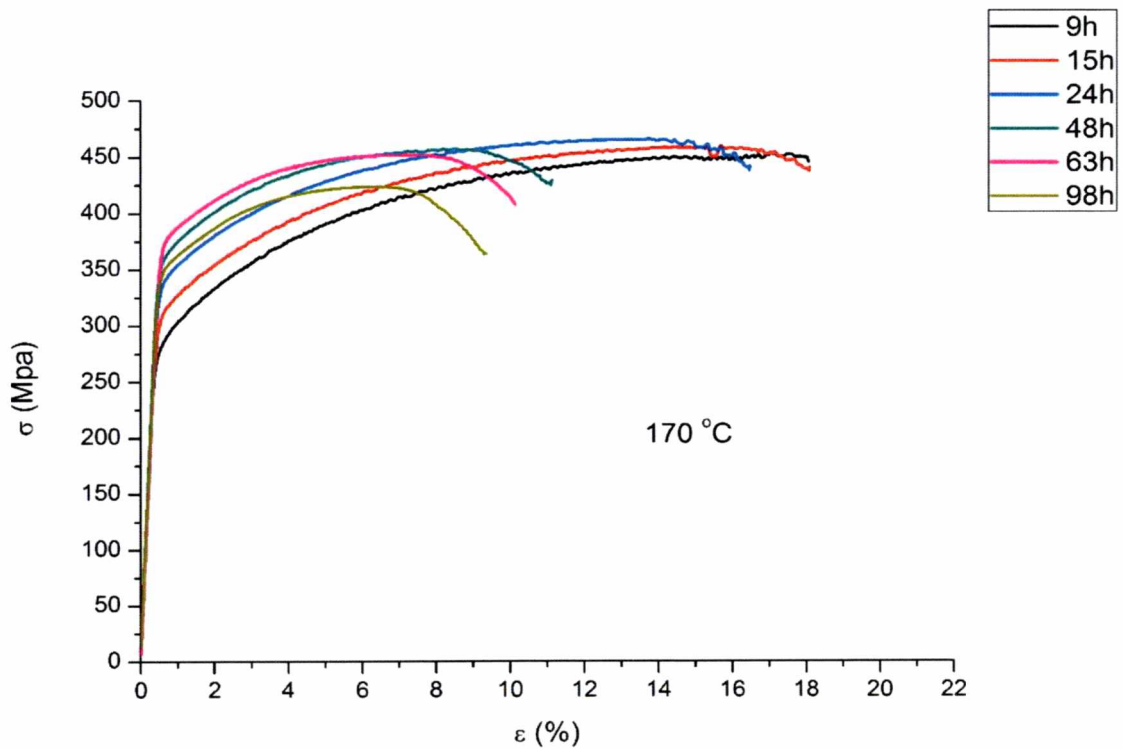
Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1 με μαύρο χρώμα φαίνεται η συμπεριφορά ενός δοκιμίου στον εφελκυσμό, το οποίο έχει δεχθεί θερμική κατεργασία στερεής διαλυτοποίησης ενώ με κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται η συμπεριφορά ενός δοκιμίου 2024-T3. Με την στερεή διαλυτοποίηση όλες οι μηχανικές ιδιότητες έχουν μειωθεί. Το όριο διαρροής μειώθηκε κατά 30%, το όριο θραύσης κατά 12,5 % ενώ υπάρχει και μικρή πτώση της επιμήκυνσης θραύσεως κατά 2 %.



Σχ. 4.1 : Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων Al 2024-T3 και Al 2024-T3 μετά την στερεή διαλυτοποίηση (Solid Solution).

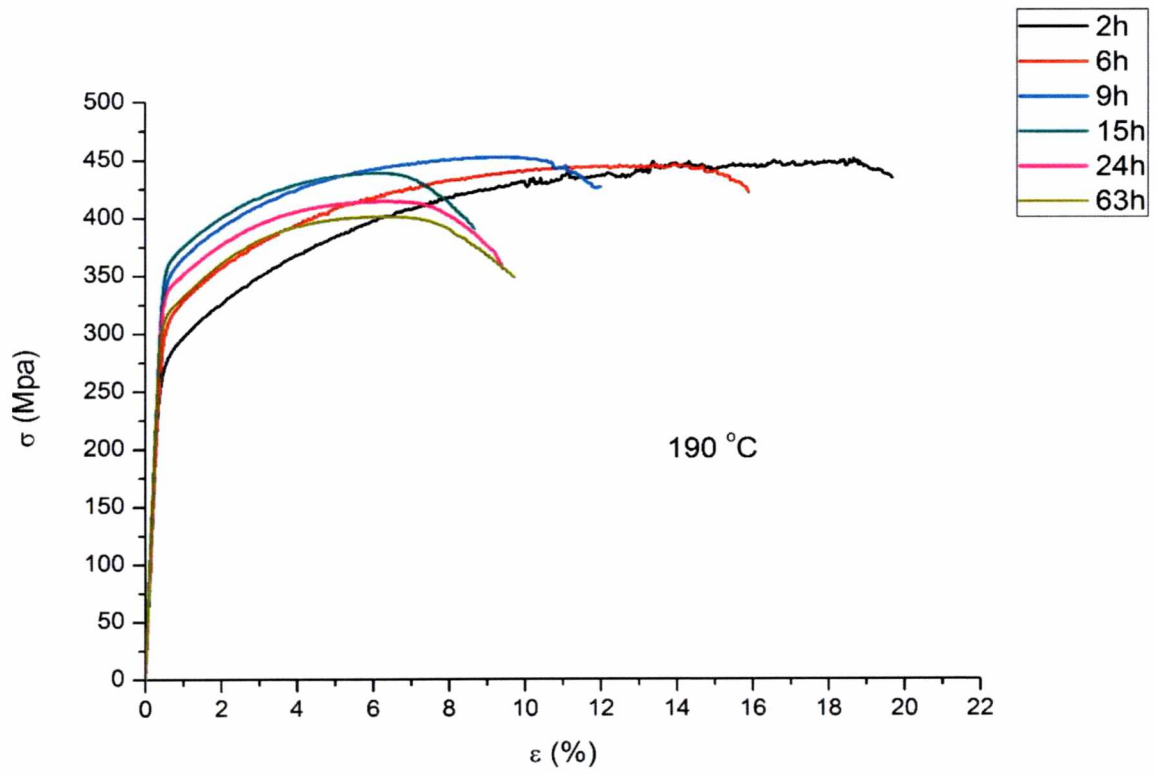
Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα διαγράμματα εφελκυσμού σε θερμική κατεργασία στους 170 °C για διαφορετικούς χρόνους γήρανσης. Καθώς μεγαλώνει η διάρκεια γήρανσης, η επιμήκυνση θραύσης από 18% φτάνει σε τελικό στάδιο κοντά στο 10% ενώ αυξάνεται το όριο διαρροής του υλικού, από τα 275 στα 375 MPa. Μετά από τις 63 ώρες γήρανσης αρχίζει μείωση του ορίου διαρροής που προκαλείται λόγω υπεργήρανσης.





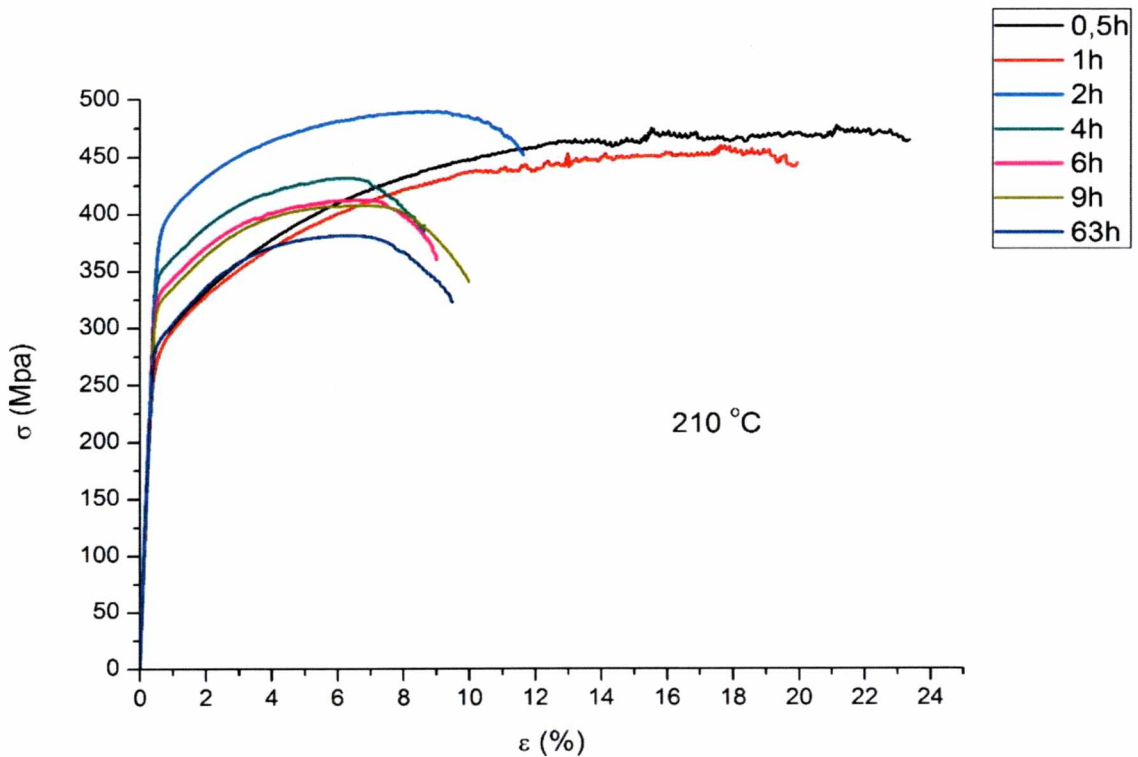
Σχ. 4.2 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης τους 170 °C.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες εφελκυσμού για τα δοκίμια που υπέστησαν τεχνητή γήρανση στους 190 °C. Η συμπεριφορά που ακολουθεί το υλικό είναι αρκετά παρόμοια με την προηγούμενη θερμοκρασία. Το όριο διαρροής αυξάνεται με τον χρόνο από 275 μέχρι και 375 MPa και η επιμήκυνση θραύσης από 19% μειώνεται στο 9%. Στις δύο ώρες παραμονής η επιμήκυνση θραύσης είναι σχεδόν ίδια με ενός δοκιμίου χωρίς θερμική κατεργασία ενώ στις 9 ώρες θερμικής κατεργασίας, μειώθηκε κατά 40%. Επίσης, η υπεργήρανση ξεκινάει στις 15 ώρες, 48 ώρες γρηγορότερα από ότι στους 170 °C.



Σχ. 4.3 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης τους 190 °C.

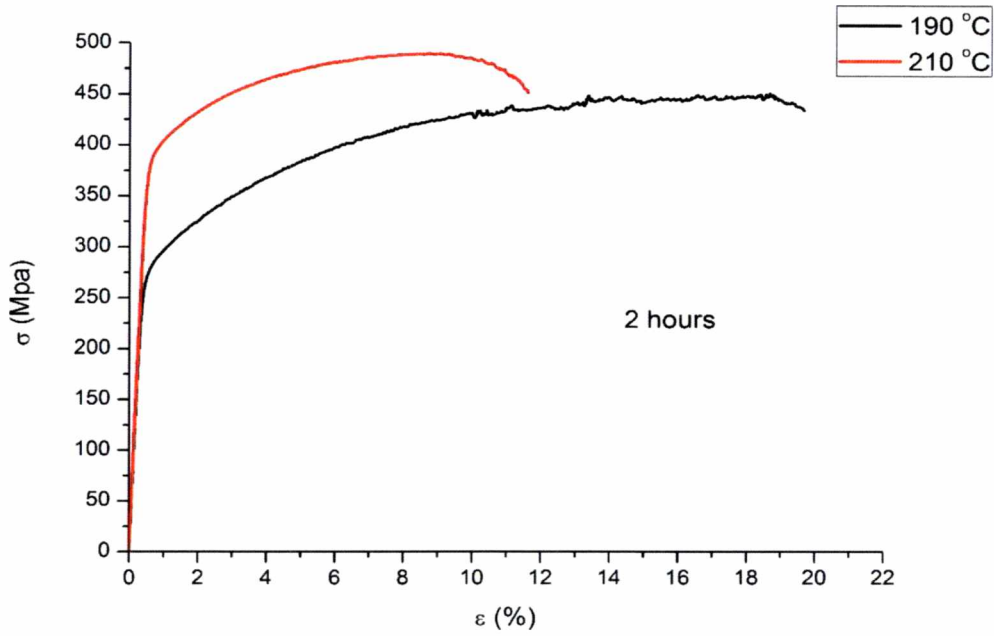
Την περίπου ίδια συμπεριφορά του ορίου διαρροής ακολουθεί και το όριο θραύσης, το οποίο αυξάνεται και αυτό με την πάροδο του χρόνου στον φούρνο μέχρι να ξεκινήσει η υπεργήρανση και μετά ακολουθεί πτωτική πορεία. Στο **σχήμα 4.4**, που παρουσιάζονται οι καμπύλες εφελκυσμού για θερμοκρασία γήρανσης 210 °C. Παρατηρείται αρχικά, πώς για πολύ μικρούς χρόνους τεχνητής γήρανσης (μέχρι μια ώρα) η επιμήκυνση θραύσης αυξάνεται και φτάνει μέχρι και 24 % και στην συνέχεια μειώνεται μέχρι και 60%. Επίσης για χρόνο κατεργασίας 2 ωρών παρατηρείται μια αύξηση, τόσο στο όριο διαρροής, όσο και στο όριο θραύσης κατά πολύ μεγαλύτερη από όλες τις άλλες. Η υπεργήρανση εδώ ξεκινάει μόλις στις 2 ώρες.



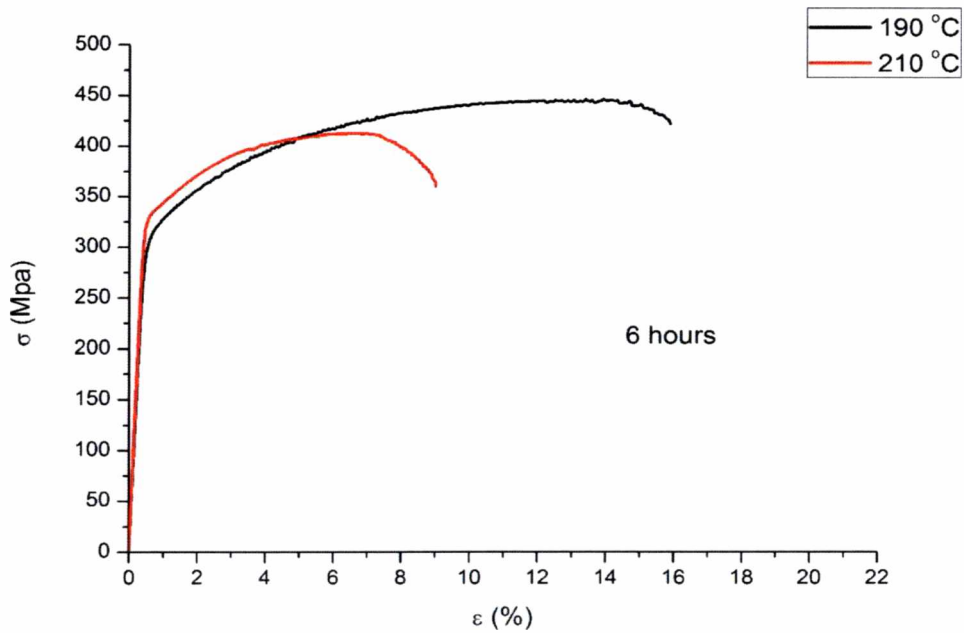
**Σχ. 4.4 :** Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης τους 210 °C.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων τεχνητής γήρανσης που παρέμειναν για ίδιο χρονικό διάστημα στον φούρνο αλλά σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

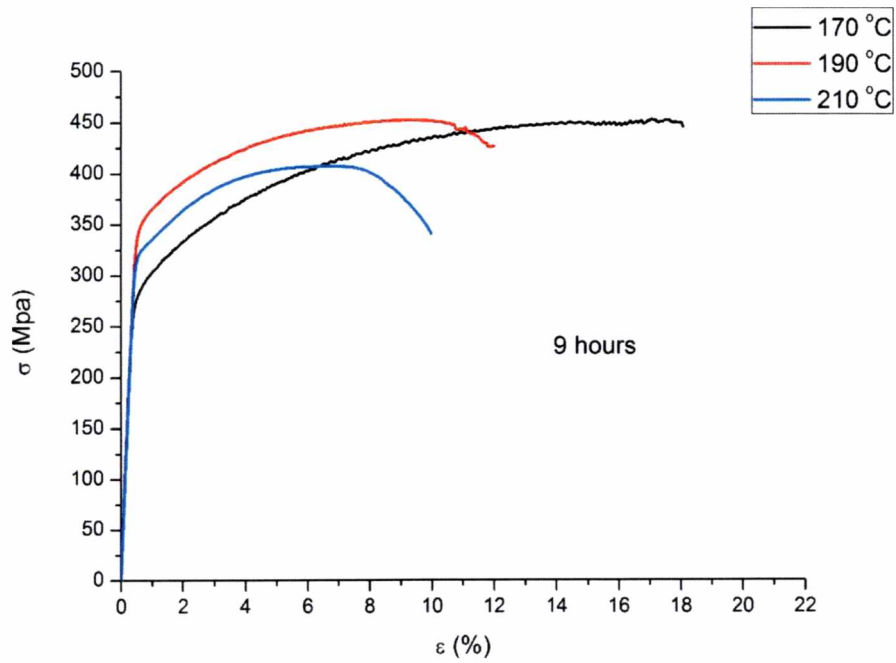
Στα διαγράμματα των δύο (Σχ. 4.5), έξι (Σχ. 4.6) και δέκα πέντε ωρών γήρανσης (Σχ. 4.8), καθώς αυξάνει η θερμοκρασία γήρανσης, μειώνεται η επιμήκυνση θραύσης και αυξάνει το όριο διαρροής και θραύσης. Στις εννέα ώρες γήρανσης (Σχ. 4.7) το δοκίμιο των 210 °C λόγω του ότι έχει ξεκινήσει ήδη η υπεργήρανση του υλικού έχει μικρότερη αντοχή στον εφελκυσμό από τα αντίστοιχα δοκίμια των εννέα ωρών σε μικρότερη θερμοκρασία γήρανσης. Στις εξήντα τρεις ώρες κατεργασίας (Σχ. 4.10) η υπεργήρανση έχει ξεκινήσει και για τις τρεις θερμοκρασίες που μελετήθηκαν και όπως φαίνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία μειώνονται όλες οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Στις είκοσι τέσσερις ώρες γήρανσης ενώ έχει επέλθει μείωση της επιμήκυνσης θραύσης και του ορίου θραύσης παρατηρείται ίδιο ακριβώς όριο διαρροής (Σχ.4.9). Αυτό συμβαίνει διότι στο δοκίμιο των 170 °C δεν έχει ξεκινήσει η διαδικασία της υπεργήρανσης ακόμη.



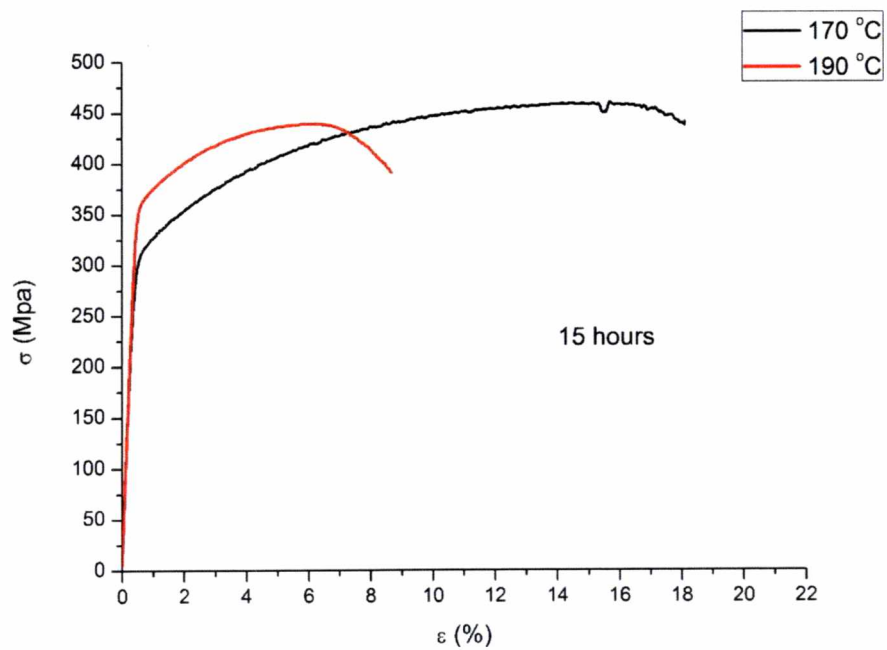
Σχ. 4.5 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης δύο (2) ωρών.



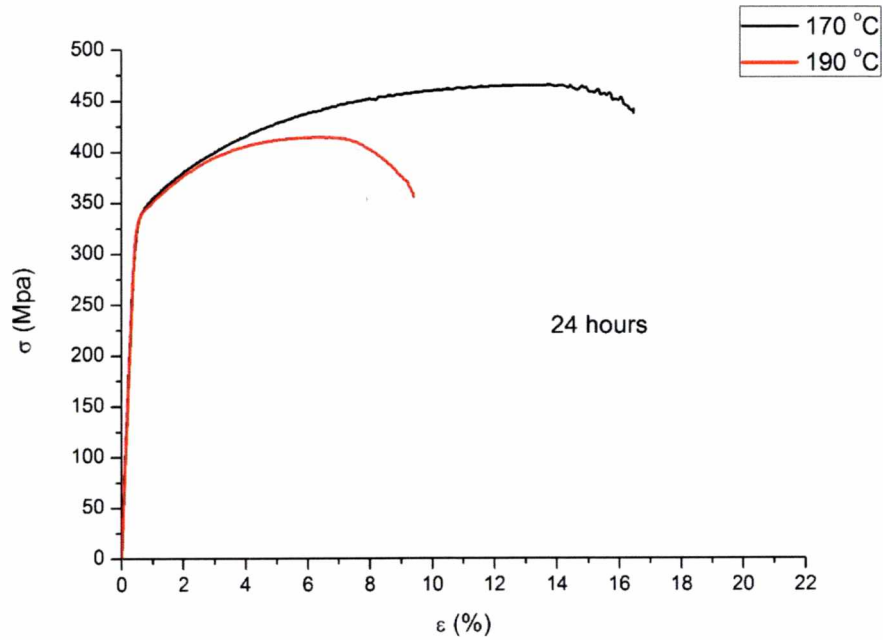
Σχ. 4.6 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης έξι (6) ωρών.



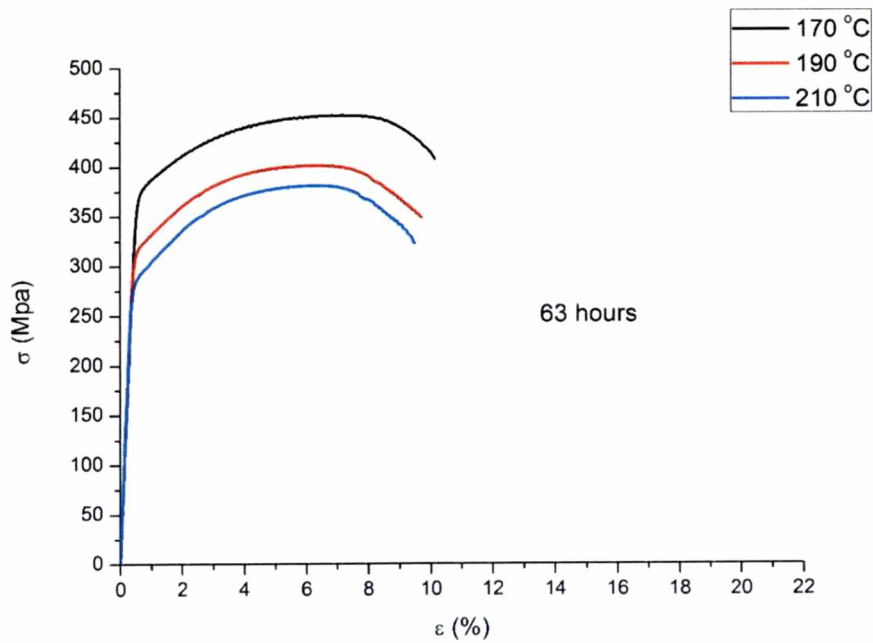
Σχ. 4.7 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης εννέα (9) ωρών.



Σχ. 4.8 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων τεχνητής γήρανσης δέκα πέντε (15) ωρών.



Σχ. 4.9 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμών τεχνητής γήρανσης είκοσι τεσσάρων (24) ωρών.



Σχ. 4.10 : Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμών τεχνητής γήρανσης εξήντα τριών (63) ωρών.

## 4.2 Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων

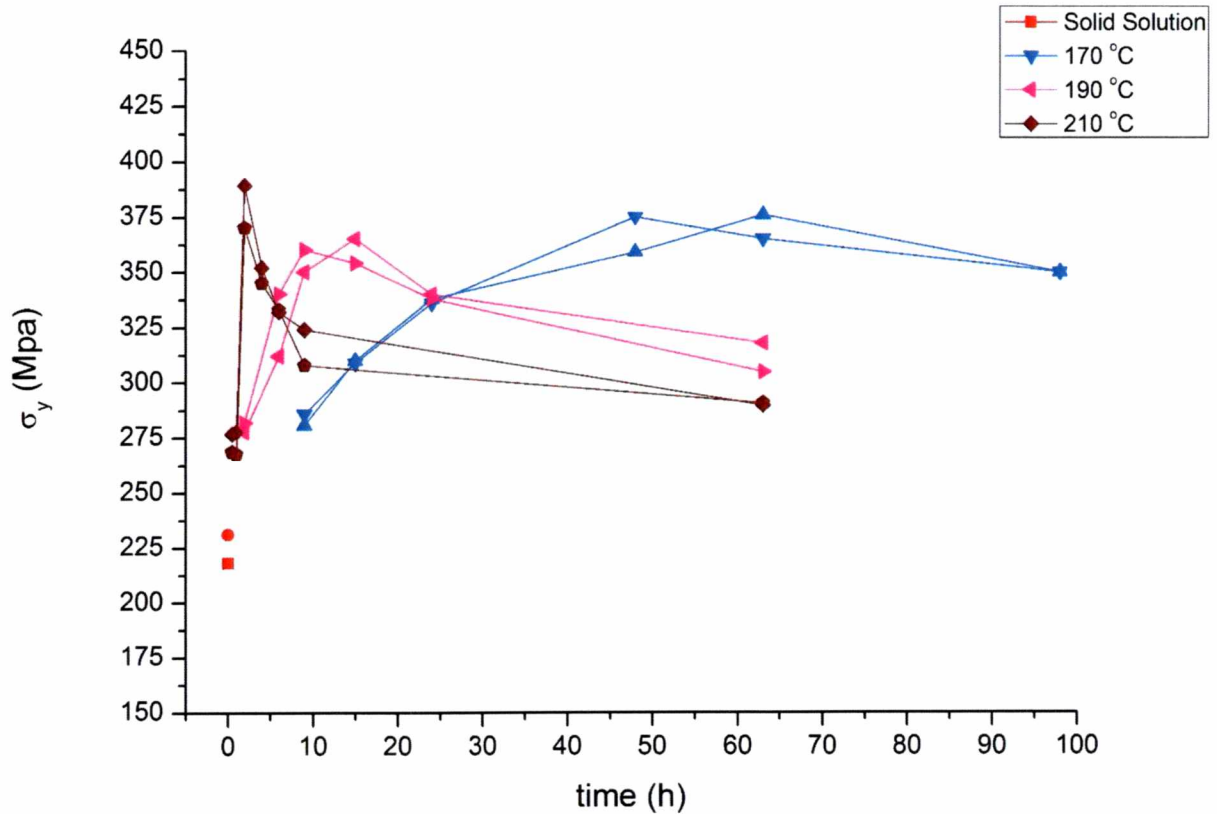
### 4.2.1 Μεταβολή Ορίου Διαρροής

Στον **πίνακα 4.1** δίνονται οι τιμές του ορίου διαρροής σύμφωνα πάντα με την διάρκεια τεχνητής γήρανσης και την θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκαν. Η πρώτη μέτρηση που συμβολίζεται με "-" είναι η μέτρηση του υλικού χωρίς τεχνητή γήρανση, το οποίο έχει υποστεί στερεή διαλυτοποίηση.

Χρόνος (h)	170 °C		Χρόνος (h)	210 °C		Χρόνος (h)	σ <sub>y0,2</sub> (MPa)
	σ <sub>y0,2</sub> (MPa)	190 °C		σ <sub>y0,2</sub> (MPa)	210 °C		
-	218	190 °C	-	210 °C	0.5	277	
	231						269
9	281		2		278	1	278
	286						282
15	310		6		312	2	389
	309						340
24	338		9		350	4	352
	336						360
48	359		15		365	6	332
	375						354
63	376	24	340	9	324		
	365				338		
98	350	63	318	63	290		
	350				305		

**Πίνακας 4.1 :** Αριθμητικές τιμές ορίου διαρροής.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (**Σχ. 4.11**), στο οποίο φαίνονται οι μεταβολές που επιφέρει η γήρανση στο όριο διαρροής.



Σχ. 4.11 : Διάγραμμα ορίου διαρροής-χρόνου-θερμοκρασίας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11, όσο αυξάνει ο χρόνος γήρανσης τόσο αυξάνει το όριο διαρροής, έως ότου να αρχίσει η υπεργήρανση του υλικού. Μετά την στερεή διαλυτοποίηση η τιμή του ορίου διαρροής είναι αρκετά μικρή, μόλις 218 MPa και φτάνει μέχρι και 389 MPa σε θερμοκρασία γήρανσης 210 °C και χρόνο γήρανσης τις 2 ώρες, μια αύξηση της τάξης του 70%. Στους 170 °C, μέγιστη τιμή είναι τα 375 MPa και παρατηρείται στις 63 ώρες κατεργασίας, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί υπεργήρανση και το όριο διαρροής μειώνεται. Στους 190 °C, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το όριο διαρροής δεν φτάνει σε τόσο μεγάλες τιμές σε σχέση με τις άλλες δυο θερμοκρασίες. Μέγιστη τιμή είναι τα 365 MPa, παρατηρείται στις 15 ώρες γήρανσης όπου και ξεκινάει η υπεργήρανση. Η μέγιστη αύξηση που μπορεί να επιτευχθεί σε σχέση με το αρχικό υλικό, αλουμίνιο 2024-T3, είναι, σύμφωνα με αυτές τις θερμοκρασίες και χρόνους που μελετήθηκαν, της τάξης του 15 %.



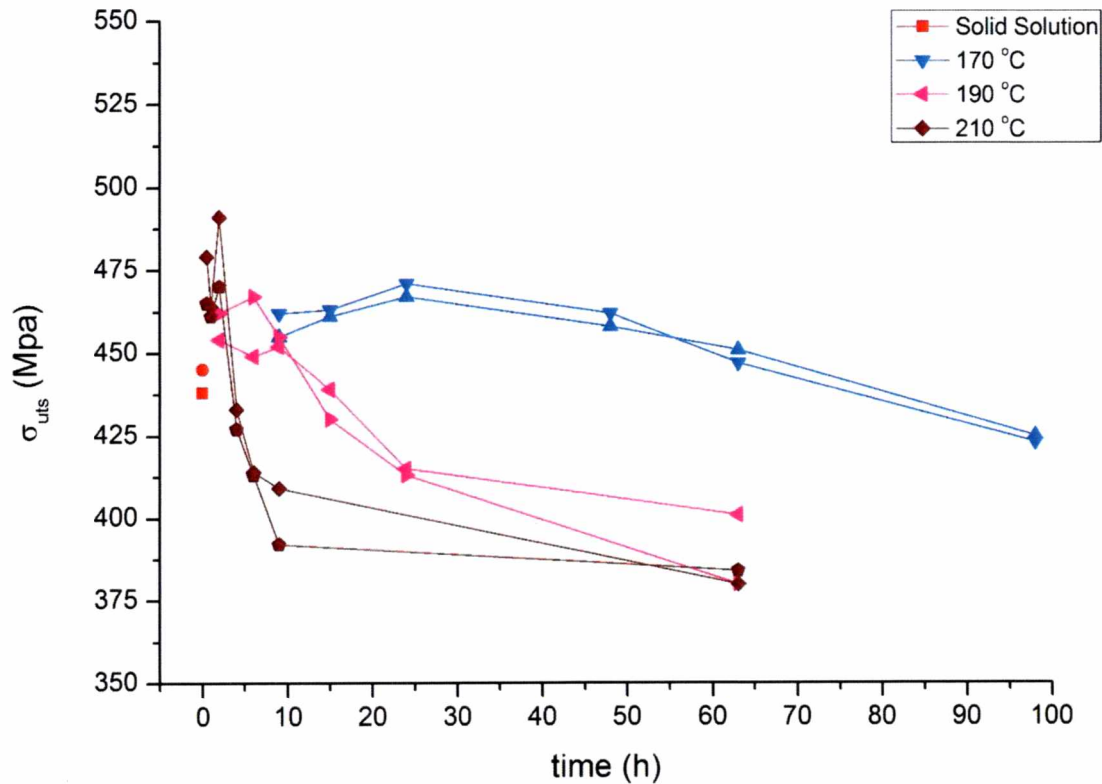
### 4.2.2 Μεταβολή Ορίου Θραύσης

Στον **πίνακα 4.2** δίνονται οι τιμές του ορίου θραύσης σύμφωνα πάντα με την διάρκεια τεχνητής γήρανσης και την θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκαν. Η πρώτη μέτρηση που συμβολίζεται με "-" είναι η μέτρηση του υλικού χωρίς τεχνητή γήρανση, το οποίο έχει υποστεί στερεή διαλυτοποίηση.

170 °C	Χρόνος (h)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	190 °C	Χρόνος (h)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	210 °C	Χρόνος (h)	$\sigma_{uts}$ (MPa)
	-	438		-	0.5		479	
		445			465			
9		455	2	454	1	464		
		462		462		461		
15		461	6	449	2	491		
		463		467		470		
24		467	9	452	4	433		
		471		455		427		
48		458	15	439	6	414		
		462		430		413		
63		451	24	415	9	409		
		447		413		392		
98		425	63	401	63	380		
		423		380		384		

**Πίνακας 4.2 :** Αριθμητικές τιμές ορίου θραύσης.

Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (**Σχ. 4.12**), στο οποίο φαίνονται όλες οι αλλαγές που επιφέρει η γήρανση στο όριο θραύσης.



Σχ. 4.12 : Διάγραμμα ορίου θραύσης-χρόνου-θερμοκρασίας.

Αντίστοιχη συμπεριφορά με το όριο διαρροής ακολουθεί και το όριο θραύσης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.12**. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της γήρανσης, στην κατάσταση στερεάς διαλυτοποίησης, το όριο θραύσης είναι 440 MPa και αυξάνεται μέχρι να ξεκινήσει η υπεργήρανση ενώ στην συνέχεια ακολουθεί μείωση. Στους 170 °C η μείωση ξεκινάει μετά τις 15 ώρες, στους 190 °C ύστερα από 6 ώρες κατεργασίας και στους 210 °C μετά τις 2 πρώτες ώρες. Παρατηρείται επίσης, ότι η υψηλότερη τιμή του ορίου θραύσης παρουσιάστηκε σε δοκίμιο με θερμική κατεργασία δύο ωρών στους 210 °C και φτάνει στα 490 MPa (**Πίνακα 4.1**). Στους 210 °C, εάν συνεχιστεί η γήρανση παρατηρείται έντονη μείωση του ορίου θραύσης. Για παράδειγμα, στις 63 ώρες το όριο θραύσης στους 170 °C είναι 70 MPa μεγαλύτερο από ότι στους 190 °C για την ίδια ώρα κατεργασίας. Επίσης παρατηρείται ότι το όριο θραύσης αυξήθηκε λίγο σε σχέση με το αρχικό υλικό, 2024-T3, μέχρι και 30 MPa στο δοκίμιο της μισής ώρας στους 210 °C.

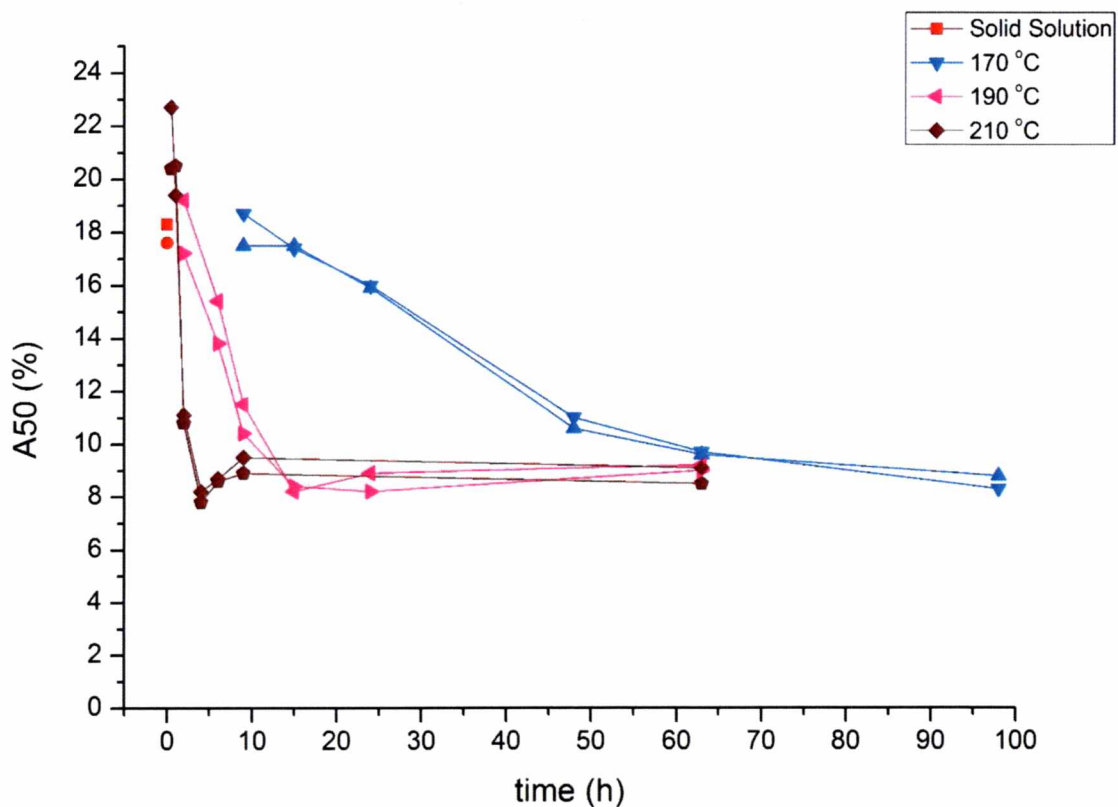
### 4.2.3 Μεταβολή Επιμήκυνσης Θραύσης

Στον **πίνακα 4.3** δίνονται οι τιμές της επιμήκυνσης θραύσης σύμφωνα πάντα με την διάρκεια τεχνητής γήρανσης και την θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκαν. Η πρώτη μέτρηση που συμβολίζεται με "-" είναι η μέτρηση του υλικού χωρίς τεχνητή γήρανση, το οποίο έχει υποστεί στερεή διαλυτοποίηση.

	Χρόνος (h)	A <sub>50</sub> (%)		Χρόνος (h)	A <sub>50</sub> (%)		Χρόνος (h)	A <sub>50</sub> (%)	
170 °C	-	18,3	190 °C	2	19,2	210 °C	0.5	22,7	
		17,6						20,4	
	9	17,5					6	1	19,4
		18,7							20,5
	15	17,5					9	4	11,1
		17,4							10,8
	24	15,9					15	6	8,2
		16							7,8
	48	10,6					24	9	8,7
		11							8,6
63	9,6	63	63	9,5					
	9,7			8,9					
98	8,8			9,1					
	8,3			8,5					

**Πίνακας 4.3 :** Αριθμητικές τιμές επιμήκυνση θραύσης.

Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (**Σχ. 4.13**), στο οποίο φαίνονται όλες οι αλλαγές που επιφέρει η γήρανση στην επιμήκυνση θραύσης.



Σχ. 4.13 : Διάγραμμα επιμήκυνσης θραύσης-χρόνου-θερμοκρασίας.

Η επιμήκυνση θραύσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.13, ακολουθεί πτωτική πορεία, μειώνεται μέχρι και 60% καθώς αυξάνει ο χρόνος γήρανσης σε σχέση με το 2024-T3, εξαίρεση αποτελεί η θερμική κατεργασία στους 210 °C για χρόνο μικρότερο της μιας ώρας όπου εκεί παρατηρείται αύξηση. Η αύξηση σε σχέση με το 2024-T3 είναι της τάξης του 16,5 %. Η ελάχιστη τιμή είναι 7,8% για χρόνο 4 ωρών σε θερμοκρασία 210 °C. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως όσο αυξάνει η θερμοκρασία γήρανσης τόσο πιο γρήγορα το υλικό φτάνει στην ελάχιστη τιμή. Στο υλικό με γήρανση δυο ωρών σε θερμοκρασία 210 °C που είχε παρατηρηθεί το μεγαλύτερο όριο διαρροής και θραύσης, η μέγιστη επιμήκυνση είναι στο 10 %, πολύ κοντά στην ελάχιστη τιμή.

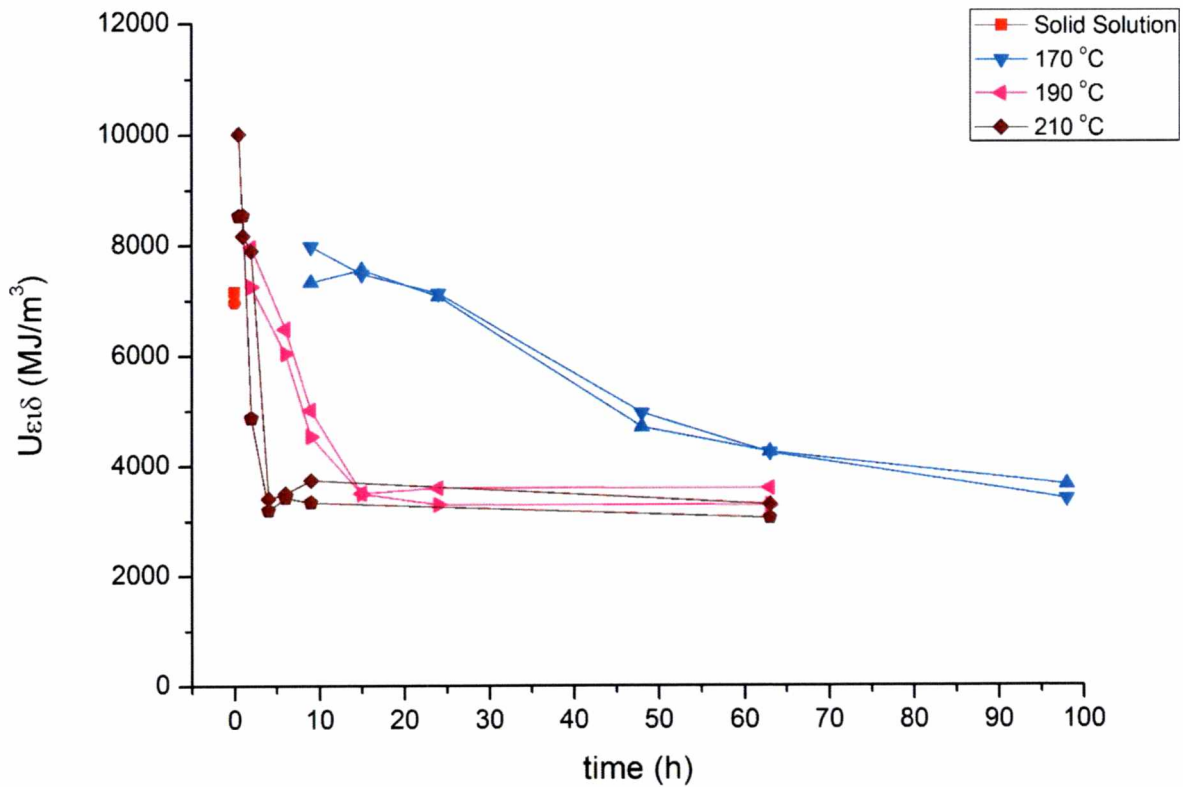
#### 4.2.4 Μεταβολή Ειδικής Ενέργειας Παραμόρφωσης

Στον **πίνακα 4.4** δίνονται τιμές της επιμήκυνσης θραύσης σύμφωνα πάντα με την διάρκεια τεχνητής γήρανσης και την θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκαν. Η πρώτη μέτρηση που συμβολίζεται με "-" είναι η μέτρηση του υλικού χωρίς τεχνητή γήρανση, το οποίο έχει υποστεί στερεή διαλυτοποίηση.

	Χρόνος (h)	Υειδ (MJ/m <sup>3</sup> )	190 °C	Χρόνος (h)	Υειδ (MJ/m <sup>3</sup> )	210 °C	Χρόνος (h)	Υειδ (MJ/m <sup>3</sup> )		
	170 °C	-		7156						0.5
		6962	8527							
9		7326	2	7963		1				8169
		7983		7251						8536
15		7561	6	6489		2				5257
		7483		6044						4873
24		7072	9	5018		4				3406
		7131		4542						3194
48		4707	15	3504		6				3492
		4964		3492						3420
63	4257	24	3597	9	3735					
	4242		3293		3337					
98	3657	63	3591	63	3297					
	3397		3278		3053					

**Πίνακας 4.4 :** Αριθμητικές τιμές ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης.

Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις δημιουργήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (**Σχ. 4.14**), στο οποίο φαίνονται όλες οι αλλαγές που επιφέρει η γήρανση στην ειδική ενέργεια παραμόρφωσης.



Σχ. 4.14 : Διάγραμμα ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης-χρόνου-θερμοκρασίας.

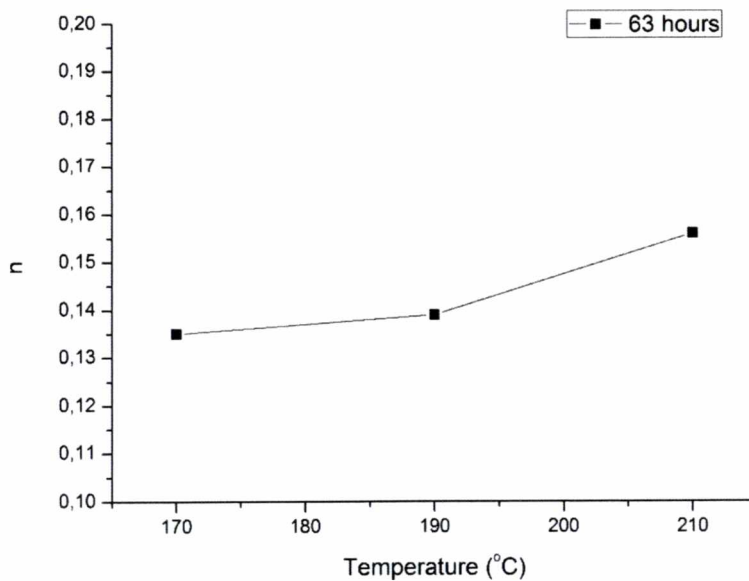
Το διάγραμμα της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης (Σχ. 4.14) είναι πανομοιότυπο, όπως φαίνεται, με το διάγραμμα της μέγιστης επιμήκυνσης θραύσης, κάτι το απολύτως λογικό καθώς η ενέργεια παραμόρφωσης εξαρτάται άμεσα με την μέγιστη επιμήκυνση. Όσο περισσότερη παραμόρφωση δέχθηκε το υλικό μέχρι την θραύση, τόσο περισσότερη ενέργεια χρειάστηκε με όλες τις χαρακτηριστικές τιμές να δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

### 4.3 Μεταβολή Συντελεστή Εργοσκλήρυνσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης υπολογίστηκε ενδεικτικά για κάθε θερμοκρασία ο συντελεστής εργοσκλήρυνσης σε τρεις χρόνους. Οι τιμές φαίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 4.5**. Ο Συντελεστής εργοσκλήρυνσης στο Al 2024-T3 είναι 0,169 και στο Al 2024-T3 με στερεή διαλυτοποίηση 0,269.

170 °C	Χρόνος (h)	n	190 °C	Χρόνος (h)	n	210 °C	Χρόνος (h)	n
	2	0.212		15	0.188		1	0.215
	15	0.138		63	0.139		2	0.127
	63	0.135		98	0.119		63	0.156

**Πίνακας 4.5 :** Αριθμητικές τιμές συντελεστή εργοσκλήρυνσης.



**Σχ. 4.15 :** Διάγραμμα συντελεστών εργοσκλήρυνσης για 63 ώρες γήρανσης.

Παρατηρείται πτώση του συντελεστή εργοσκλήρυνσης με την αύξηση του χρόνου γήρανσης με εξαίρεση την περίπτωση των 63 ωρών, όπου λόγω υψηλής θερμοκρασίας υπεργήρανσης, στους 210 °C, ο συντελεστής αυξήθηκε. Στο **σχήμα 4.15** φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία για ίδια χρονική περίοδο γήρανσης αυξάνεται και ο συντελεστής.

## 5. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάζονται παρακάτω :

- Για το όριο διαρροής παρατηρήθηκε, πως με την κατεργασία τεχνητής γήρανσης, η τιμή του αυξήθηκε μέχρι και 15 % από το 2024-T3. Η υψηλότερη τιμή ήταν 389 MPa και παρουσιάστηκε στο σημείο όπου ξεκινάει η υπεργήρανση σε θερμοκρασία 210 °C και χρόνο κατεργασίας τις 2 ώρες.
  - Το όριο θραύσης έδειξε μέγιστη αύξηση της τάξης του 6%, η οποία παρατηρήθηκε για χρόνο κατεργασίας 2 ωρών και θερμοκρασίας 210 °C, στις ίδιες συνθήκες που παρατηρήθηκε και το μέγιστο όριο διαρροής. Συγκριτικά όμως με το όριο διαρροής η αύξηση του ορίου θραύσης ήταν μικρότερη.
  - Η μέγιστη παραμόρφωση θραύσης και η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης αυξάνονταν για μικρούς χρόνους τεχνητής γήρανσης και έπειτα μειώνονταν δραστικά και στις τρεις θερμοκρασίες. Η μέγιστη αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης που επιτεύχθηκε ήταν 16,5 % σε σχέση με το αρχικό υλικό, 2024-T3.
  - Για κάθε θερμοκρασία γήρανσης προσδιορίστηκε μέσω των διαγραμμάτων το σημείο που ξεκινάει η διαδικασία της υπεργήρανσης. Συγκεκριμένα για τους 170 °C παρατηρήθηκε πως η υπεργήρανση ξεκινάει μετά τις 63 ώρες παραμονής των δοκιμίων στους φούρνους, ενώ στους 190 °C και στους 210 °C μετά τις 15 και τις 2 ώρες αντίστοιχα. Επίσης παρατηρήθηκε, πως όσο η θερμοκρασία αυξανόταν, τόσο πιο γρήγορα λάμβαναν χώρα οι μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες που μελετήθηκαν.
- 
- Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν πως για μικρούς χρόνους μέχρι 2 ώρες και υψηλές θερμοκρασίες, 210 °C, τεχνητής γήρανσης μπορεί να αυξηθεί το όριο διαρροής, θραύσης αλλά και η μέγιστη παραμόρφωση θραύσης. Όλες αυτές η θερμικές κατεργασίες, καθώς και αντίστοιχες με αυτές της παρούσης εργασίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες και χρόνους θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο για περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς του αλουμινίου 2024-T3.



## Βιβλιογραφία

- [1] D. .. J. M. A.-. Murshdy, «Effect of Heat Treatments on the Impact Toughness and Hardness of (2024) Aluminum alloy,» *Journal of Kerbala University*, p. Vol. 6 No.1 Scientific, March 2008.
- [2] C. Fransson, «Accelerated aging of aluminum alloys,» Karlstad, 2009.
- [3] V. M. M.N. Cavalli, «Effect of Temperature and Aging Time on 2024 Aluminum Behavior,» σε *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition*, Orlando, 2008.
- [4] J.-A. Petit, «Effect of the Over-ageing Treatment on the Mechanical Properties of AA2024 Aluminum Alloy,» Toulouse, 2010.
- [5] «Ελληνική Ένωση Αλουμινίου,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.aluminium.org.gr>.
- [6] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, *Επιστήμη και Τεχνολογία Των Μεταλλικών Υλικών*, Αθήνα : Παπασωτηρίου, 1996.
- [7] J. William D.Callister, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών*, 5η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- [8] J. E. Hatch, *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*, 1st edition, ASM, 1984.
- [9] N. O. A. Yagan, «Progress in Organic Coatings,» 2007, pp. 59, 297.
- [10] S. d. M. J. Gavele, «Corrosion science,» 1970, pp. 10 , 795.
- [11] Γ. Ν. Χαιδεμενόπουλος, σε *Φυσική Μεταλλουργία*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα, 2007, pp. 499-507.
- [12] Α. Κ. Γρηγόρης Χαιδεμενόπουλος, «Εισαγωγή στην τεχνολογία των υλικών,» Βόλος, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2003, pp. 41-58.
- [13] «Standard E8, "Standard Test Method for Metallic Materials",» American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998.
- [14] Δ. Β. Χ. Μούσα, «Μ-Κ Έλεγχος & Αξιολόγηση Κατασκευών (ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ & ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/107SNWohler.html>. [Πρόσβαση 14 November 2014].
- [15] Θ.Σκουλικίδης, *Διάβρωση και Προστασία Υλικών*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων, 2000.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000124464

