

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών



*«Επίδραση της Θερμικής Κατεργασίας και της
Διάβρωσης στον Κρίσιμο Συντελεστή Έντασης
Τάσεων του Κράματος Al-Li 2198»*

Φοιτήτρια: ΒΑΣΙΛΙΝΑ ΑΥΓΕΡΗ
Αριθμός Μητρώου: 9112125
Επιβλέπων Καθηγητής: ΣΤΑΥΡΟΣ Κ. ΚΟΥΡΚΟΥΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, Μάρτιος 2021

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ.....	11
1.2 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ..	14
1.3 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 2XXX.....	17
1.3.1 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 2XXX.....	17
1.3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 2XXX ..	18
1.3.2.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	18
1.3.2.2 ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ.....	21
1.3.3 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ AL-CU-LI.....	24
1.3.3.1 ΤΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2198.....	25
1.4 ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΥΜΝΙΣΗ ΛΟΓΩ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	26
1.5 ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΚΡΥΜΝΙΣΕΩΝ.....	30
1.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	31
1.6.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ (EXCO).....	33
1.7 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΓΝΩΣΗ– ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ.....	34
1.7.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 2198.....	34
1.7.2 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΓΝΩΣΗ.....	35
1.8 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	40
2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	41
2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ.....	41
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	42
2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ.....	43
2.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ (EXFOLIATION CORROSION).....	43
2.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ.....	45
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	50
3.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΘΡΑΥΣΗ.....	50
3.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	50
3.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ ...	51
3.2 ΚΡΙΣΗΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ (K_{cr}).....	52

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	53
4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ....	53
4.2 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ	54
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	55
6 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	56
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	57
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	61
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	64

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εδώ και δεκαετίες η χρήση των κραμάτων αλουμινίου στη βιομηχανία της αεροναυπηγικής είναι εκτενής. Όμως ένα από τα βασικότερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει μέχρι σήμερα είναι η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών λόγω του φαινομένου της γήρανσής τους, με αποτέλεσμα αυτό να καθίσταται επιρρεπές σε βλάβες, όπως τη δημιουργία και τη διάδοση ρωγμών. Ένα ακόμη φαινόμενο το οποίο δύναται να επηρεάσει την ακεραιότητα των υλικών και κατ' επέκταση του συνόλου μιας κατασκευής είναι η έκθεσή τους σε διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε πειραματικά η αντοχή έπειτα από επιβολή τεχνητής γήρανσης αλλά και έκθεση συνδυαστικά σε διαβρωτικό περιβάλλον του κράματος αλουμινίου 2198-T3. Αρχικά, σύμφωνα με δεδομένη διεθνή περιγραφή, πραγματοποιήθηκε κοπή δοκιμίων δυσθραυστότητας από φύλλα κατασκευασμένα από το υλικό αυτό. Έπειτα, διατηρώντας ορισμένα ως έχουν, δηλαδή σε κατάσταση φυσικής γήρανσης σε θερμοκρασία δωματίου, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως δοκίμια αναφοράς, υποβλήθηκαν σε διαδικασία τεχνητής γήρανσης μέσω θερμικής κατεργασίας στους 170 °C για διάφορους χρόνους έκθεσης. Επιπρόσθετα, ένας αριθμός εξ αυτών των δοκιμίων υποβλήθηκαν σε τοπική διάβρωση αποφλοίωσης, με χρήση υγρού διαλύματος επίσης κατασκευασμένο σύμφωνα με τις αντίστοιχες διεθνείς προδιαγραφές, με χρόνο έκθεσης τις δύο ώρες. Στη συνέχεια, όλα τα προαναφερθέντα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές δυσθραυστότητας, με στόχο την αποτίμηση της επίδρασης τόσο της θερμικής κατεργασίας όσο και της επιπρόσθετης διάβρωσης αποφλοίωσης στη δυσθραυστότητα του κράματος. Τέλος, μέσω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη πειραματική μελέτη, υπολογίστηκε επίσης ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων για κάθε περίπτωση.

ABSTRACT

For decades, the use of aluminum alloys in the aeronautics industry is massive. However, one of the most important problems to face even today is the degradation of the mechanical properties of those materials due to their ageing, which results to it being vulnerable to damaging, like the creation and growth of cracks. Another phenomenon that is able to affect the uprightness of the materials and, as a result, the whole construction is the exposure to many different corrosional environment.

In the present thesis project, the durability of the aluminum alloy 2198-T3 was studied experimentally after being exposed to artificial ageing and corrosion. To begin with, according to a given international description, fracture toughness test subjects were cut from plates made by the metal. Afterwards, maintaining some as they are, i.e. in a state of natural aging at room temperature, in order to be used as reference test subjects, underwent an artificial aging process by heat treatment in 170 °C, for different exposure times. In addition, a number of these specimens were subjected to local exfoliation corrosion, using a liquid solution also made according to the respective international standards, with an exposure time of two hours. Subsequently, all the aforementioned specimens were subjected to experimental fracture toughness tests to assess the effect of both heat treatment and additional exfoliation corrosion in the fracture toughness of the alloy. Finally, through the results obtained from the experimental study, the critical stress intensity factor for each case was also calculated.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σταύρο Κ. Κουρκουλή, καθηγητή και κοσμήτορα της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, πρώτα και πάνω από όλα γιατί ήταν εκείνος που μου εμφύσησε το ενδιαφέρον μου για τον τομέα της μηχανικής γενικότερα αλλά και γιατί υπήρξε ο βασικός καθοδηγητής των προσπαθειών μου για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας την οποία μου ανέθεσε. Επίσης, ευχαριστώ βαθύτατα τον κ. Νικόλαο Αλεξόπουλο, επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου, ο οποίος υπήρξε αρωγός και συμπαραστάτης μου στην εργασία αυτή και η επιστημονική του επάρκεια αποτέλεσε το έναυσμα της συνέχισης των προσπαθειών μου όταν οι τεχνικού χαρακτήρα αντίξοες συνθήκες και οι δυσκολίες με έκαναν πολλές φορές να απογοητεύομαι. Ευχαριστώ ιδιαίτερος την υποψήφια διδάκτορα Θεανώ Εξαμηλιώτη για την συνεχή και αδιάλειπτη παρουσία της στη πειραματική διαδικασία που ήταν απαραίτητη για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, πάντα πρόθυμη, ευγενική και υποστηρικτική μαζί μου. Ακόμη, ευχαριστώ την υποψήφια διδάκτορα Χριστίνα Χαραλαμπίδου για τη συμμετοχή της όταν αυτή ήταν αναγκαία και καίρια για την ολοκλήρωση αυτής μου της προσπάθειας.

Ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για την στήριξη όχι μόνο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, κυρίως όμως τη μητέρα μου, Χαρά Ζαρκάδα, που παρά τις δυσκολίες που αντιμετώπισε αυτά τα χρόνια παρέμεινε πάντα δίπλα μου να προσφέρει όσο περισσότερο μπορούσε. Κυρίως, όμως, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου, Ανδρέα Αυγέρη, γιατί από εκείνον έμαθα να αγαπώ τις θετικές επιστήμες που τελικά αποφάσισα και να ακολουθήσω, και ελπίζω πως αν ήταν ακόμη μαζί μας σήμερα θα ήταν περήφανος.

Ευχαριστώ, επίσης, τους φίλους και συμφοιτητές μου Κατερίνα Κυπριανού, Θεοδότη Κεραμά, Παναγιώτα Αλεξίου, Γέτα Μόλλα, Αιμιλία Πέππα, Σπυριδούλα Αλμπάνη, Φόνη Διονυσοπούλου, Γρηγόρη Σαραντίδη και Μαρία Σταυροπούλου που όλα αυτά τα χρόνια σταθήκαμε ο ένας στον άλλον και σίγουρα δε θα τα κατάφερνα χωρίς την βοήθεια και τη παρουσία τους. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον πιο στενό μου φίλο και συμφοιτητή, και κυρίως τον καλύτερο και πιο σπουδαίο άνθρωπο που είχα ποτέ τη τύχη και τη τιμή να γνωρίσω, τον Ευάγγελο Δερμετζιάν, γιατί ήταν δίπλα μου από τη πρώτη μέρα μέχρι και το πέρας των ως τώρα ακαδημαϊκών σπουδών μου, και σίγουρα του οφείλω πολλά γιατί ξέρω πόσο σπουδαία ήταν η στήριξη και η βοήθειά του για εμένα, και ελπίζω και εύχομαι να έλαβε κι εκείνος τα αντίστοιχα από πλευράς μου.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Μονάδες	Ερμηνεία
L, T	-	Διευθύνσεις κοπής δοκιμίων
W	J	Απορροφημένη ενέργεια
σ	MPa	Ορθή τάση
ε	-	Παραμόρφωση
F	kN	Εφαρμοζόμενη φόρτιση
A_0	mm ²	Αρχικό εμβαδόν διατομής
L_0	mm	Αρχικό μήκος
ΔL	mm	Αλλαγή μήκους
L_f	mm	Τελικό μήκος
V_0	mm ³	Αρχικός όγκος
E	GPa	Μέτρο Ελαστικότητας
K	MPa·m ^{1/2}	Συντελεστής έντασης τάσεων
P	N	Εξωτερικό φορτίο
B	mm	Πάχος δοκιμίου
K_R	-	Συνάρτηση υπολογισμού κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων
r_y	mm	Μήκος πλαστικής ζώνης δοκιμίου δυσθραυστότητας
R_p	MPa	Όριο διαρροής
a_{eff}	mm	Ενεργό μήκος ρωγμής
a_0	mm	Μήκος ρωγμής
K_{cr}	MPa·m ^{1/2}	Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων

Στον μπαμπά μου...

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ

Το αλουμίνιο αποτελεί το πιο διαδεδομένο μη σιδηρούχο μέταλλο στη παγκόσμια αγορά. Το 1761 ο de Marveau πρότεινε το όνομα «alumine» για το μέταλλο, και αργότερα, το 1807, το όνομα «aluminium», το οποίο αργότερα δέχτηκε να τροποποιηθεί σε «aluminum». [1] Αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή μικρών σκευών όπως καθρέπτες χειρός, βούρτσες, διακοσμητικές καρφίτσες, άλλα διακοσμητικά χώρου. Επίσης, αποτέλεσε μια καλή εναλλακτική του σιδήρου. [2]

Το αλουμίνιο ως στοιχείο (Al) ανακαλύφθηκε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Αρχικά θεωρούνταν πολύτιμο μέταλλο λόγω της αντοχής του στην οξείδωση, καθώς και της λαμπερής του όψης. Η κατεργασία του είναι πιο εύκολη από εκείνη του χρυσού ή του ασημιού, αλλά δεν αποτελεί τόσο ανθεκτικό μέταλλο όσο τα προηγούμενα, με αποτέλεσμα να εφευρεθεί και να υλοποιηθεί η κατασκευή προσμείξεών του με ορισμένα άλλα μέταλλα, όπως ο χαλκός (Cu) ή το μαγνήσιο (Mg), καθώς και με αμέταλλα στοιχεία, οι οποίες ονομάζονται κράματα αλουμινίου, με σκοπό την βελτίωση της προκείμενης ιδιότητας.

Μετά το 1888, το αλουμίνιο αποτέλεσε φθηνή πρώτη ύλη και εύκολα προσβάσιμη, αλλά και πάλι δεν ήταν αρκετά ανταγωνιστικό απέναντι στο ατσάλι όσον αφορά τη δομική του χρήση, ωστόσο χρησιμοποιήθηκε σε ρευματοφόρους αγωγούς λόγω της υψηλής του αγωγιμότητας. Μέχρι το 1991 το αλουμίνιο έφτασε σε παραγωγή τους 18,056 εκατομμύρια τόνους ανά έτος σε παγκόσμια κλίμακα. Σήμερα, το αλουμίνιο αποτελεί το πιο μαζικά καταναλώσιμο μη σιδηρούχο υλικό παγκοσμίως, με την ετήσια κατανάλωση να αγγίζει τα 24 εκατομμύρια τόνους. [3]

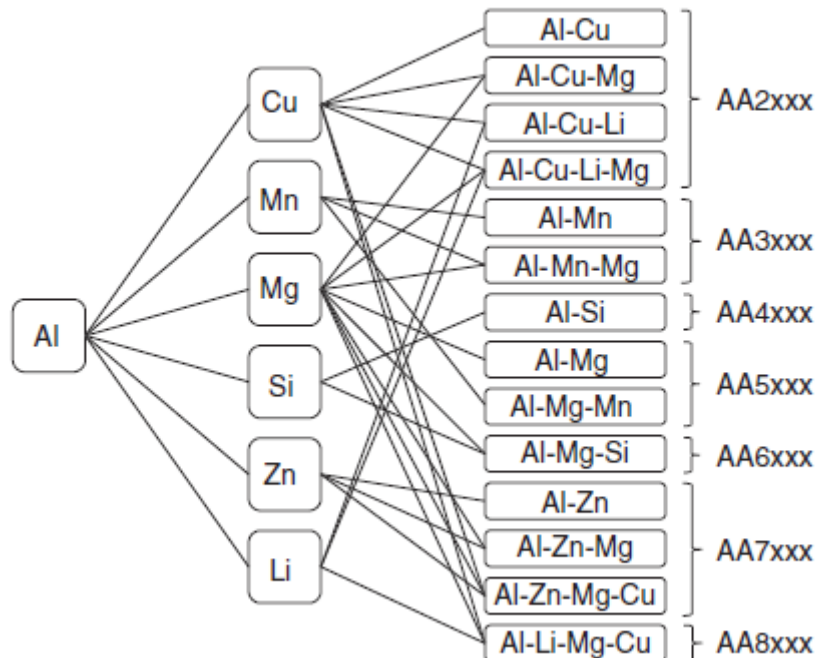
Το αλουμίνιο θεωρείται από τα πιο οικονομικά και ταυτοχρόνως πιο χρηστικά μέταλλα, γεγονός που το καθιστά περιζήτητο. Βρίσκει χρήσεις σε μεγάλο εύρος κατασκευών λόγω της ολκιμότητάς του, από μαλακό υλικό περιτυλίγματος έως και κατασκευές για ιδιαίτερες απαιτητικές μηχανικές χρήσεις, καθώς έρχεται δεύτερο μόνο από το ατσάλι. Η πυκνότητα του αλουμινίου είναι μόλις 2.69 g/cm³, δηλαδή σχεδόν το 1/3 από αυτή του ατσαλιού, του οποίου η πυκνότητα ανέρχεται στο 7.83 g/cm³, ενώ το βάρος του πρώτου είναι λιγότερο από το μισό του δεύτερου. [4]

Το σύστημα σχεδιασμού των κραμάτων διαμόρφωσης ή ελατών κραμάτων (wrought alloys) είναι το εξής: περιλαμβάνει τέσσερα (4) ψηφία, όπου το πρώτο συμβολίζει τα κύρια στοιχεία του κράματος, το δεύτερο τις μορφές του αρχικού κράματος και τα δυο τελευταία τις μορφές του κάθε κράματος ξεχωριστά. Συμφωνά με το πρώτο στοιχείο μόνο προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας (**Πίνακας 1.1**):

Πίνακας 1.1: Οι σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης

Σειρά	Περιεχόμενα Στοιχεία
1xxx	Καθαρό Αλουμίνιο (Al >99,00%)
2xxx	Κράματα Χαλκού (Al-Cu)
3xxx	Κράματα Μαγγανίου (Al-Mn)
4xxx	Κράματα Πυριτίου (Al-Si)
5xxx	Κράματα Μαγνησίου (Al-Mg)
6xxx	Κράματα Μαγνησίου και Πυριτίου (Al-Mg-Si)
7xxx	Κράματα Ψευδαργύρου (Al-Zn)
8xxx	Κράματα Αλουμινίου (Al) με άλλα στοιχεία

Στη παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 1.1**) φαίνεται αναλυτικά πως κατηγοριοποιούνται τα κράματα διαμόρφωσης στις προαναφερθείσες σειρές, σύμφωνα με τις προσμίξεις που υφίσταται σε κάθε περίπτωση το αλουμίνιο.



Εικόνα 1.1: Σχεδιάγραμμα των βασικών προσμίξεων για τη δημιουργία των κραμάτων διαμόρφωσης ανά σειρά [7]

Στον ακόλουθο πίνακα (**Πίνακας 1.2**), επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές σχετικές ιδιότητες των μετάλλων για κάθε μία από τις σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου:

Πίνακας 1.2: Οι σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης με τις βασικές τους μηχανικές ιδιότητες (ASM International 2009)

Σειρά	Ισχύς	Αντοχής Στις Ζημιές	Αντίσταση Στη Διάβρωση
1xxx	Πολύ Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή
2xxx	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
3xxx	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή
4xxx	Μέτρια	Χαμηλή	Υψηλή
5xxx	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή
6xxx	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή
7xxx	Πολύ Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
8xxx	-	-	-

Αντίστοιχα, το σύστημα σχεδιασμού των κραμάτων χύτευσης (casting alloys) είναι το εξής: περιλαμβάνει επίσης τέσσερα (4) ψηφία, όπου το πρώτο ψηφίο δείχνει τα κύρια στοιχεία του κράματος, το δεύτερο και τρίτο δείχνουν τις διάφορες μορφές του, και το τέταρτο ψηφίο δείχνει αν είναι χυτό (αν είναι το νούμερο 0) ή ingot (αν είναι τα νούμερα 1 ή 2). Επίσης σύμφωνα με το πρώτο ψηφίο λαμβάνουμε τον εξής πίνακα (**Πίνακας 1.3**):

Πίνακας 1.3: Οι σειρές των κραμάτων χύτευσης

Σειρά	Περιεχόμενα Στοιχεία
1xx.x	Καθαρό Αλουμίνιο (Al >99,00%)
2xx.x	Κράματα Χαλκού (Al-Cu)
3xx.x	Κράματα Πυριτίου (Al-Si) με προσθήκη Χαλκού (Cu) ή/και Μαγνησίου (Mg)
4xx.x	Κράματα Πυριτίου (Al-Si)
5xx.x	Κράματα Μαγνησίου (Al-Mg)
7xx.x	Κράματα Ψευδαργύρου (Al-Zn)
8xx.x	Κράματα Κασσίτερου (Al-Sn)

Τα ελατά κράματα αλουμινίου φέρουν ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν κατάλληλα και, συνεπώς, επιθυμητά για εκτενές εύρος κατηγοριών χρήσης. Τα πιο βασικά εξ αυτών είναι τα εξής:

- Η αντοχή τους στη διάβρωση, με τις σειρές 1xxx, 3xxx, 5xxx και 6xxx να εμφανίζουν ιδιαίτερα το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, καθώς χρησιμοποιούνται και σε περιπτώσεις που έρχονται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό και άλλα διαβρωτικά διαλύματα.
- Η θερμική αγωγιμότητα, εφόσον τόσο το αλουμίνιο όσο και τα κράματά του είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας, λιώνουν κατά προσέγγιση στους 535 °C και αγγίζουν υψηλές θερμοκρασίες βραδύτερα από ότι το ατσάλι.
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι μάλιστα το δεύτερο πιο αγωγίμο κοινό μέταλλο, μετά το χαλκό, ως προς τον ηλεκτρισμό.
- Υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος τους, το οποίο συνεπάγεται ότι το αλουμίνιο έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει πιο υψηλού βάρους υλικά, με αντίστοιχη στιβαρότητα, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για χρήσεις στην αεροναυπηγική, τις αυτοκινητοβιομηχανίες, αλλά και για την κατασκευή δοχείων μεγάλης χωρητικότητας (containers).
- Η δυσθραυστότητα και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, καθώς πολλά κράματα αλουμινίου είναι ιδιαίτερα «σκληρά» και εφαρμόζονται με επιτυχία σε περιπτώσεις όπου προαπαιτείτε αντοχή σε ασταθή ανάπτυξη ρωγμών.
- Η ιδιαίτερη αποτελεσματικότητά τους και η ευκολία χρήσης τους σε μεγάλη ποικιλία τεχνικών μεταλλικής κατεργασίας, με αποτέλεσμα να δύναται να λάβει πολλών ειδών σχήματα και να είναι πολυχρηστικό.
- Η ευκολία στην ένωσή τους με διάφορες μεθόδους, όπως η συγκόλληση, χαλκοκόλληση, βίδωμα, ακόμα και με καρφιά.
- Η ανακυκλωσιμότητα, και μάλιστα σε πολύ υψηλό βαθμό, σε αντίθεση με άλλα μέταλλα, από τα οποία προκύπτουν νέα προϊόντα, κατώτερα όμως ποιοτικά.

Οι αντίστοιχες ιδιότητες των χυτών κραμάτων είναι:

- Η ευκολία στη χύτευση, κυρίως της σειράς 3xx.x, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε σιλικόνη.
- Η υψηλή αντοχή, κυρίως της σειράς 2xx.x, όμως παρουσιάζουν δυσκολία στη χύτευση και υστερούν σε ωφέλημα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.
- Το «τελείωμά» τους, και κυρίως των σειρών 5xx.x και 7xx.x, όμως παρουσιάζουν επίσης δυσκολία στη χύτευση. [3]

1.2 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

Η ανάγκη για νέες λύσεις στην αεροναυπηγική οδήγησε στην αναζήτηση και τελικά την δημιουργία νέων δομικών υλικών, βασικότερο εκ των οποίων αποτελούν τα κράματα αλουμινίου. [5] Όταν οι αδερφοί Wright κατάφεραν να αναπτύξουν επιτυχώς τον πρώτο κινητήρα πτήσης, η χρήση του χυτού αλουμινίου στη μηχανή αλλά και σε άλλα περιφερειακά μέρη της κατασκευής, σήμαναν την αρχή μιας τεράστιας βιομηχανίας βασισμένη στην αεροναυπηγική. [2]

Για τη κατασκευή αεροσκαφών απαιτούνται υλικά τα οποία θα είναι ελαφριά και οικονομικά, και εμφανίζουν αντοχή σε καταστροφές και σε ακραίες θερμοκρασίες που μπορούν να κυμανθούν από υπό του μηδενός έως και υψηλές τιμές, με στόχο το βέλτιστο τελικό κατασκευαστικό αποτέλεσμα. Το κράμα διαμόρφωσης Duralumin (Al-3.5Cu-0.5Mg-0.5Mn) χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα στη Γερμανία σε πολλά τμήματα των αεροσκαφών Ζέπελιν, όπως και στο Junkers F-13, το οποίο απογειώθηκε για πρώτη φορά το 1919. Έτσι, τα κράματα διαμόρφωσης αλουμινίου ξεκίνησαν να αποτελούν τα πιο ευρέως διαδεδομένα μέταλλα στη βιομηχανία της κατασκευής αεροσκαφών.

Το Duralumin διαδέχτηκαν σύντομα τα κράματα των σειρών 2xxx και 7xxx. [6] Τα κράματα αυτά χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία στην αεροναυπηγική, τα οποία έχουν κατεργαστεί και εφαρμοστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδουν τον επιθυμητό συνδυασμό ιδιοτήτων ως προς την αντοχή, τη δυσθραυστότητα, τη κόπωση και την αντίσταση στη διάβρωση. Όμως, η δυσκαμψία που παρουσιάζουν λόγω του σχετικά χαμηλού μέτρου ελαστικότητας του αλουμινίου, δημιουργεί δυσκολία στη χρήση τους σε διάφορα τμήματα της κατασκευής ενός αεροσκάφους.

Το λίθιο σύντομα έγινε σημαντικό κραματικό στοιχείο, λόγω της ανάγκης που παρουσιάστηκε για περαιτέρω μείωση του βάρους και της ακαμψίας των ήδη υπάρχοντων κραμάτων αλουμινίου – χαλκού, καθώς και τη βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας. Τα κράματα αλουμινίου – λιθίου, τα οποία παρουσιάζουν αισθητή βελτίωση στην απόδοση σε σχέση με πολλά άλλα κράματα αλουμινίου, δεν άργησαν να κυριαρχήσουν στη βιομηχανία της αεροναυπηγικής. Τα περισσότερα μεταλλουργικά προβλήματα που έχουν εμφανιστεί ξεπεράστηκαν, με μόνες εξαιρέσεις τις αποκλίσεις στη δημιουργία ρωγμών και διάφορα διαβρωτικά φαινόμενα. Βασικό μειονέκτημα αυτών των κραμάτων αποτελεί επίσης η δύο (2) με τέσσερις (4) φορές υψηλότερη τιμή σε σχέση με τα υπόλοιπα κράματα αλουμινίου υψηλής αντοχής (**Εικόνα 1.2**).

Τα υψηλής αντοχής κράματα αλουμινίου που αυξάνεται η σκληρότητά τους κατά τη γήρανσή τους, τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρων στη κατασκευή αεροσκαφών είναι τα κράματα αλουμινίου – χαλκού και αλουμινίου – χαλκού – μαγνησίου της σειράς 2xxx, ορισμένα κράματα αλουμινίου – μαγνησίου – πυριτίου της σειράς 6xxx, τα κράματα αλουμινίου – ψευδαργύρου – μαγνησίου – χαλκού της σειράς 7xxx και ορισμένα κράματα με κύριο κραματικό στοιχείο το λίθιο της σειράς 8xxx.

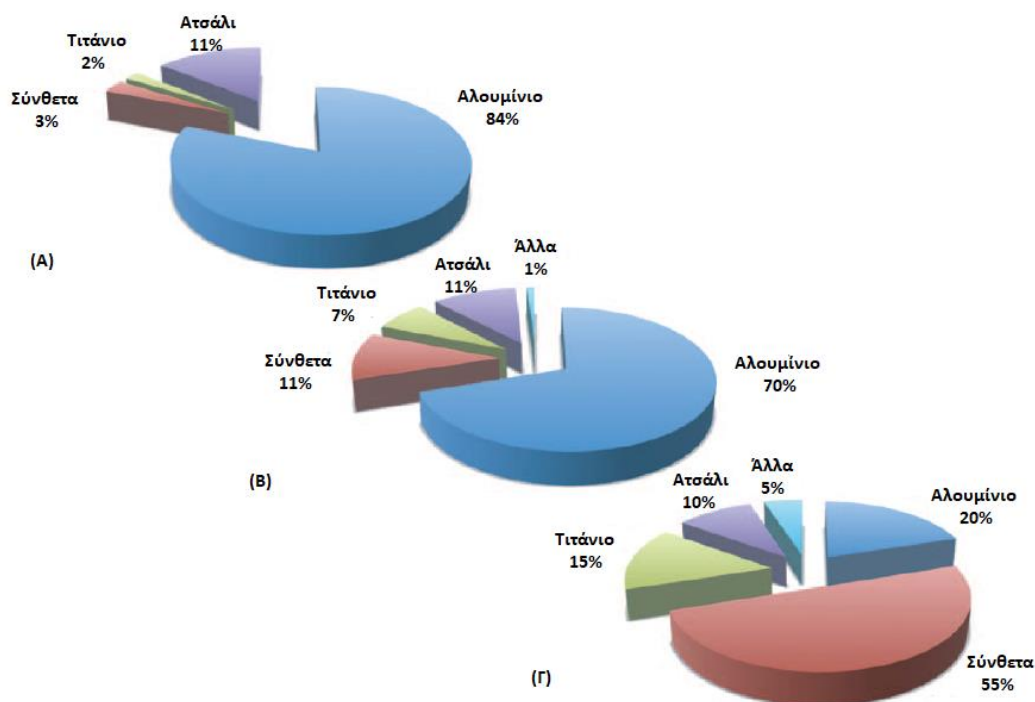


Εικόνα 1.2: Προαπαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες για κατασκευή επιβατηγών αεροσκαφών [9]

Τα κράματα αλουμινίου με πρόσμιξη χαλκού και μαγνησίου χρησιμοποιούνται στις κατασκευές τόσο αεροσκαφών όσο και διαστημικών σκαφών μέχρι και σήμερα. Το AA2024 (Al-4.4Cu-1.5Mg-0.6Mn-0.5Si-0.5Fe) σε κατάσταση φυσικής γήρανσης (T3) αποτελεί το πιο δημοφιλές για τις προαναφερθείσες χρήσεις, καθώς διαθέτει υψηλά επίπεδα ολκιμότητας, άριστη αντοχή στις ρηγματώσεις, τη κόπωση, καθώς και τη θραύση. Το κράμα αυτό έκανε την εμφάνισή του την δεκαετία του 1930, και, εφόσον διαθέτει μέτρια αντοχή αλλά υψηλή ανθεκτικότητα, είναι μέχρι σήμερα πλήρως κατάλληλο για κατασκευές οι οποίες απαιτούν συγκεκριμένες συμπεριφορές ως προς τη κόπωση και τη δυσθραυστότητά του.

Η κάτω επιφάνεια των φτερών σχεδόν όλων των επιβατηγών αεροσκαφών έχουν κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου από AA2024-T3, και χρησιμοποιείται σε τεράστιο ποσοστό στη κατασκευή και μικρότερων επιβατηγών αεροπλάνων. Λόγω της επιρρέπειάς τους στη διάβρωση, όπως και πολλά άλλα κράματα που συγκαταλέγονται στην ίδια σειρά, τα φύλλα AA2024-T3 επικαλύπτονται με επένδυση καθαρού αλουμινίου, για λόγους προστασίας από το φαινόμενο (Εικόνα 1.3).

Δύο παραλλαγμένες εκδοχές του κράματος 2024, τα 2224 και 2324, τα οποία κατασκευάστηκαν με μικρότερες περιεκτικότητες προσμίξεων στο καθαρό αλουμίνιο, χρησιμοποιούνται επίσης σε μεγάλο βαθμό, επίσης στη κατάσταση φυσικής γήρανσης (T3), και σημειώνουν υψηλότερη ισχύ από το προηγούμενο, αρχικό κράμα, αλλά και υψηλότερη αντοχή. Επίσης, το AA2014, του οποίου η δημιουργία χρονολογείται πριν αυτής του 2024, και περιέχει λιγότερο μαγνήσιο σε σύγκριση με αυτό, χρησιμοποιείται επίσης ακόμη στους τροχούς των αεροσκαφών που κατασκευάζονται στις ΗΠΑ, ενώ στο Ηνωμένο Βασίλειο χρησιμοποιείται, ορισμένες φορές και εξ ολοκλήρου, σε καταστάσεις φυσικής και τεχνητής γήρανσης. [8]



Εικόνα 1.3: Η χρήση των μεταλλικών υλικών σύμφωνα με το βάρος τους στα αεροσκάφη: (A) Boeing 767 (B) Boeing 777 (Γ) Boeing 787 [7]

1.3 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 2XXX

1.3.1 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 2XXX

Τα κράματα αυτής της σειράς είναι πολύ δημοφιλή ως προς τη χρηστικότητα τους, κυρίως λόγω του ότι υφίστανται θερμικές κατεργασίες, καθώς έχουν αντοχή ακόμα και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Οι πλειονότητα των κραμάτων που υπάγονται σε αυτή τη σειρά έχουν δημιουργηθεί με πρόσμιξη χαλκού στο αλουμίνιο, συνήθως σε περιεκτικότητες από 2.3 έως 6.3 wt. %, ενώ σε πολλά από αυτά υπάρχουν και προσθήκες μαγνησίου σε περιεκτικότητα 1.5 wt. % . Η μέγιστη διαλυτότητα του χαλκού στο αλουμίνιο ανέρχεται σε περιεκτικότητα 5.5-5.6 wt. % και αύξηση πέραν αυτού του ποσοστού έχει ελάχιστη έως μηδαμινή επίδραση στην ισχύ, καθώς δε μπορεί να διαλυθεί περαιτέρω και επομένως δεν ασκεί ιδιαίτερη επιρροή στην διαδικασία κατακρήμνισης του υλικού.

Βασικότερο κράμα αυτής της σειράς, με ευρεία χρήση στη βιομηχανία της αεροναυπηγικής, είναι το AA2024 (4.4 wt. % χαλκό και 1.5 wt. % μαγνήσιο). Συνήθως, χρησιμοποιείται σε κατάσταση φυσικής γήρανσης η οποία διαδέχεται την διαδικασία κατασκευής του (T3), όπου παρουσιάζει υψηλή ολκιμότητα, σκληρότητα και αντοχή στη δημιουργία ρωγμών λόγω εφαρμογής κοπωτικών φορτίων.

Η προσθήκη του χαλκού στο αλουμίνιο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τη επιρρέειας του στερεού διαλύματος που προκύπτει στη διάβρωση, ιδίως συγκριτικά με άλλα κράματα που συγκαταλέγονται σε κάποια από τις υπόλοιπες σειρές κραμάτων αλουμινίου, τα οποία περιέχουν λιγότερο ή και καθόλου πρόσμιξη χαλκού. Συνεπώς, για την επίλυση αυτού του τύπου προβλημάτων, πολλές φορές ορισμένα από τα

κράματα αυτής της σειράς επιδέχονται επίστρωση καθαρού αλουμινίου για λόγους προστασίας από διαβρωτικές επιδράσεις.

Πολλά από τα κράματα της σειράς κατασκευάστηκαν ειδικά για να αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, που μπορούν να αγγίξουν έως και τους 200 °C, όπως το AA2618, το οποίο περιέχει προσμίξεις σιδήρου σε περιεκτικότητα 1 wt. %, και νικελίου σε περιεκτικότητα 1.1 wt. %. Λόγω της προσθήκης των δύο αυτών στοιχείων και των χαρακτηριστικών τους, το υλικό εμφανίζει φανερά ενισχυμένη αντοχή σε θερμοκρασιακές μεταβολές σε σύγκριση με άλλα κράματα της ίδιας σειράς, καθώς και βελτιωμένη αντοχή στον ερπυσμό. [7]

1.3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ 2XXX

1.3.2.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Εφελκυσμός ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία δύο ίσου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης δυνάμεις ασκούνται στον κεντροβαρικό άξονα σύμφωνα με το μήκος ενός δοκιμίου και έχουν φορά αντίθετη από το δοκίμιο. Οι εν λόγω δυνάμεις ονομάζονται αξονικές και τείνουν να επιφέρουν κατακόρυφη επιμήκυνση του δοκιμίου. [11]

Το μέγεθος το οποίο προκύπτει και το οποίο εν τέλει μελετάται είναι αυτό της τάσης (σ), η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της εφαρμοζόμενης αξονικής δύναμης (F) προς το αρχικό εμβαδόν (A_0) της επιφάνειας στην οποία ασκείται. Ο μαθηματικός τύπος που προκύπτει είναι ο εξής:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Η τάση, όπως άλλωστε προκύπτει και από τον παραπάνω τύπο, είναι διανυσματικό μέγεθος, το οποίο στη περίπτωση του εφελκυσμού έχει θετικό πρόσημο. Η μονάδα μέτρησης της τάσης είναι το 1 Pa (1 Pascal= N/m²).

Επίσης, στις δοκιμές εφελκυσμού, μελετάται το μέγεθος της παραμόρφωσης. Αξονική παραμόρφωση (ε) ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο επιφέρεται επιμήκυνση παράλληλα στον άξονα εφαρμογής μίας εφελκυστικής τάσης, λόγω της τάσης αυτής και υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

όπου ΔL μεταβολή του μήκους που επήλθε και L_0 το αρχικό μήκος του δοκιμίου ως προς την κατεύθυνση της επιμήκυνσης. [12]

Λόγω της επιβολής των προαναφερθέντων δυνάμεων, στο δοκίμιο αναπτύσσονται τελικά τάσεις, οι οποίες όταν ξεπεράσουν μια χαρακτηριστική για το κάθε υλικό κρίσιμη τιμή οι παραμορφώσεις οι οποίες επέρχονται είναι πλέον πλαστικές, δηλαδή μη αναστρέψιμες. Πριν την εν λόγω κρίσιμη τιμή το υλικό βρίσκεται στην ελαστική του κατάσταση, κατά την οποία παρατηρείται γραμμικότητα στη μεταβολή της τάσης

συναρτήσει αυτής της παραμόρφωσης. Την συγκεκριμένη φάση περιγράφει ο Νόμος του Hooke, ο οποίος ερμηνεύεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

όπου E το Μέτρο Ελαστικότητας, το οποίο αποτελεί επίσης χαρακτηριστική σταθερά του υλικού. Η γραμμικότητα της σχέσης τάσης – παραμόρφωσης, και συνεπώς και ο νόμος αυτός, είναι εφαρμόσιμα μόνο όσο το υλικό βρίσκεται στην ελαστική του κατάσταση. Η μονάδα μέτρησης του μεγέθους είναι επίσης το 1 Pa, όμως λόγω των μεγάλων τιμών που συνήθως σημειώνονται για τα περισσότερα υλικά μετράτε σε πολλαπλάσιά του (GPa). [11]

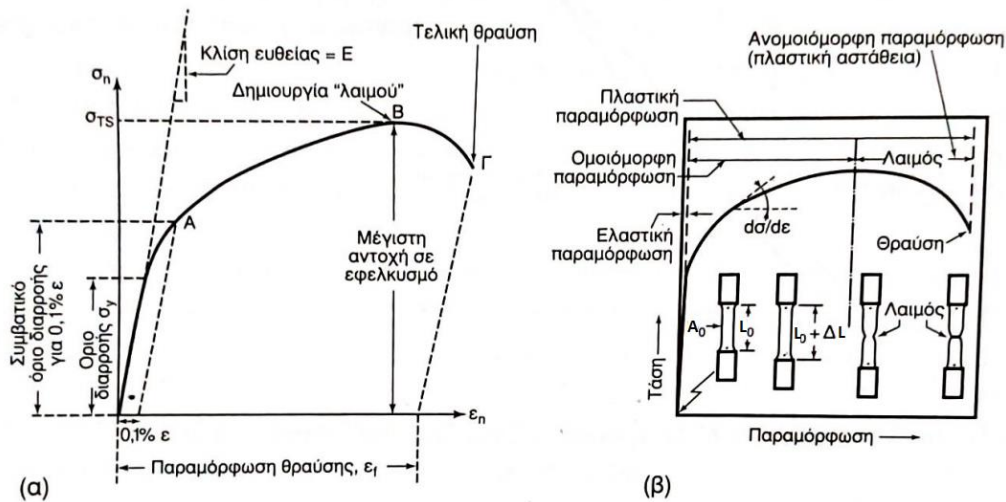
Ένας τρόπος μέτρησης του Μέτρου Ελαστικότητας (E) είναι, προφανώς, μέσω του Νόμου Hooke για την ελαστική παραμόρφωση του υλικού. Όμως δεν είναι απόλυτα ακριβής και, συνεπώς, κατάλληλος για τον υπολογισμό του μεγέθους, καθώς δεν υπολογίζει την πιθανή συνεισφορά άλλων παραγόντων στη παραμόρφωση του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων αλουμινίου κυμαίνεται στις τιμές 69-79 GPa (όπου 69 GPa είναι το μέτρο ελαστικότητας του καθαρού αλουμινίου), χαμηλότερο από αυτό των κραμάτων τιτανίου (80-130 GPa) και των κραμάτων χαλκού (120-150 GPa).

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας είναι μέσω του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με τα δεδομένα μιας εφελκυστικής πειραματικής διαδικασίας. Τα στάδια τα οποία περιγράφονται στο διάγραμμα αυτό τα ακόλουθα: αρχικά η ελαστική παραμόρφωση του υλικού, όπου το διάγραμμα αναπτύσσεται γραμμικά, και έπειτα η πλαστική παραμόρφωση, όπου η γραμμικότητα παύει να υφίσταται. Το δεύτερο στάδιο χωρίζεται επιμέρους στην ομοιόμορφη παραμόρφωση και την ανομοιόμορφη παραμόρφωση, όπου παρατηρείται η δημιουργία «λαιμού» στο δοκίμιο.

Τα μεγέθη τα οποία, ουσιαστικά, διακρίνουν τα παραπάνω στάδια είναι τα εξής:

- Το Όριο Διαρροής (σ_y), σε τάσεις μεγαλύτερες από τη τιμή του το υλικό ξεπερνάει το στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης και παραμορφώνεται πλέον πλαστικά. Πολλές φορές συγχέεται με το όριο αναλογίας, το οποίο ορίζει μέχρι ποια τιμή το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά. Από το όριο αναλογίας έως το όριο διαρροής το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά αλλά η σχέση τάσης – παραμόρφωσης παύει να είναι γραμμική.
- Η Μέγιστη Αντοχή Σε Εφελκυσμό (σ_{TS}), είναι η τάση κατά την εφαρμογή της οποίας εμφανίζεται για πρώτη φορά το φαινόμενο της «λαιμώσεως».
- Η Παραμόρφωση Θραύσεως (ε_f), η παραμόρφωση η οποία επέρχεται έως τελικά τη θραύση του δοκιμίου.

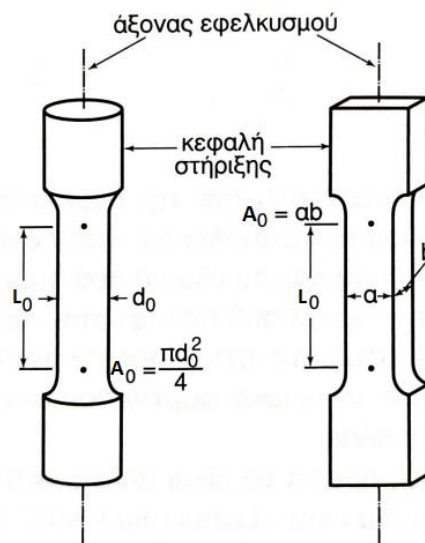
Το μέτρο ελαστικότητας ισούται με τη κλίση της εφαπτόμενης ευθείας, στην ελαστική περιοχή της καμπύλης σ - ε . Μία τυπική καμπύλη τάσης – τροπής παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.4**.



Εικόνα 1.4: (α) Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δοκιμής εφελκυσμού του χαλκού (β) Παράσταση του εφελκυσμού δοκιμίου έως τη θραύση του.[12]

Όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη διαφοροποιούνται από υλικό σε υλικό, όμως υπάρχουν και άλλοι παράγοντες επίδρασης στις τιμές τους. Ορισμένοι από αυτούς είναι οι προσμίξεις διαφορετικών υλικών τα οποία, όπως εξυπακούεται, παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές στα μεγέθη αυτά, η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το υλικό, οι κατεργασίες στις οποίες έχει υποβληθεί πριν την καταπόνησή του, η ταχύτητα με την οποία επιβάλλεται η φόρτιση στο υλικό, και άλλοι.

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιούνται σε πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού έχουν είτε σχήμα ράβδου με κυκλική διατομή, είτε έχουν μορφή ελάσματος με ορθογωνική διατομή [12] όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1.5):



Εικόνα 1.5: Αναπαράσταση των δύο (2) τύπων δοκιμίων που χρησιμοποιούνται για τις δοκιμές εφελκυσμού. [12]

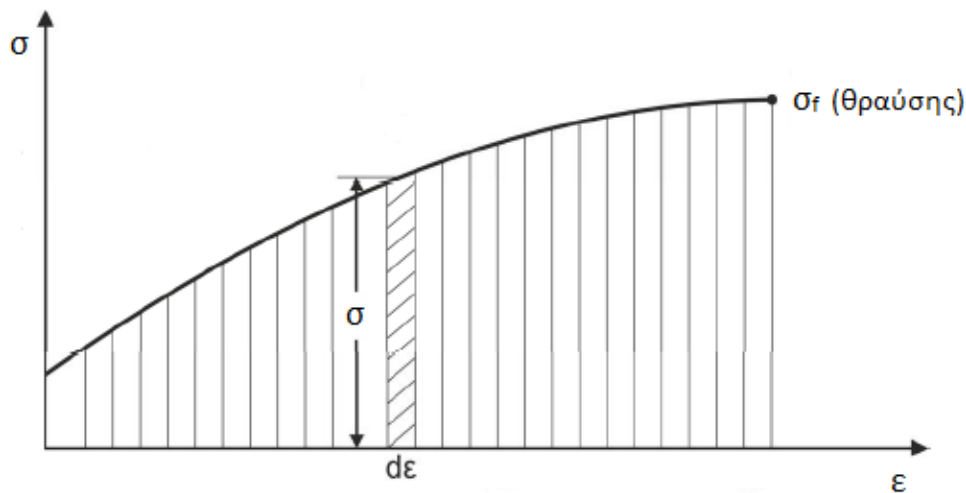
1.3.2.2 ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ

Ένα ακόμη μέγεθος το οποίο μπορεί να υπολογιστεί μέσω του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης που προκύπτει από μια δοκιμή εφελκυσμού είναι αυτό της δυσθραυστότητας (fracture toughness) του υλικού. Δυσθραυστότητα είναι η συνολική ενέργεια που απορροφά το δοκίμιο κατά τη καταπόνησή του μέχρι να επέλθει θραύση του. Η μέτρηση του μεγέθους αυτού γίνεται μέσω της αντίστασης που παρουσιάζει το υλικό στην έντονη διάδοση των ρωγμών. Επίσης, μέσω της μέτρησης της δυσθραυστότητας, μπορούμε να αποφανθούμε εάν και σε ποιο βαθμό το υλικό συμπεριφέρεται όλκιμα ή ψαθηρά.

Ως μηχανική ιδιότητα των υλικών, η δυσθραυστότητα αποδίδει την ικανότητά τους να υπόκεινται σε πλαστικές παραμορφώσεις έως τη θραύση τους, και να προσλαμβάνουν φορτία. Δεν πρέπει ως ιδιότητα να συγχέεται, επίσης, με τη στιβαρότητα ή την αντοχή σε εφελκυσμό ενός υλικού. Για παράδειγμα, το αλουμίνιο παρουσιάζει μέτρια στιβαρότητα και αντοχή σε εφελκυσμό, όμως έχει υψηλή δυσθραυστότητα.

Για τον μαθηματικό προσδιορισμό της δυσθραυστότητας, λαμβάνουμε υπόψιν μας ότι η ενέργεια την οποία απορροφά το υλικό κατά την εφελκυστική του καταπόνηση, ανά μονάδα όγκου, ισούται με το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (**Εικόνα 1.6**). Δηλαδή:

$$W = \int_0^A \sigma d\varepsilon$$



Εικόνα 1.6: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης με σκιαγραφημένο το εμβαδόν κάτωθεν της καμπύλης. [13]

Όμως, χρησιμοποιώντας τους μαθηματικούς τύπους υπολογισμού της τάσης και της παραμόρφωσης, που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο, ο τύπος γίνεται:

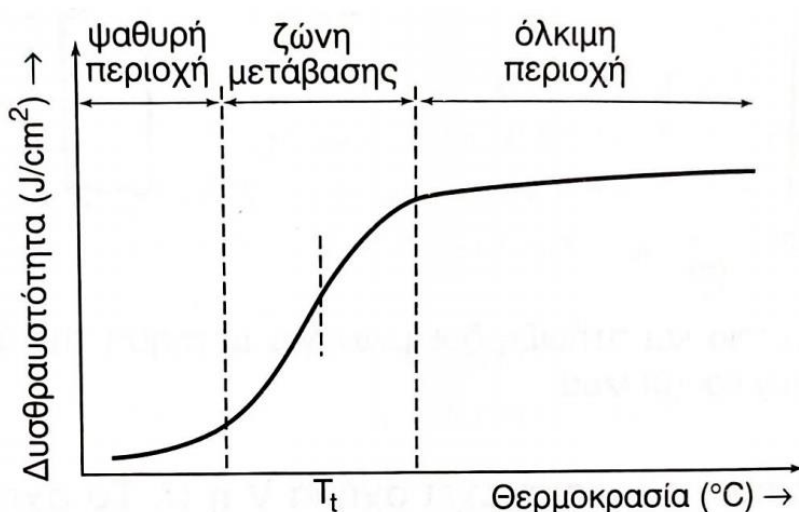
$$W = \int_{L_0}^{L_f} \frac{F}{A_0} d \frac{\Delta L}{L_0}$$

όπου L_f το τελικό μήκος του δοκιμίου, δηλαδή το μήκος του τη στιγμή της θραύσης του. Τέλος, χρησιμοποιώντας επιπλέον τις σχέσεις $\Delta L_f = L_f - L_0$, όπου ΔL_f η μεταβολή μήκους έως τη θραύση του δοκιμίου, και $V_0 = A_0 \cdot L_0$, όπου V_0 ο αρχικός όγκος του δοκιμίου, ο τύπος που τελικά λαμβάνουμε γίνεται:

$$W = \frac{1}{V_0} \int_0^{\Delta L_f} F d(\Delta L)$$

Η θραύση, ειδικά για υλικά με υψηλή θερμική αγωγιμότητα όπως τα μέταλλα, εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία στην οποία είναι εκτεθειμένο το υλικό. Πιο συγκεκριμένα, σε θερμοκρασίες δωματίου (20 – 25 °C) στα μέταλλα επέρχεται θραύση με ψαθυρό τρόπο, ενώ σε θερμοκρασίες υψηλότερες αυτών με όλκιμο τρόπο. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από τη θεωρία των διαταραχών, η οποία περιγράφει πως σε χαμηλές θερμοκρασίες οι διαταραχές αδρανοποιούνται, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η πλαστική παραμόρφωση του υλικού, που αποτελεί χαρακτηριστικό της ψαθυρής συμπεριφοράς.

Υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασιών (T_f), χαρακτηριστικό για το κάθε μέταλλο, στο οποίο πραγματοποιείται η μεταβίβαση από την ψαθυρή συμπεριφορά στην όλκιμη (**Εικόνα 1.7**). Η ζώνη μεταβίβασης μπορεί να διαφοροποιηθεί για ένα μέταλλο σύμφωνα με τη μεταβολή ορισμένων συνθηκών κάτω από τις οποίες επιβλήθηκε η καταπόνησή του, όπως, για παράδειγμα, η ταχύτητα επιβολής του φορτίου, η γεωμετρία του δοκιμίου ή της εγκοπής, το μέγεθος των κόκκων του υλικού κατασκευής. [12]

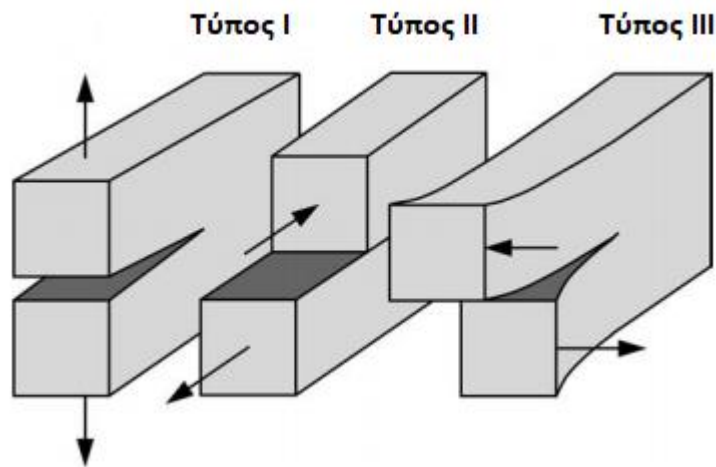


Εικόνα 1.7: Διάγραμμα Δυσθραυστότητας – Θερμοκρασίας. [12]

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού τη δυσθραυστότητας, και συγκεκριμένα αυτός που χρησιμοποιείται συχνότερα και κυρίως για την πειραματική της μελέτη και συνεπώς μελετήθηκε και στη παρούσα εργασία, είναι μέσω του συντελεστή έντασης τάσεων

(K). Ο συντελεστής έντασης τάσεων είναι η παράμετρος η οποία αποτελεί κινητήρια δύναμη της επέκτασης μιας ρωγμής. [14]

Ο υπολογισμός του συντελεστή έντασης τάσεων πραγματοποιείται συνήθως με τρεις (3) διαφορετικούς τύπους με τους οποίους δύναμη να ενεργήσει σε μία ρωγμή. Ο πρώτος (τύπος I), ο οποίος είναι και ο συνηθέστερος και χρησιμοποιήθηκε για τη παρούσα έρευνα, είναι όταν η δύναμη ασκείται κάθετα του επιπέδου διάδοσης της ρωγμής, και έπειτα ο δεύτερος (τύπος II) όπου η δύναμη ασκείται έτσι ώστε να προκύπτει ολίσθηση και, τέλος, ο τρίτος τύπος (τύπος III) όπου η δύναμη ασκείται αποσχιστικά. Οι τρεις (3) αυτοί τύποι αναπαρίστανται στη παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 1.8**):



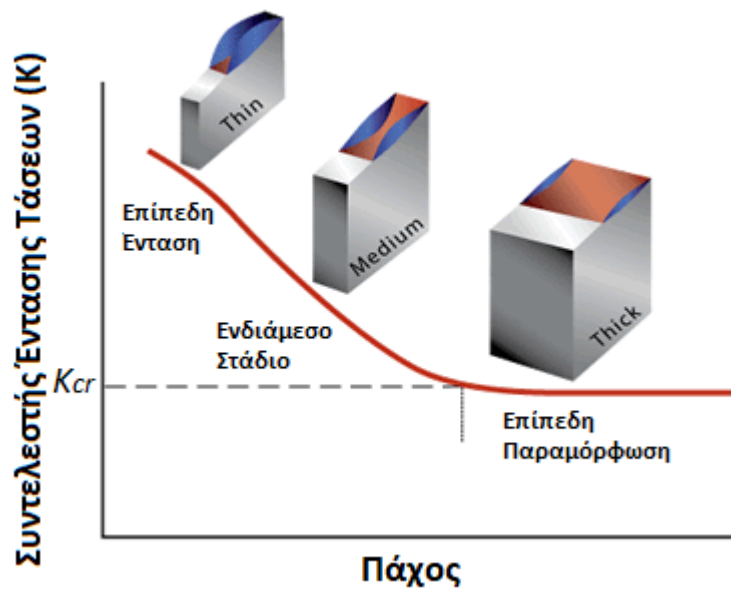
Εικόνα 1.8: Οι τρεις (3) τύποι φόρτισης που μπορούν να εφαρμοστούν σε μία ρωγμή. [16]

Μαθηματικά ο συντελεστής έντασης τάσεων υπολογίζεται ως εξής:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a \beta}$$

όπου σ η ορθή τάση, a το μήκος της ρωγμής και β ένας παράγοντας μήκους ρωγμής και γεωμετρίας των συνιστωσών, ο οποίος διαφέρει σε κάθε δοκίμιο και δεν έχει διαστάσεις. Η μονάδα μέτρησης του συντελεστή έντασης τάσεων είναι το $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Έχει παρατηρηθεί πειραματικά ότι δοκίμια με ίδιες αναλογίες αλλά άνισο συνολικό μέγεθος σημειώνουν διαφορετικές τιμές για το K_I , διότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις οι οποίες γειτνιάζουν με τις ατέλειες του ολικού, όπως στη προκειμένη περίπτωση ρωγμές, διαφοροποιούνται όταν αλλάζει το πάχος του δοκιμίου, έως ότου αυτό ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή. Όταν το πάχος υπερβαίνει τη κρίσιμη αυτή τιμή, ο συντελεστής έντασης τάσεων σταθεροποιείται, και η τιμή του αυτή καλείται κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων (K_{cr}), ο οποίος αποτελεί χαρακτηριστική σταθερά του υλικού. Η ιδιότητα αυτή καλείται δυσθραυστότητα επίπεδης παραμόρφωσης (**Εικόνα 1.9**). Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του K_{cr} είναι η μέγιστη τιμή έντασης τάσεων κάτω από δεδομένες συνθήκες όπου το υλικό δεν επέρχεται οριακά σε θραύση, δηλαδή η μέγιστη αντίσταση στη διάδοση της ρωγμής.



Εικόνα 1.9: Ο συντελεστής έντασης τάσεων συναρτήσει του πάχους του δοκιμίου. [15]

1.3.3 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ AL-CU-LI

Τις δύο πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, ερευνητές στη Γερμανία άρχισαν να μελετούν τη πρόσμιξη του λιθίου στο αλουμίνιο για τη δημιουργία διαφόρων κραμάτων. Το λίθιο είναι αρκετά σταθερό ως πρόσμιξη στο αλουμίνιο σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ με τη μείωση της θερμοκρασίας προκαλείται και μείωση της διαλυτότητάς του. Το πρώτο κράμα αλουμινίου – λιθίου το οποίο διατέθηκε για εμπορική παραγωγή και χρήση ονομάστηκε «Scleron» (Al-12Zn-3Cu-0.6Mn-0.1Li), είχε έντονη αντίσταση στη φθορά, τη διάβρωση και την οξείδωση, είχε υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και μπορούσε να εξυπηρετήσει σε πολλών ειδών χρήσεις. Όμως αργότερα αποδείχθηκε ότι άλλα κράματα αλουμινίου έδειχναν να έχουν καλύτερες ιδιότητες και σύντομα αποσύρθηκε από την αγορά.

Το 1957 μεταλλουργοί της Alcoa Corporation (Aluminum Company of America) ανέπτυξαν το κράμα Αλουμινίου – Λιθίου – Χαλκού (Al-Cu-Li) 2020 (Al-4.5Cu-1.1Li-0.5Mn-0.2Cd), το οποίο επέδειξε υψηλή αντοχή στον ερπυσμό ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες (150-200 °C). Όμως, λόγω της ευθραυστότητάς του και των προβλημάτων που δημιούργησε στην εκτενή του παραγωγή, εκείνη σταμάτησε μέσα στη δεκαετία του 1960.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) ήταν η πρώτη χώρα η οποία προχώρησε σε μαζική παραγωγή κραμάτων αλουμινίου – λιθίου, ενώ τη δεκαετία του 1970 ακολούθησε και η Σοβιετική Ένωση. Τη δεκαετία αυτή καθώς και την επόμενη ξεκίνησε ένα πρόγραμμα παραγωγής κραμάτων Αλουμινίου – Λιθίου, το οποίο είναι μέχρι σήμερα το μεγαλύτερο πρόγραμμα παραγωγής στην ιστορία της μεταλλουργίας του αλουμινίου.

Αρχικά, το 1970 οι επιστήμονες και οι μηχανικοί που εργάζονταν στο προκείμενο πρόγραμμα εστίασαν στη δημιουργία ενός κράματος με βάση το αλουμίνιο το οποίο

όμως θα είχε μειωμένο βάρος σε σχέση με το καθαρό υλικό, πράγμα το οποίο επιτεύχθηκε με τη πρόσμιξη του λιθίου, καθώς το τελευταίο αποτελεί το ελαφρύτερο μέταλλο και μειώνει αισθητά την πυκνότητα του αλουμινίου. [9]

Επίσης το 1970, ξεκίνησε να χρησιμοποιείται εκτενώς στη Ρωσία το AA1420, το οποίο περιέχει 2% λίθιο και 5.5% μαγνήσιο, γεγονός που του προσδίδει βελτιωμένο βάρος και περισσότερο έντονη αντίσταση στη διάβρωση της επιφάνειάς του. Η επιτυχία που γνώρισε ως προς τη χρήση του ώθησε τη δημιουργία κραμάτων αλουμινίου με βασικό υλικό πρόσμιξης το λίθιο (Al-Li). Τις δεκαετίες 1980 και 1990 η Σοβιετική Ένωση καθώς και άλλες χώρες ξεκίνησαν τη κατασκευή ποικίλων κραμάτων Αλουμινίου – Λιθίου – Χαλκού (Al-Cu-Li) και Αλουμινίου – Λιθίου – Μαγνησίου – Χαλκού (Al-Li-Mg-Cu). [5]

Το 1980, επίσης, δημιουργήθηκε από την Alcoa Corporation το AA2090 καθώς και άλλα κράματα τα οποία αποτέλεσαν τη δεύτερη γενιά κραμάτων Αλουμινίου – Λιθίου. Όμως δεν αναπτύχθηκε η παραγωγή τους, λόγω της ανισοτροπίας των ιδιοτήτων τους, τη χαμηλή σκληρότητα και την ελάχιστη αντίστασή τους στη διάβρωση. Οι πρόσφατες έρευνες κατέληξαν στη δημιουργία μιας νέας γενιάς κραμάτων αλουμινίου, τα οποία παρουσιάζουν μειωμένη πυκνότητα, ικανοποιητική αντίσταση σε διάβρωση, καλά επίπεδα αντοχής και σκληρότητας, καθώς και ευκολία στη μαζική τους παραγωγή. [10]

1.3.3.1 ΤΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2198

Το κράμα αλουμινίου 2198 ανήκει στη τρίτη γενιά κραμάτων αλουμινίου. Χαρακτηριστικό της γενιάς αυτής είναι ότι η περιεκτικότητα των κραμάτων σε λίθιο (Li) είναι λιγότερη ή ίση του 2% κατά βάρος, σε αντίθεση με όσα ανήκαν στη προηγούμενη (δεύτερη) γενιά στα οποία η αντίστοιχη περιεκτικότητα είναι μεγαλύτερη του 2% κατά βάρος. Η τρίτη γενιά άρχισε να αναπτύσσεται τη δεκαετία του 1980, όμως ξεκίνησε η κυκλοφορία τους στην αγορά το 1990. Πλέον κατασκευάζονται κράματα Αλουμινίου – Λιθίου με φανερά βελτιωμένο συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων, καθώς και αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Συγκεκριμένα, το AA2198 συστήθηκε στην αγορά το 2005. Η σύστασή του είναι Al-3.2Cu-1.0Li-0.5Mg και η πυκνότητά του ανέρχεται στα 2.69 g/cm³. Σε σχέση με παραπλήσια κράματα της ίδιας σειράς συντελείται από μέσα επίπεδα χαλκού, χαμηλά επίπεδα μαγνησίου και υψηλά επίπεδα λιθίου. Βρίσκει μέχρι σήμερα εφαρμογή στην αεροναυπηγική, κυρίως ως υλικό επένδυσης ατράκτου σε επιβατηγά αεροσκάφη (**Εικόνα 1.10**). Μέσω μελετών έχει εκτιμηθεί ότι παρουσιάζει περίπλοκη ανισότροπη συμπεριφορά, καθώς στη παράλληλη κατεύθυνση φόρτισης με τη φορά έλασης (L) παρουσιάζει τη μέγιστη αντοχή του ενώ την ελάχιστη σε κατεύθυνση φόρτισης σε γωνία 45° από τη φορά έλασης (L+45°), στα περισσότερα στάδια θερμικής κατεργασίας. Φύλλα κατασκευασμένα από το εν λόγω υλικό φαίνεται να έχουν αντοχή σε διαφόρων ειδών καταπονήσεις, με μέση σκληρότητα, και αποτελεί, κυρίως στο στάδιο της μέγιστης γήρανσης (T8), αντικαταστάτης των κραμάτων αλουμινίου 2024 και 2524 σε κατάσταση φυσικής γήρανσης (T3). [9]



Εικόνα 1.10: Κύλινδρος σε πρώιμο στάδιο με περιστροφικό θόλο κατασκευασμένος από AA2198 για το αεροσκάφος Falcon 9. [9]

1.4 ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΡΥΜΝΙΣΗ ΛΟΓΩ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

Το αλουμίνιο έχει την ιδιότητα να επιδέχεται θερμικές επεξεργασίες με σκοπό την λήψη επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων, επιλέγοντας καταλλήλως τη θερμοκρασία στην οποία θα εκτεθεί και το χρόνο έκθεσης. Γενικώς, ο όρος «θερμική κατεργασία» (heat treatment) αναφέρεται σε κάθε είδους θερμικές επεξεργασίες που έχουν σκοπό τη μορφοποίηση της δομής ενός υλικού με τέτοιο τρόπο ώστε να αναδιαμορφωθούν οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες, σύμφωνα πάντα με τα κατάλληλα προκαθορισμένα κριτήρια. Ορισμένα από τα αποτελέσματα που μπορούν να επέλθουν μέσω της διαδικασίας αυτής είναι αύξηση της σκληρότητας, βελτίωση της ανθεκτικότητας, σταθεροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς, σταθερότητα στις διαστάσεις, διαφοροποίηση της αντίστασης στη διάβρωση. [2]

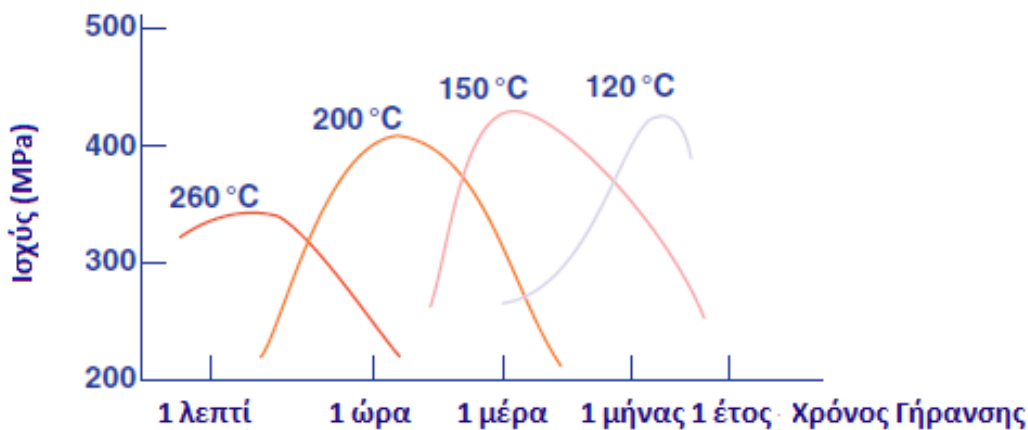
Στην καθαρή του μορφή, το αλουμίνιο είναι ιδιαίτερα μαλακό, με αντοχή μόλις 7-11 MPa, και επομένως η μηχανική του χρήση είναι περιορισμένη. Αυτό το χαρακτηριστικό του αποτέλεσε και έναν από τους βασικότερους λόγους που οδήγησαν στην μελάτη και έπειτα τη κατασκευή των κραμάτων αλουμινίου, δηλαδή την πρόσμιξη άλλων μετάλλων στο καθαρό αλουμίνιο.

Ο Alfred Wilm ήταν ο πρώτος που παρατήρησε το φαινόμενο της γήρανσης το 1906, όταν μελετούσε τις ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου – χαλκού, και πρόσεξε πως ορισμένα δείγματα του υλικού τα οποία είχε στη κατοχή του και τα οποία είχε αφήσει στο εργαστήριό του για μερικές μέρες, μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα αυξήθηκε η σκληρότητά τους. Έτσι ξεκίνησε η δημιουργία του Duralumin, το οποίο προέκυψε από τη πρόσμιξη του μαγνησίου στο βασικό ήδη κατασκευασμένο κράμα Al-4%Cu. Επίσης, μέσω πειραματικών μελετών, παρατηρείται ότι αν το κράμα εκτεθεί απλώς σε θερμοκρασίες δωματίου, δηλαδή σε κατάσταση φυσικής γήρανσης, η διαδικασία σκλήρυνσης διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο μπορεί να κυμανθεί από μέρες έως και έτη. Εάν, όμως, το υλικό εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως για

παράδειγμα στους 170 °C, τα ίδια αποτελέσματα στη σκλήρυνση του υλικού μπορούν να επιτευχθούν μέσα σε μερικές ώρες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται τεχνητή γήρανση (artificial ageing) μέσω θερμικής κατεργασίας. [7]

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού μπορούν να τροποποιηθούν με θερμική επεξεργασία μετά τη στερεοποίησή του, διαδικασία η οποία ονομάζεται θερμική κατεργασία. [2] Παρά το γεγονός ότι ο Alfred Wilm μίλησε πρώτη φορά για «γήρανση» των υλικών το 1906, το φαινόμενο εξηγήθηκε το 1919. Οι έρευνες που διεκπεραιώθηκαν κατέληξαν πως αυτό οφείλεται στην κατακρήμνιση από ένα υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα, με βασικό στοιχείο της διαδικασίας τη μείωση της διαλυτότητας των στοιχείων του κράματος μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας. [9]

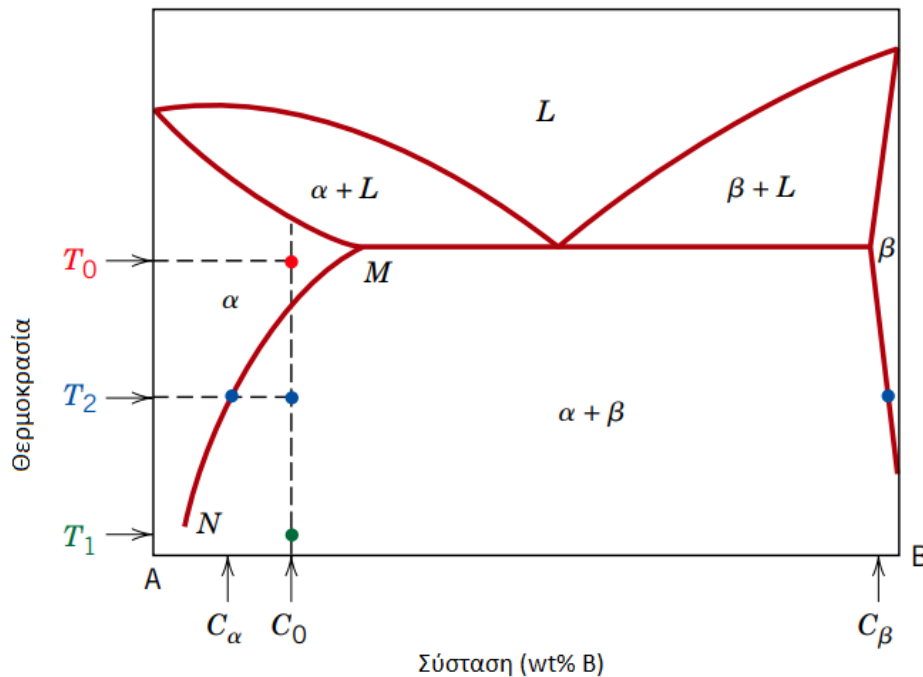
Παρατηρώντας το παρακάτω ενδεικτικό διάγραμμα σκληρότητας – έκθεσης σε ορισμένη θερμοκρασία για τρεις (3) διαφορετικές θερμοκρασιακές τιμές, με στόχο την τεχνητή γήρανση ενός ορισμένου υλικού (**Εικόνα 1.11**), διακρίνονται τρία (3) βασικά στάδια της διαδικασίας: το στάδιο προ-γήρανσης (under ageing) όπου η ισχύς και η σκληρότητα του υλικού αυξάνονται, το στάδιο της μέγιστης γήρανσης (peak ageing) όπου η σκληρότητα του υλικού αγγίζει τη μέγιστη τιμή της, και, τέλος, το στάδιο υπερ-γήρανσης (over ageing) όπου το υλικό αρχίζει να μαλακώνει. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία στην οποία εκτίθεται το υλικό για την επίτευξη της τεχνητής του γήρανσης, τόσο αυξάνεται ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να επέλθει το υλικό στο στάδιο της μέγιστης γήρανσης. Αντίστοιχα, η ολκιμότητα φαίνεται να παρουσιάζει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη σκληρότητα που αναπτύσσει το υλικό. [7]



Εικόνα 1.11: Διαγράμματα περιγραφής της επίδρασης του χρόνου γήρανσης και της θερμοκρασίας στην ισχύ του κράματος αλουμινίου – χαλκού

Η διαδικασία σκλήρυνσης η οποία προκύπτει μέσω θερμικής κατεργασίας του υλικού περιγράφεται με τη σχεδίαση ενός διαγράμματος φάσης (**Εικόνα 1.7**). Πρακτικά, τα κράματα τα οποία συνήθως εκτίθενται στη προκειμένη επεξεργασία αποτελούνται από περισσότερα από δύο (2) κύρια κραματικά στοιχεία, όμως γίνεται αναγωγή σε ένα δυαδικό σύστημα για λόγους απλούστευσης. Δύο (2) βασικά και προαπαιτούμενα χαρακτηριστικά πρέπει να διασαφηνίζονται σε ένα διάγραμμα φάσης ενός κράματος κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης: η διαλυτότητα του ενός κραματικού στοιχείου

στο έτερο, και ένα όριο διαλυτότητας, το οποίο παρουσιάζει ταχεία μείωση ως προς τη συγκέντρωση του κύριου στοιχείου κατά τη μείωση τη θερμοκρασίας.



Εικόνα 1.12: Υποθετικό διάγραμμα φάσης κράματος σύστασης C_0 , το οποίο μπορεί να υποβληθεί σε σκλήρυνση με κατακρήμνισεις. [17]

Υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί σκλήρυνσης ενός υλικού, όπως η σκλήρυνση με ελάττωση του μεγέθους των κόκκων, η σκλήρυνση με ενδοτράχυνση ή η σκλήρυνση με δημιουργία στερεού διαλύματος. Η πιο ευρέως διαδεδομένη όμως είναι η σκλήρυνση με κατακρήμνιση λόγω γήρανσης (precipitation hardening ή age hardening), καθώς είναι η μόνη μέθοδος που επιτρέπει στο αλουμίνιο να αναπτύσσει υψηλά επίπεδα σκληρότητας, τα οποία απαιτούνται για τη χρήση του υλικού στην αεροναυπηγική. [7]

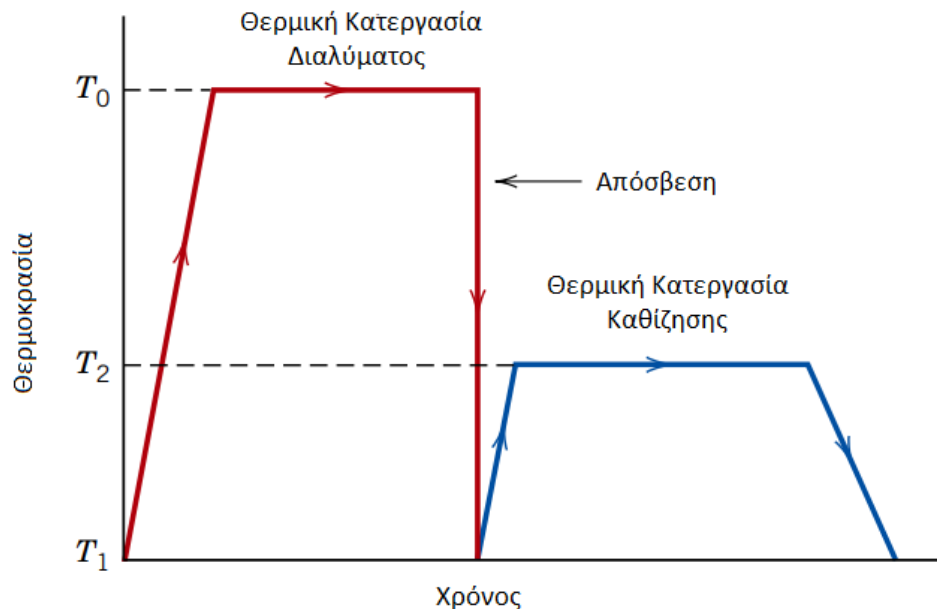
Σκλήρυνση με κατακρήμνιση καλείται η διαδικασία ενίσχυσης ενός μεταλλικού κράματος με ιδιαίτερος μικρά σωματίδια, ομοιόμορφα διασκορπισμένα σε όλο το υλικό, τα οποία υποβάλλονται σε διαδικασία καθίζησης από στερεό διάλυμα σε κατάσταση υπερκορεσμού.

Υπάρχουν τρία (3) στάδια στα οποία διακρίνεται η διαδικασία της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση. Αρχικά, προκύπτει το στάδιο της θερμικής κατεργασίας διαλύματος (solution heat treatment). Αποτελεί την πρώτη από τις δύο (2) συνολικά θερμικές επεξεργασίες στις οποίες πρέπει να υποβληθεί το υλικό με στόχο την επίτευξη της ενίσχυσής του, και κατά την οποία όλα τα άτομα της διαλυμένης ουσίας διαλύονται έτσι ώστε να σχηματιστεί μονοφασικό στερεό διάλυμα. Έστω ότι λαμβάνουμε υπόψιν ένα κράμα σύστασης C_0 , όπως αυτό φαίνεται στην **Εικόνα 1.12**. Στο πρώτο αυτό στάδιο επιβάλλεται στο υλικό θέρμανση σε θερμοκρασίες εντός του πεδίου φάσεως α (T_0) και ακολουθεί αναμονή έως ότου όλη η προϋπάρχουσα φάση β να έχει διαλυθεί.

Έπειτα, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο, το στάδιο της απόσβεσης (quenching), κατά το οποίο πραγματοποιείται ταχεία ψύξη ή φυσική μείωση της θερμοκρασίας του υλικού έως μία τιμή T_1 , η οποία για τη πλειοψηφία των κραμάτων είναι η θερμοκρασία δωματίου, σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε οποιαδήποτε διάχυση και όποιος δυνατός ανασχηματισμός της φάσης β να έχει αποφευχθεί. Στη προκειμένη κατάσταση το κράμα είναι ασθενές και μαλακό, με πολύ χαμηλά ποσοστά ποσότητας διάχυσης, με αποτέλεσμα η μονοφασική αυτή κατάσταση να διατηρείται στη δεδομένη θερμοκρασία για εκτενείς περιόδους.

Τέλος, σημειώνεται το τρίτο και τελευταίο στάδιο, εκείνο της θερμικής κατεργασίας καθίζησης (precipitation heat treatment). Κατά το στάδιο αυτό το υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα θερμαίνεται έως ότου αποκτήσει μια ενδιάμεση θερμοκρασία T_2 εντός της διφασικής περιοχής $\alpha + \beta$, όπου πλέον ο ρυθμός θερμικής διάχυσης είναι πιο έντονος. Η φάση β της καθίζησης αρχίζει να διαμορφώνεται σε σχήμα λεπτών σωματιδίων σύστασης C_β , διασπαρμένα σε όλο το υλικό, διαδικασία η οποία ορίζεται ως επί το πλείστον ως γήρανση. Εφόσον προηγηθεί ο απαραίτητος χρόνος γήρανσης στη θερμοκρασία T_2 , το κράμα ψύχεται μέχρι να αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου, με ρυθμό η τιμή του οποίου δεν επηρεάζει συνήθως τη διαδικασία.

Τα τρία (3) προαναφερθέντα στάδια παρουσιάζονται στο διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου της **Εικόνας 1.13**. Τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων της φάσης β , και κατά συνέπεια η αντοχή αλλά και η σκληρότητα του κράματος, εξαρτώνται άμεσα από τη τιμή της θερμοκρασίας T_2 (θερμοκρασία καθίζησης), αλλά και από το χρόνο έκθεσης του υλικού στη θερμοκρασία αυτή με σκοπό τη τεχνητή γήρανσή του. Πάρα τα όσα προαναφέρθηκαν, μπορεί να επέλθει γήρανση των κραμάτων όταν αυτά εκτεθούν σε θερμοκρασία δωματίου, όμως για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. [17]



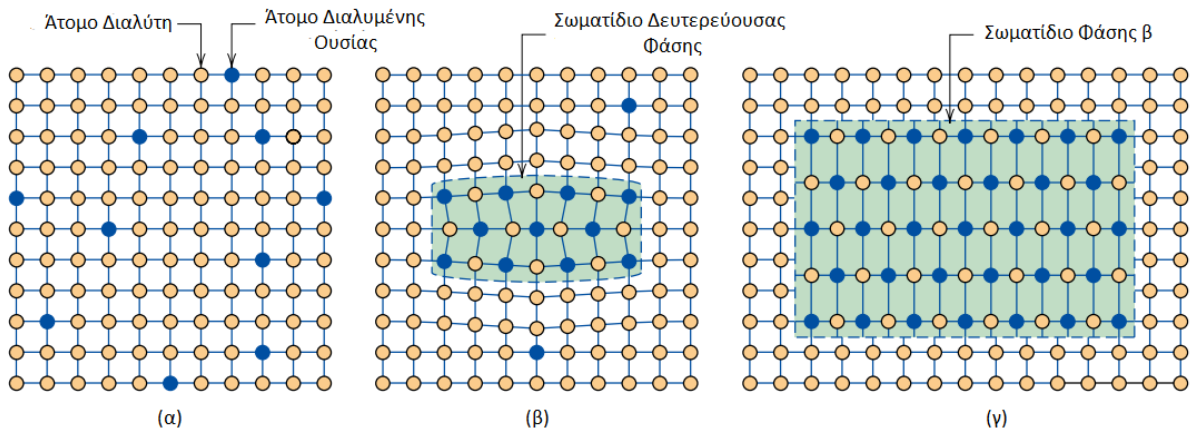
Εικόνα 1.13: Περιγραφή των τριών (3) σταδίων της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου. [17]

1.5 ΙΣΧΥΡΟΠΟΙΗΣΗ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΚΡΥΜΝΙΣΕΩΝ

Ισχυροποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία αυξάνεται η αντοχή των μεταλλικών υλικών μέσω της παρεμπόδισης της ολίσθησης των γραμμοατάξεων στη κρυσταλλική τους δομή, ατέλεια που αποτελεί τη σημαντικότερη για τα μέταλλα. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί ισχυροποίησης, όπως η πλεγματική αντίσταση, η εργοσκληρυνση, η ισχυροποίηση στερεού διαλύματος, η ισχυροποίηση στα σύνορα των κόκκων και, τέλος, η ισχυροποίηση λόγω κατακρημνίσεων.

Η ισχυροποίηση λόγω κατακρημνίσεων ή από καθίζηση αποτελεί μία μέθοδο κατά την οποία το ίζημα που προκύπτει στη δεύτερη φάση, και εμφανίζεται με τη μορφή διασποράς λεπτών σωματιδίων, εμποδίζει την ολίσθηση των γραμμοατάξεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του κράματος. Πιο αναλυτικά, σε ένα κράμα με μικροδομή η οποία αποτελείται από κοκκοειδή μήτρα πρωτεύουσας φάσης, δημιουργείται στο εσωτερικό του διασπορά σωματιδίων μιας δευτερεύουσας φάσης μέσω θερμικής κατεργασίας, δηλαδή τεχνητής γήρανσης του υλικού.

Αν τα κρυσταλλικά πλέγματα των σωματιδίων της δευτερεύουσας φάσης βρίσκονται σε πλήρη συνοχή με τη μήτρα, μία γραμμοαταξία η οποία ολισθαίνει σε κάποιο επίπεδο της μήτρας έχει τη δυνατότητα να συνεχίσει να ολισθαίνει στο εσωτερικό του σωματιδίου. Τα σωματίδια αυτής της κατηγορίας ονομάζονται διαπερατά, ενώ τα σωματίδια δευτερευουσών φάσεων τα οποία δεν υπάγονται σε αυτή τη περίπτωση, δηλαδή δεν βρίσκονται σε πλήρη συνοχή με τη μήτρα, καλούνται μη διαπερατά. Συνεπώς, το είδος των σωματιδίων επηρεάζει άμεσα τον μηχανισμό ισχυροποίησης του υλικού (**Εικόνα 1.14**).

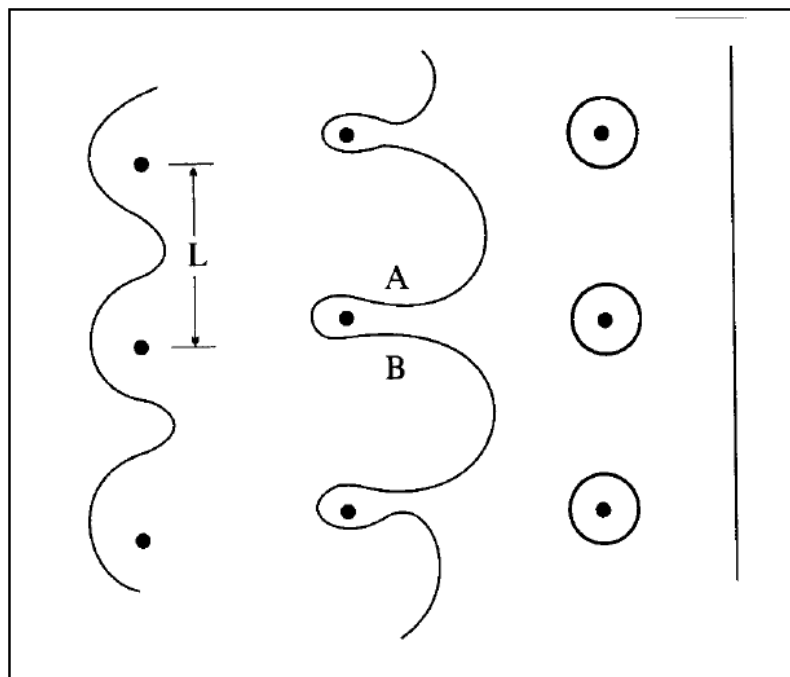


Εικόνα 1.14: Σχηματική απεικόνιση διάφορων σταδίων έως την εμφάνιση σωματιδίων φάσης β, (α) Υπερκορεσμένο διάλυμα φάσης α (β) Παραμόρφωση κρυσταλλικού πλέγματος από σωματίδιο δευτερεύουσας φάσης (γ) Σωματίδιο φάσης β ενδιάμεσα σε μήτρα φάσης α. [17]

Στη περίπτωση των διαπερατών σωματιδίων, αναπτύσσονται γύρω τους τασικά πεδία, τα οποία οφείλονται στις παραμορφώσεις συνοχής, και εμφανίζουν αλληλεπίδραση με τα αντίστοιχα τασικά πεδία των γραμμοατάξεων, με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της ολίσθησής τους. Η εν λόγω ισχυροποίηση ονομάζεται ισχυροποίηση συνοχής.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι για τα διαπερατά σωματίδια καθώς μειώνεται το μέγεθός τους, αυξάνεται η αύξηση της αντοχής τους.

Αντίστοιχα, στη περίπτωση των μη διαπερατών σωματιδίων, η γραμμοαταξία καμπυλώνεται περίξ του κάθε σωματιδίου και ανάμεσα σε διαδοχικά σωματίδια, το οποίο σημαίνει ότι όσο μικρότερη η απόσταση μεταξύ δύο (2) σωματιδίων, τόσο υψηλότερες τάσεις απαιτούνται ώστε η γραμμοαταξία να συνεχίσει να ολισθαίνει. Στην **Εικόνα 1.15** παρουσιάζεται ο μηχανισμός Orowan. Αποτελεί μηχανισμό υπέρβασης των μη διαπερατών σωματιδίων, κατά τον οποίο η γραμμοαταξία συναντά κατά την ολίσθησή της ορισμένα σωματίδια και αρχίζει να καμπυλώνεται έντονα, φαινόμενο το οποίο επιφέρει τελικά αλληλεξουδετέρωση τμημάτων (A και B) της γραμμοαταξίας, λόγω των αντίθετων πρόσημών τους.



Εικόνα 1.15: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού Orowan. [18]

Αντίθετα με τη περίπτωση των διαπερατών σωματιδίων, όταν τα σωματίδια είναι μη διαπερατά η μείωση της αύξησης της αντοχής τους επιφέρεται καθώς μειώνεται το μέγεθός τους. Κατά τις θερμικές κατεργασίες τεχνητής γήρανσης του υλικού, στόχος αποτελεί η επίτευξη του βέλτιστου μεγέθους των σωματιδίων, επιλέγοντας την κατάλληλη χρονική διάρκεια επιβολής της, ώστε να προκύψει η μέγιστη αύξηση της αντοχής του. [18]

1.6 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

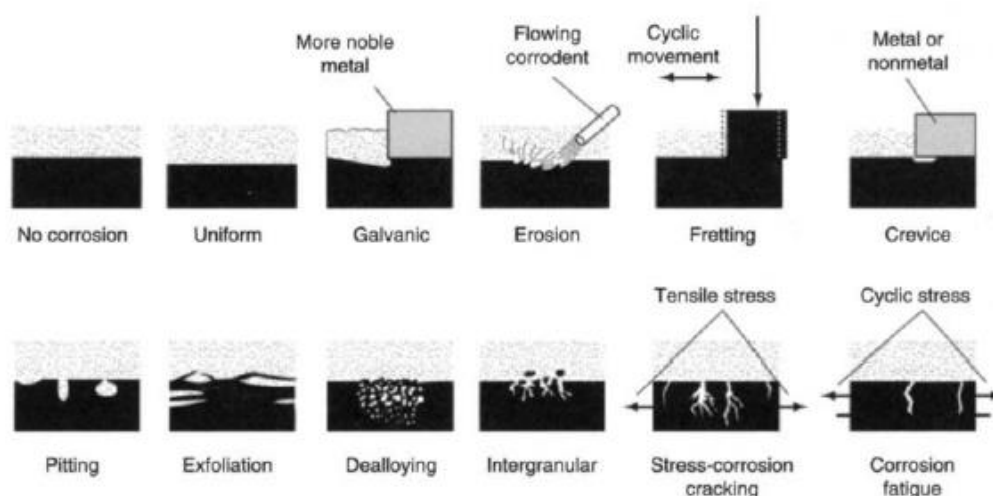
Διάβρωση ενός υλικού ονομάζεται η διαδικασία υποβάθμισης, έως και πλήρους αλλοτρίωσης, των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αυτού, η οποία επέρχεται με την πάροδο του χρόνου έκθεσης σε ένα ορισμένο διαβρωτικό περιβάλλον. Η διάβρωση οφείλεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ

του υλικού, ξεκινώντας από τη επιφάνεια του και οδεύοντας προς τα πιο εσωτερικά του στρώματα, και του περιβάλλοντος στο οποίο είναι εκτεθειμένο. Υπάρχουν δύο (2) βασικά είδη διάβρωσης: η απλή διάβρωση, η οποία προκαλείται μέσω έκθεσης σε υδάτινα περιβάλλοντα, και η οξείδωση, η οποία προκαλείται μέσω έκθεσης σε αέρια περιβάλλοντα.

Υπό ορισμένες συνθήκες, η διάβρωση μπορεί να επιταχυνθεί δραστικά, όπως την υποβολή της εκάστοτε κατασκευής σε φορτία κοπώσεως, την τριβή, τις υψηλές θερμοκρασίες και τα ρεύματα διαφυγής. Η αναγκαιότητα προστασίας και συντήρησης των υλικών για την αποφυγή ή έστω τον περιορισμό της διάβρωσης αποτελεί υψίστης σημασίας, καθώς μόνο από οικονομικής απόψεως, οι επιβαρύνσεις είναι τεράστιες. [12]

Όσον αφορά τη διάβρωση του αλουμινίου και των κραμάτων του, παρουσιάζουν ως επί των πλείστον εξαιρετική αντίσταση, ιδιότητα που τα καθιστά κατάλληλα για χρήσεις που απαιτούν έκθεση στην ατμόσφαιρα, σε γλυκό ή θαλασσίνο νερό, σε διάφορα χημικά και σχεδόν σε όλες τις τροφές, περιβάλλοντα από ήπια έως αρκετά έντονα από διαβρωτικής απόψεως, χωρίς να χρειάζονται συντήρηση για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Λόγω αυτού, επιλέγονται για διαφόρων ειδών εφαρμογές, όπως ηλεκτροφόρα καλώδια, κτήρια, εξοπλισμούς που εκτίθενται σε έντονες καιρικές συνθήκες, πλοία αλλά και μεταφορικά μέσα ξηράς, αγωγούς μεταφοράς υδάτων και αποβλήτων, δεξαμενές και πολλά άλλα.

Μεγάλο μέρος αυτής της καλής του απόδοσης, όπως αυτή περιγράφεται παραπάνω, στις προαναφερθείσες συνθήκες οφείλεται στην προστατευτική μεμβράνη οξειδίου, η οποία χαρακτηρίζει το αλουμίνιο. Λόγω της ιδιότητάς του αυτής, η διάβρωση του αλουμινίου σπανίως είναι γενική, αλλά συνήθως εμφανίζεται τοπικώς, στα αδύναμα σημεία της εκάστοτε κατασκευής. Οι μορφές τις οποίες συναντάμε στην τοπική αυτή διάβρωση είναι οι εξής: διάβρωση οπών (pitting corrosion), διάβρωση ρωγμών (crevice corrosion), φιλόμορφη διάβρωση (filiform corrosion), γαλβανική διάβρωση (galvanic corrosion), διακοκκική διάβρωση (intergranular corrosion) και διάβρωση αποφλοίσωσης (exfoliation corrosion) (Εικόνα 1.16). [19]



Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση των πιο χαρακτηριστικών μορφών διάβρωσης. [20]

1.6.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ (EXCO)

Η διάβρωση αποφλοιώσης (exfoliation corrosion) είναι μία έντονη ενδοκοκκική διάβρωση στη κατεύθυνση έλασης του υλικού, και εμφανίζεται στα όρια των κόκκων, διαμορφώνοντας μια στρώση μετάλλου στην επιφάνειά του η οποία έχει αποκολληθεί από τη βάση του. [6] Η αποφλοιώση αποτελεί μορφή τοπικής διάβρωσης, και εμφανίζεται κυρίως σε κράματα αλουμινίου, τα οποία εκτίθενται σε βιομηχανικά ή θαλάσσια περιβάλλοντα. [20]

Η διαβρωτική διαδικασία αρχικά παρουσιάζεται ως πλευρική ενδοκοκκική διάβρωση στα όρια των υπόγειων κόκκων, παράλληλα της μεταλλικής επιφάνειας. [6] Τα προϊόντα που προκύπτουν από τη διαβρωτική αυτή διαδικασία τα οποία εμφανίζονται στα άκρα των κόκκων απομακρύνουν το μέταλλο από το βασικό υλικό, γεγονός το οποίο επιφέρει την εμφάνιση διαβρωμένων στρώσεων σε μορφή λωρίδας ή νιφάδας στην μεταλλική επιφάνεια. [20] Επιπρόσθετα, υπάρχει τμήμα του προϊόντος της διάβρωσης το οποίο από τη δημιουργία του βρίσκεται παγιδευμένο στις κάτω στρώσεις της μεταλλικής επιφάνειας, και το οποίο έχει μεγαλύτερο όγκο από αυτόν του μητρικού μετάλλου. Έτσι, ο αυξημένος εσωτερικός όγκος διαχωρίζει εξαναγκαστικά τις ανώτερες στρώσεις, με αποτέλεσμα «λωρίδες» μετάλλου να αποφλοιώνονται από την επιφάνεια του υλικού.

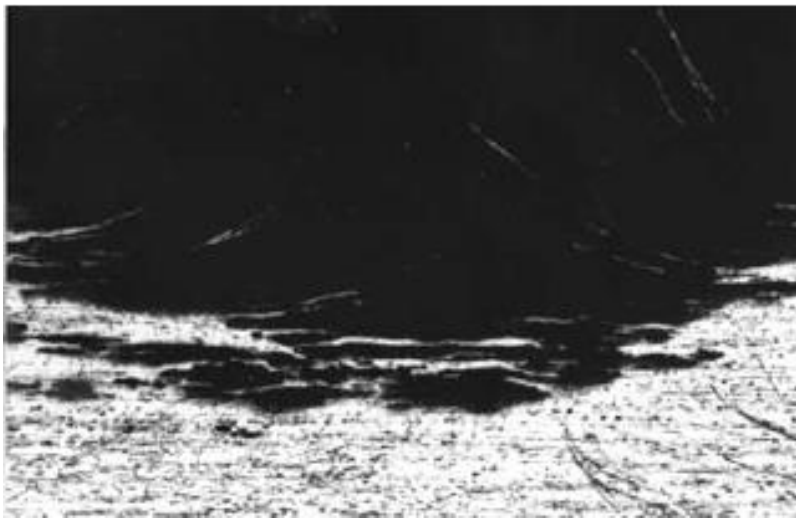
Βασικά χαρακτηριστικά της αποφλοιώσης είναι τα λεπτά στρώματα σχεδόν μη διαβρωμένου μετάλλου στην επιφάνεια, τα οποία διαδέχονται προς το εσωτερικό του υλικού παχύτερα στρώματα από το προϊόν της διάβρωσης, το οποίο είναι περισσότερο ογκώδες από το αρχικό μέταλλο. Λόγω των διαβρωμένων αυτών στρωμάτων προκαλείται γενικότερη διόγκωση του υλικού. Εξαιτίας της απομάκρυνσης των ανώτερων στρώσεων, όπως προαναφέρθηκε, έρχονται στην επιφάνεια του μετάλλου τμήματα κατώτερων στρωμάτων, τα οποία δεν έχουν υποστεί διάβρωση ακόμη, αλλά αποτελούν νέες, μη διαβρωμένες επιφάνειες, για να υποστούν τη διαβρωτική διαδικασία.

Η αποφλοιώση, ως φαινόμενο, εμφανίζεται κυρίως σε υλικά με επιμήκης δομές κόκκων και η έντασή της παρουσιάζει μία ελαφριά αύξηση σε πιο όξυνα περιβάλλοντα. Σε περιπτώσεις ήπιας διάβρωσης, η αποφλοιώση έχει μορφή κυψελών και τα προϊόντα τα οποία παράγει η διάβρωση εμφανίζονται διογκωμένα στο κέντρο αυτών των κυψελών. Επίσης, πολλές φορές η αποφλοιώση αναπτύσσεται μέσω της διάτρησης (pitting).

Ένα σπάνιο φαινόμενο, το οποίο μπορεί να παρατηρηθεί σε κράματα αλουμινίου με πρόσμιξη χαλκού (όπως αυτά της σειράς 2xxx), η διάβρωση αποφλοιώσης εμφανίζεται ως μία μορφή διάβρωσης τάσης, όπου η τάση είτε προϋπάρχει εγγενώς στο μεταλλικό υλικό, είτε δημιουργείται λόγω πίεσης που ασκείται στο υλικό από την διόγκωση του διαβρωμένου προϊόντος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο συγκεκριμένα όταν υπόκειται σε διάβρωση αποφλοιώσης υλικό με ινώδη δομή και δύναται να εμφανιστεί σε ποικίλα περιβάλλοντα, ακόμη και σε ορισμένα που κατηγοριοποιούνται ως ήπιως διαβρωτικά. Εάν εφαρμοστεί κατάλληλη προσαρμογή στη περιεκτικότητα της πρόσμιξης του χαλκού και υποβληθούν σε ορισμένη τεχνητή γήρανση, τα κράματα

αλουμινίου – χαλκού με υψηλή αντοχή μπορούν να αψηφήσουν αυτό το φαινόμενο (Εικόνα 1.17).

Τα κράματα Αλουμινίου – Χαλκού – Μαγνησίου (σειρά 2xxx) τα οποία επιδέχονται θερμικές επεξεργασίες, η αποφλοίωση περιορίζεται σε λεπτά τμήματα των κραμάτων, έντομα επεξεργασμένα και με επιμήκη δομή κόκκων. Συνήθως, η επιφάνεια προβάλλει σχετική αντίσταση στην αποφλοίωση, η οποία οφείλεται στη κρυσταλλική δομή που σχηματίζουν οι κόκκοι, ενώ κάτω από αυτούς στην επιφάνεια, όπου οι κόκκοι είναι μη κρυσταλλωμένοι, το υλικό φαίνεται να είναι πιο ευάλωτο. Επίσης, για τα κράματα Αλουμινίου – Χαλκού – Μαγνησίου της σειράς 2xxx, παρατηρείται ότι όταν έχουν υποστεί τεχνητή γήρανση (καταστάσεις T6 ή T8), προβάλλουν μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση αποφλοίωσης. [6]



Εικόνα 1.17: Απεικόνιση των αποσυντεθειμένων στρωμάτων κράματος αλουμινίου (AA7004) κατόπιν έκθεσης σε διάβρωση αποφλοίωσης. [6]

1.7 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΓΝΩΣΗ– ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.7.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΡΑΜΑΤΟΣ 2198

Για την κατάλληλη επιλογή της τιμής του μέτρου ελαστικότητας (E) του κράματος Αλουμινίου – Χαλκού – Λιθίου 2198, το οποίο και μελετήθηκε πειραματικά στη παρούσα διπλωματική εργασία, ερευνήθηκαν οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν σε άλλες έρευνες σχετικές με την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του συγκεκριμένου υλικού σε διάφορες καταστάσεις. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

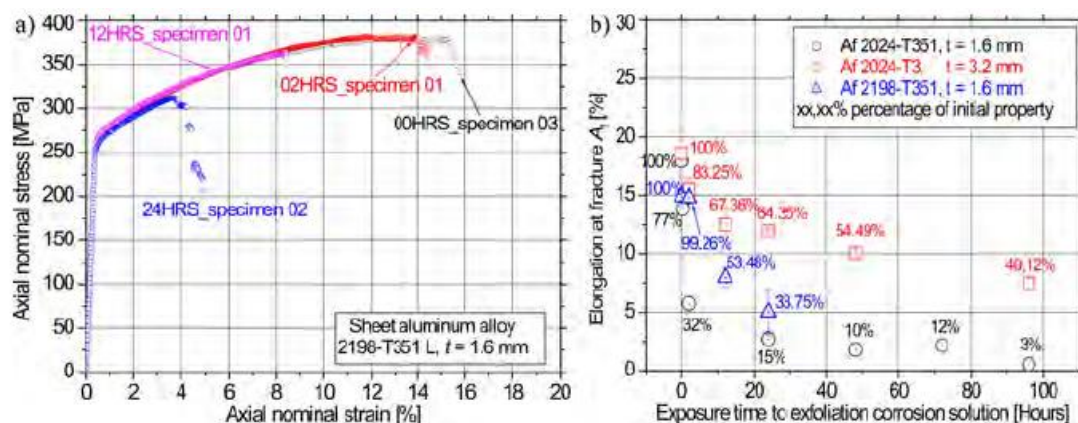
Ορισμένοι χρησιμοποίησαν στις έρευνές τους τιμές κατά προσέγγιση, στις οποίες πιθανώς κατέληξαν μέσω σχετικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, οι οποίες ισχύουν για το υλικό όταν αυτό έχει υποστεί μόνο φυσική γήρανση σε θερμοκρασίες δωματίου, δηλαδή κατά μέσο όρο 25 °C (κατάσταση T3), κυμαίνονται στα 73-78 GPa. [21,22] Όσον αφορά τις περιπτώσεις που το υλικό είχε υποστεί θερμική κατεργασία για τη εκπόνηση της μελέτης (καταστάσεις όπως T8 και T851) οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται να είναι ελάχιστα μειωμένες, 69-73 GPa. [23-28]

Επιπρόσθετα, υπήρξαν μελέτες για τις οποίες προκειμένου να λάβουν την ακριβή τιμή του μέτρου ελαστικότητας, διεξήγαγαν τις κατάλληλες δοκιμές, με αποτέλεσμα να προκύψουν πειραματικές τιμές του μεγέθους αυτού. Ο Alexandre Amorim Canvalho διεξήγαγε πειράματα εφελκυσμού σε δοκίμια κράματος αλουμινίου 2198 κατεργασμένο σε διευθύνσεις L και T, σε καταστάσεις T3 και T8. Έλαβε τις εξής τιμές: για τη κατεύθυνση έλασης L, σε κατάσταση T3 73.753 GPa και σε κατάσταση T8 72.570 GPa, και για την κατεύθυνση έλασης T, σε κατάσταση T3 73.821 GPa και σε κατάσταση T8 74.110 GPa. [29] Οι Stanley D. et al. μελέτησαν το υλικό σε κατάσταση T8 σε τρεις διαφορετικές φορές έλασης: την L, στην οποία υπολόγισε τη τιμή του μέτρου ελαστικότητας να ανέρχεται στα 75.2 GPa, στη T, στην οποία ανέρχεται στα 75.7 GPa και, τέλος, σε φορά κατά γωνία 45°, όπου η τιμή ανήλθε στα 72.6 GPa. [30]

Οι Velatti C et al. μελέτησαν πειραματικά το κράμα 2198 σε κατάσταση T3, και αποφάνθηκαν ότι το μέτρο ελαστικότητάς του λαμβάνει τη τιμή 72.4 GPa, λαμβάνονταν υπόψιν ένα τυπικό σφάλμα (standard deviation) της τάξης του 1.4. [31] Τέλος, οι Cavaliere P. et al. μελέτησαν το 2198 σε δύο διαφορετικές φορές έλασης, L και T, για τις οποίες υπολόγισαν την τιμή του μέτρου 76.7 GPa και 74.3 GPa αντίστοιχα. [32]

1.7.2 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΓΝΩΣΗ

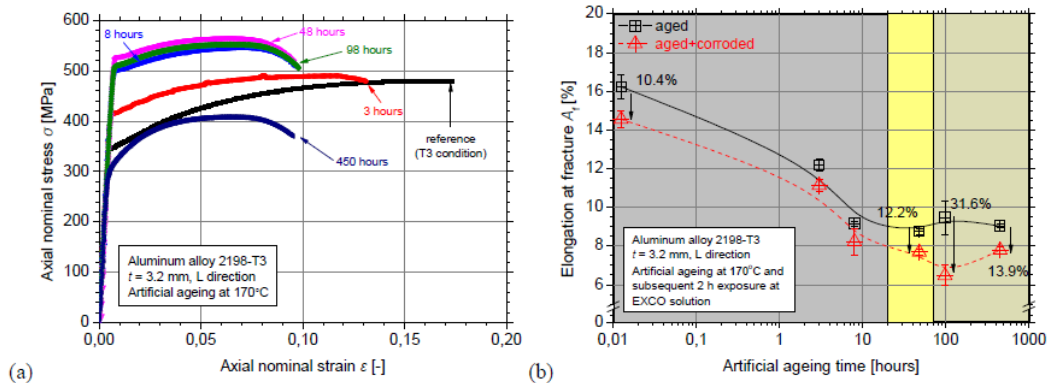
Οι Z. Velonaki et. al χρησιμοποίησαν δείγματα εφελκυσμού από φύλλο κράματος αλουμινίου 2198-T351, τα οποία εκτέθηκαν σε εργαστηριακή διάβρωση αποφλοιώσης (EXCO) για 2, 12 και 24 ώρες, και έπειτα υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν είναι πως για 2 ώρες έκθεσης το AA2198 διατηρεί σχεδόν πλήρως την ολκιμότητά του, για 12 σημειώνει πτώση στο μισό της αρχικής του ολκιμότητας και, τέλος, για 24 ώρες διατηρεί κατά προσέγγιση το 1/3 αυτής. Στην ερευνητική διαδικασία αυτή δεν έγινε χρήση κάποιας τιμής του μέτρου ελαστικότητας (E) του υλικού. [33]



Εικόνα 1.18: a) Τοπική καμπύλη εφελκυσμού του AA2198 για διάφορους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση αποφλοιώσης. b) Η επιμήκυνση θραύσης λόγω εφελκυσμού συνάρτησε τον χρόνο έκθεσης στη διάβρωση αποφλοιώσης για τα κράματα 2198 και 2024. [33]

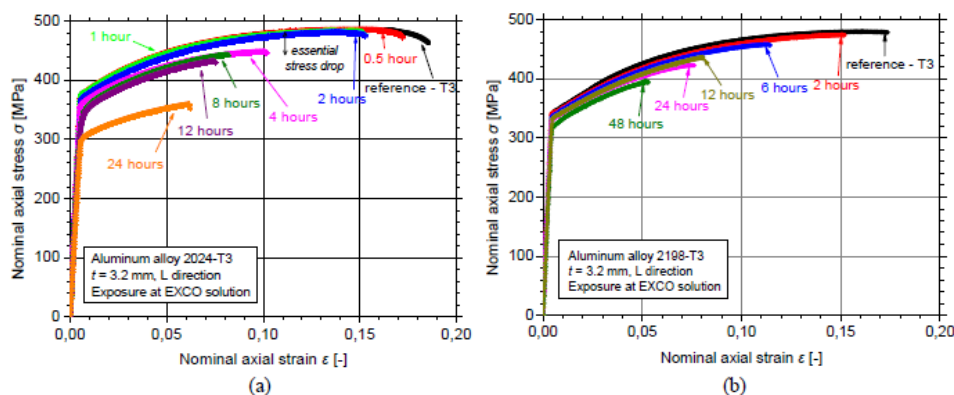
Οι N. D. Alexopoulos et. al χρησιμοποίησαν δοκίμια τα οποία κόπηκαν από φύλλα κράματος αλουμινίου 2198 σε καταστάσεις T351 και T381, στα οποία διεξήχθησαν

δοκιμές εφελκυσμού και κοπώσεως με συχνότητα 10 Hz, Συμπέραναν ότι το όριο αντοχής είναι 8% χαμηλότερο από την τάση διαρροής του. Όσον αφορά τη τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E) μελετήθηκε πειραματικά, αλλά και βιβλιογραφικά. Από τη διεξαγωγή πειραμάτων συμπέραναν ότι η τιμή του μέτρου ανέρχεται στα 75.461 GPa όταν το υλικό βρίσκεται και κατάσταση T351, με τυπικό σφάλμα (St.D.) 1.767, ενώ όταν το υλικό βρίσκεται σε κατάσταση T851, η αντίστοιχη τιμή υπολογίστηκε να είναι 72.803 GPa, με τυπικό σφάλμα 1.826. Επίσης, από βιβλιογραφική ανασκόπηση, έκαναν χρήση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας του κράματος αλουμινίου 2198 όπως αυτή μελετήθηκε από τους Staglich et. al (73 GPa) και Cavaliere et. al (76.7 GPa). [34]

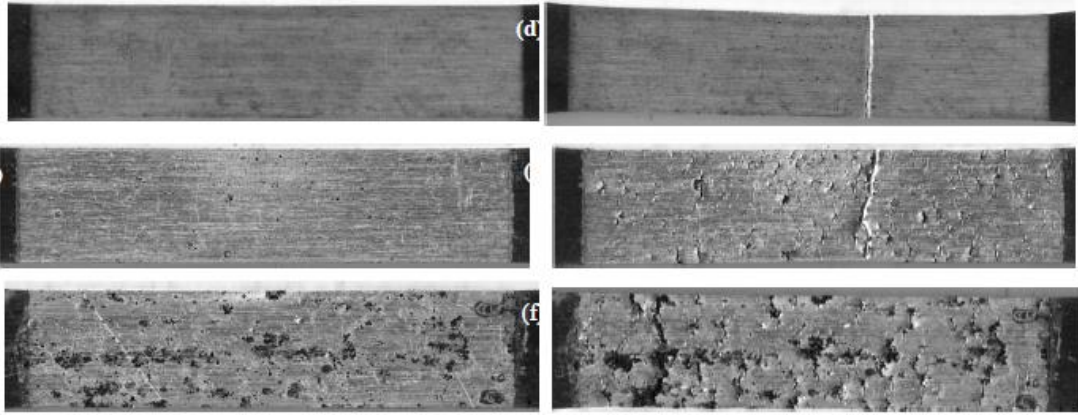


Εικόνα 1.19: (a) Τυπική καμπύλη εφελκυσμού του AA2198 για διάφορους χρόνους υποβολής σε θερμική κατεργασία στους 170 °C. (b) Η επιμήκυνση θραύσης λόγω εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου υποβολής θερμικής κατεργασίας με και διάβρωση αποφλοίωσης για 2 ώρες. [34]

Οι N. D. Alexopoulos et. al έλαβαν δοκίμια εφελκυσμού AA2198-T3 κατεργασμένα κατά μήκος της L κατεύθυνσης, τα οποία εκτέθηκαν σε εργαστηριακή διάβρωση EXCO για 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 και 24 ώρες και έπειτα υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού, και σε πανομοιότυπα δοκίμια ακολούθησαν την ίδια διαδικασία και για το κράμα αλουμινίου 2024-T3. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά του AA2024, συμπέραναν ότι το AA2198 διατηρεί μεγαλύτερο ποσοστό των μηχανικών του ιδιοτήτων ως προς τον εφελκυσμό, και επομένως παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Στην παρούσα μελέτη δεν έγινε χρήση κάποιας τιμής του μέτρου ελαστικότητας του υλικού. [35]

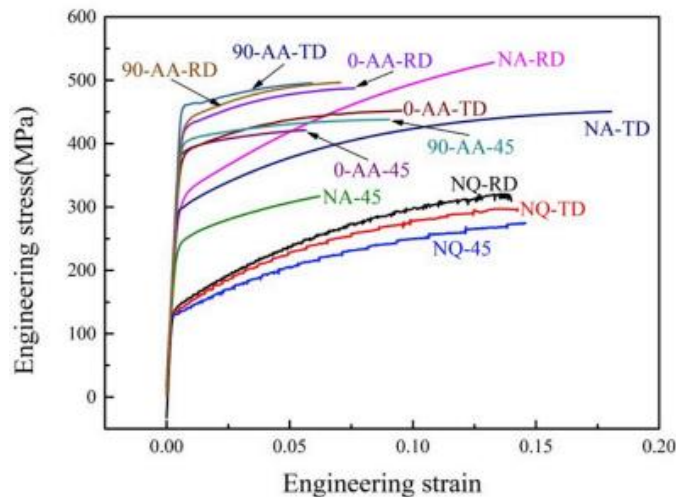


Εικόνα 1.20: Οι πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού των κράματων αλουμινίου (a) 2024 και (b) 2198 για διάφορους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση αποφλοίωσης. [35]



Εικόνα 1.21: Η επιφάνεια των δοκιμίων εφελκυσμού για διάφορους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση αποφλοίωσης (a) 2 ώρες (b) 24 ώρες (c) 48 ώρες, και (d) έως (f) αντίστοιχα, έπειτα από τις δοκιμές εφελκυσμού. [35]

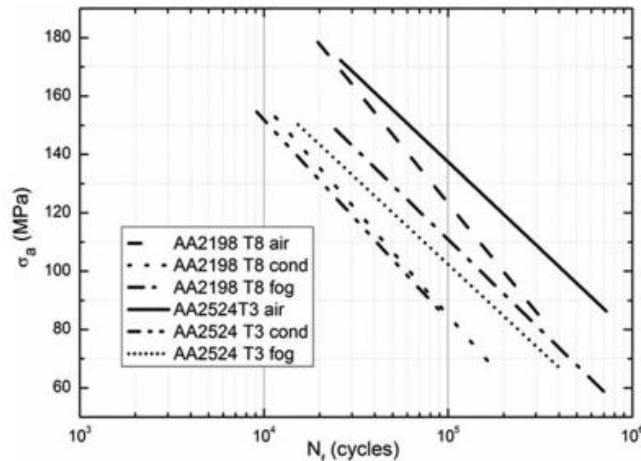
Οι Z. Tian-Zhang et. al χρησιμοποίησαν δείγματα εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2198-T8 κατεργασμένα κατά μήκος της L, T και 45° κατεύθυνσης, τα οποία εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 510 °C για 1.5 ώρα, έπειτα ορισμένα αφέθηκαν σε φυσική γήρανση για 7 ημέρες σε θερμοκρασία δωματίου και μερικά εξ αυτών υποβλήθηκαν σε τεχνητή γήρανση στους 155 °C για 15 ώρες. Τέλος, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού ως προς τις κατευθύνσεις L, T και 45°. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ανισοτροπία του υλικού δεν αλλάζει στα δύο (2) πρώτα στάδια της θερμικής κατεργασίας, αλλάζει όμως μετά την τεχνητή γήρανση, ενώ ποικίλει αναλόγως με τη κατεύθυνση της αρχικής κατεργασίας των δοκιμίων. Στην ερευνητική διαδικασία αυτή δεν έγινε χρήση κάποιας τιμής του μέτρου ελαστικότητας του υλικού. [36]



Εικόνα 1.22: Τυπικές καμπύλες εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2198 για διαφορετικούς χρόνους θερμικής κατεργασίας υπό διαφορετικές κατευθύνσεις έλασης. [36]

Οι Gamboni O. C et. al., χρησιμοποίησαν δοκίμια κραμάτων αλουμινίου 2198 σε κατάσταση T851 και 2524 σε κατάσταση T3, τα οποία υπέβαλαν σε δοκιμές εφελκυσμού, ορισμένα στον ατμοσφαιρικό αέρα, άλλα σε αλατόνερο και άλλα αφού πρώτα είχαν εκτεθεί σε αλατόνερο για 15 ημέρες στους 35 °C. Εν συνεχεία, ορισμένα ακόμα δοκίμια AA2198-T851 και AA2524-T3 υποβλήθηκαν σε δοκιμές κοπώσεως

στον αέρα και σε αλατόνερο με συχνότητα 30 Hz. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα όλων των προαναφερθέντων περιπτώσεων, συμπεράναν ότι το AA2524-T3 παρουσίασε ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή στη κόπωση στον αέρα από ότι το AA2198-T851, ενώ το AA2198-T851 παρουσίασε περισσότερη αντοχή σε οξείδωση και συνεπώς ανώτερη αντοχή κοπώσεως υπό διάβρωση σε σχέση με το AA2524-T3. Στην ερευνητική διαδικασία αυτή δεν έγινε χρήση κάποιας τιμής του μέτρου ελαστικότητας του υλικού. [37]

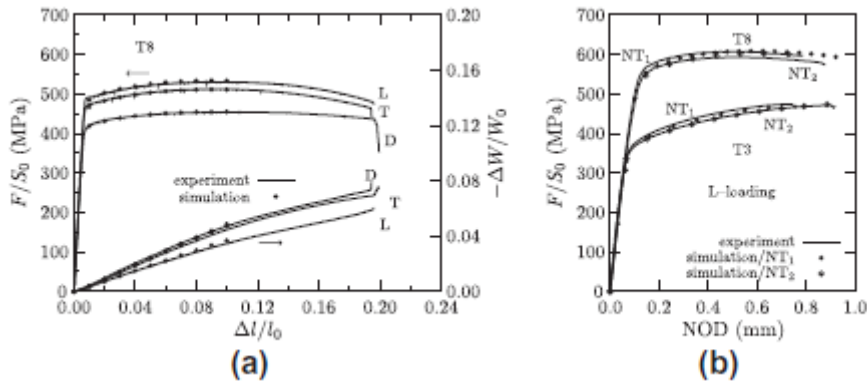


Εικόνα 1.23: Σύγκριση των καμπυλών σ - N για τα κράματα αλουμινίου 2198-T8 και 2524-T3 σε διαφορετικά περιβάλλοντα. [37]

Οι D. Steglich et. al επέλεξαν να λάβουν δοκίμια AA2198 κατεργασμένα στη φορά L και άλλα στη φορά T, τα οποία υπέβαλαν σε δοκιμές δυσθραυστότητας. Οι δοκιμές ανέδειξαν δύο (2) διαφορετικά στάδια θραύσης, σύμφωνα με τη μετατόπιση φορτίου: ένα αρχικό στάδιο επέκτασης των πλαστικών ρωγμών και έπειτα ένα πιο έντονο το οποίο προκαλεί απότομη πτώση του φορτίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, η πτώση αυτή είναι πιο έντονη για τα δοκίμια τα οποία καταπονήθηκαν κατά τη κατεύθυνση L με επέκταση ρωγμών στην T από ότι για τα φορτία κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Όπως προαναφέρθηκε, καθώς χρησιμοποιήθηκε από άλλη πειραματική μελέτη που παρουσιάστηκε παραπάνω, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα έρευνα ήταν 73 GPa. [38]

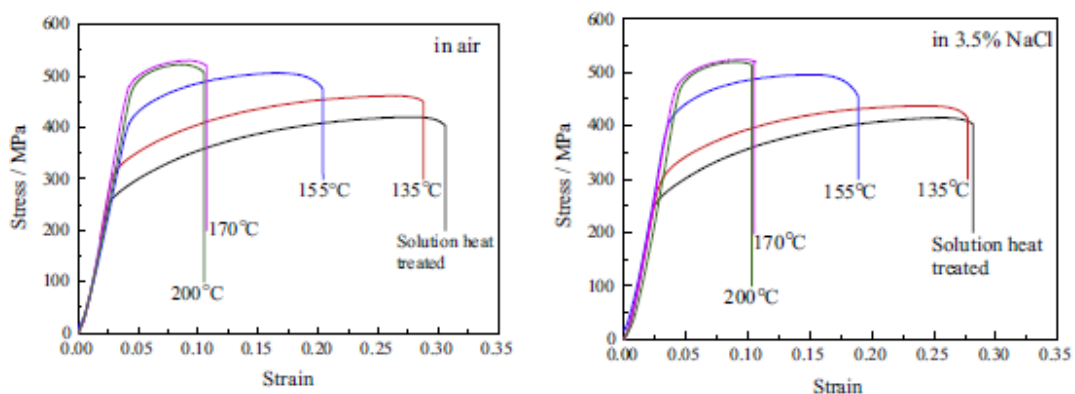
Οι J.A. Moreto et. al υπέβαλαν δοκίμια AA2198 σε κατάσταση T851 και AA2524 σε κατάσταση T3 σε δοκιμές εφελκυσμού για την εύρεση ορισμένων μηχανικών τους ιδιοτήτων. Επιπλέον, άλλα δοκίμια υπέστησαν διάβρωση με αλατόνερο η οποία πραγματοποιήθηκε κοντά στην άκρη όπου αναμενόταν να εμφανιστεί η ρωγμή και υποβλήθηκαν σε δοκιμές κοπώσεως. Κατέληξαν στο συμπέρασμα το AA2198 εμφάνισε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το AA2524, ενώ η διάβρωση στο αλατόνερο προωθεί τη διάδοση της ρωγμής κατά τη κόπωση και για τα δύο κράματα. Στην παρούσα έρευνα έγινε επίσης μελέτη του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, πειραματική και βιβλιογραφική. Από το πειραματικό μέρος της έρευνας αποφάνθηκαν ότι η τιμή του είναι προσεγγιστικά 70 GPa με τυπικό σφάλμα 1,2, ενώ από τη βιβλιογραφική μελέτη κατέληξαν ότι η τιμή αυτή ανέρχεται στα 74 GPa. [25]

Οι J. Chen et. al για την έρευνά τους χρησιμοποίησαν δοκίμια εφελκυσμού AA2198 σε καταστάσεις T3 και T8 καταπονήθηκαν εφελκυστικά κατά τις κατευθύνσεις L, T και D. Αποφάνθηκαν ότι η πλαστική συμπεριφορά του AA2198 εξίσου και στις δύο (2) καταστάσεις είναι έντονα ανισοτροπική. Τέλος, όσον αφορά την τιμή του μέτρου ελαστικότητας, αποφάνθηκαν ότι αυτή ανέρχεται στα 74 GPa, και για τις δύο καταστάσεις του υλικού στις οποίες χρησιμοποιήθηκε. [39]



Εικόνα 1.24: Σύγκριση καμπυλών των πειραματικών αποτελεσμάτων (γραμμές) και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης (κουκίδες) για (a) δοκιμές εφελκυσμού (b) δοκίμια NT. [39]

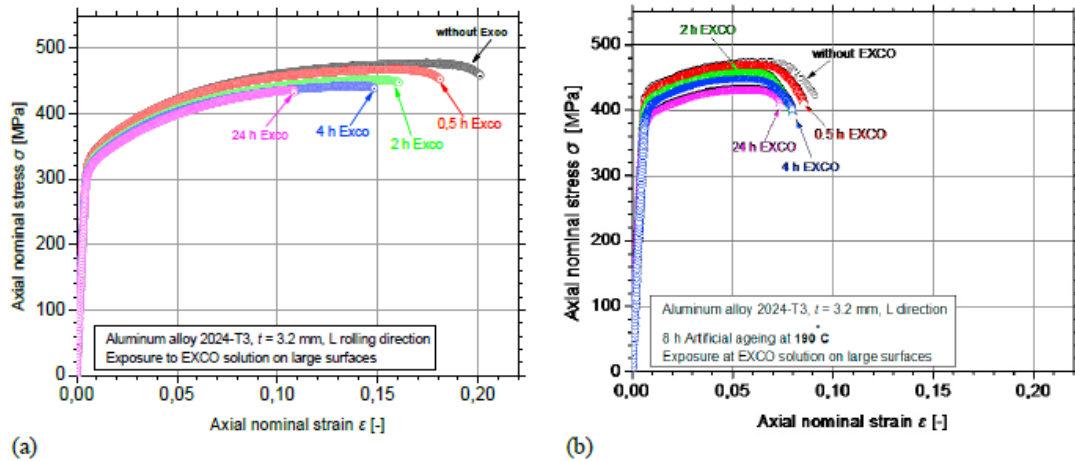
Οι X. Wang et. al υπέβαλαν δοκίμια κράματος αλουμινίου 2195 σε θερμική κατεργασία στους 515 °C για 30 λεπτά και στη συνέχεια σε επεξεργασίες τεχνητής γήρανσης στους 135, 155, 170 και 200 °C για 14 ώρες. Έπειτα πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια αυτά δοκιμές εφελκυσμού σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα και σε περιβάλλον αλατόνευρο. Συμπέραναν ότι η αντοχή σε εφελκυσμό του AA2195 είναι αρχικά υψηλή και στη συνέχεια μειώθηκε, αλλά η δυνατότητα επιμήκυνσής του και η ανθεκτικότητα μειώνεται με τη αύξηση θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται με σκοπό την επίτευξη της τεχνητής γήρανσης. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η αντοχή του υλικού στη διάβρωση. [40]



Εικόνα 1.25: Τυπικές καμπύλες εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2195 για πέντε (5) διαφορετικές θερμοκρασίες (a) στον ατμοσφαιρικό αέρα (b) σε 3.5% NaCl. [40]

Οι N. Siskou et. al χρησιμοποίησαν δοκίμια εφελκυσμού από φύλλα κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου 2024 σε κατάσταση T3, τα όποια υποβλήθηκαν αρχικά ορισμένα σε τεχνητή γήρανση στους 190 °C για 8 ώρες και έπειτα το σύνολό τους σε διάβρωση αποφλοιώσης (EXCO) για 0.5, 2, 4 και 24 ώρες. Τέλος, υποβλήθηκαν σε

δοκιμές εφελκυσμού. Μέσω της πειραματικής αυτής διαδικασίας, αποφάνθησαν ότι η διάβρωση προκαλεί μεγαλύτερη μείωση της αντοχής του AA2024 σε εφελκυσμό όταν έχει προηγηθεί της διαβρωτικής διαδικασίας και η τεχνητή γήρανση. [41]



Εικόνα 1.26: Τυπικές πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού στο AA2024 για διάφορες ώρες έκθεσης σε διάβρωση αποφλοιώσης (a) σε κατάσταση T3 (b) σε κατάσταση μέγιστης γήρανσης. [41]

1.8 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Από τις βιβλιογραφικές αναφορές της προηγούμενης παραγράφου, παρατηρείται ότι το κράμα αλουμινίου 2198-T3 μελετάται κυρίως ως προς τις μηχανικές ιδιότητες σε διάφορες καταστάσεις γήρανσης και σε συνδυασμό με διάβρωση αποφλοιώσης που προκύπτουν από πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού. Συνεπώς, αποτελεί σίγουρα υψίστης σημασίας να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες στις ίδιες αυτές περιπτώσεις όταν το μέταλλο υποβάλλεται σε πειραματικές δοκιμές δυσθραυστότητας. Επίσης, καθώς το υλικό είναι ανισότροπο, σημαντικό είναι να μελετηθούν όλες οι φορές υποβολής φόρτισης σε σχέση με τη φορά έλασής του, με την παρούσα μελέτη να αναλαμβάνει την κάθετη περίπτωση.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ο σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιαστεί η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε με σκοπό την προσκόμιση αποτελεσμάτων για ορισμένες μηχανικές ιδιότητες και τη μηχανική συμπεριφορά υπό τη συγκεκριμένη καταπόνηση (δοκιμές δυσθραυτότητας) του κράματος αλουμινίου AA2198 πριν και έπειτα από διάφορες θερμικές (τεχνητή γήρανση) και διαβρωτικές (διάβρωση αποφλοιώσης) κατεργασίες και συνδυασμό αυτών.

2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

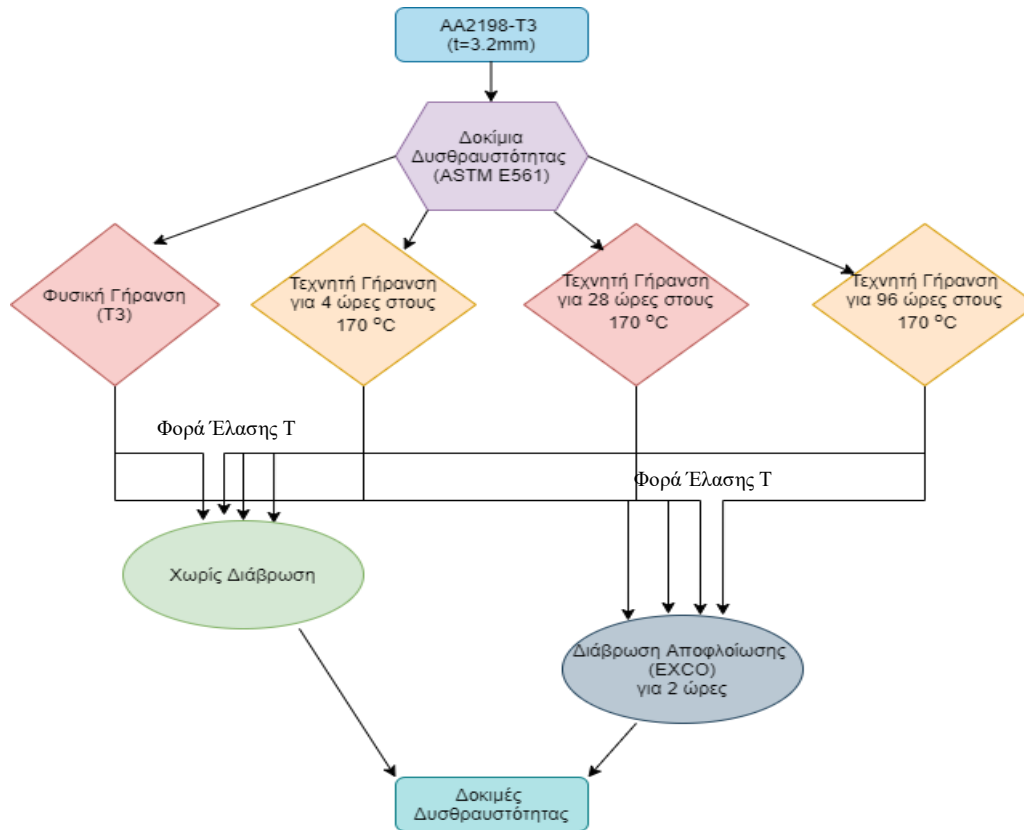
Αρχικά, έλαβε χώρα κοπή, καθαρισμός και λείανση των δοκιμίων δυσθραυστότητας από ελάσματα αλουμινίου 2198 υπό δύο διαφορετικές κατευθύνσεις κοπής: σύμφωνα με τη φορά έλασης (L) και αντίθετα με τη φορά έλασης (T), σύμφωνα με τις κατάλληλες προκαθορισμένες προδιαγραφές. Έπειτα τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε τεχνητή γήρανσή μέσω θερμικής κατεργασίας για τρεις διαφορετικούς χρόνους.

Πίνακας 2.1: Σύσταση (βάρους %) των συστατικών του κράματος 2198, εκτός του αλουμινίου. [33]

Υλικό	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Li	Zn	Zr	Ag
AA2198	0.08	0.01	2.9-3.5	0.5	0.25-0.8	0.8-1.1	0.35	0.04-0.18	0.1-0.5

Στη συνέχεια, πριν την υποβολή τους στην πειραματική διαδικασία, τα δοκίμια και των τριών κατηγοριών χωρίστηκαν περαιτέρω σε εκείνα τα οποία υποβλήθηκαν μερικώς σε διάβρωση αποφλοιώσης, με προστατευτικό υλικό να καλύπτει ορισμένα τμήματα της επιφάνειας του κάθε δοκιμίου, και σε εκείνα τα οποία δεν υποβλήθηκαν στη διαβρωτική διαδικασία.

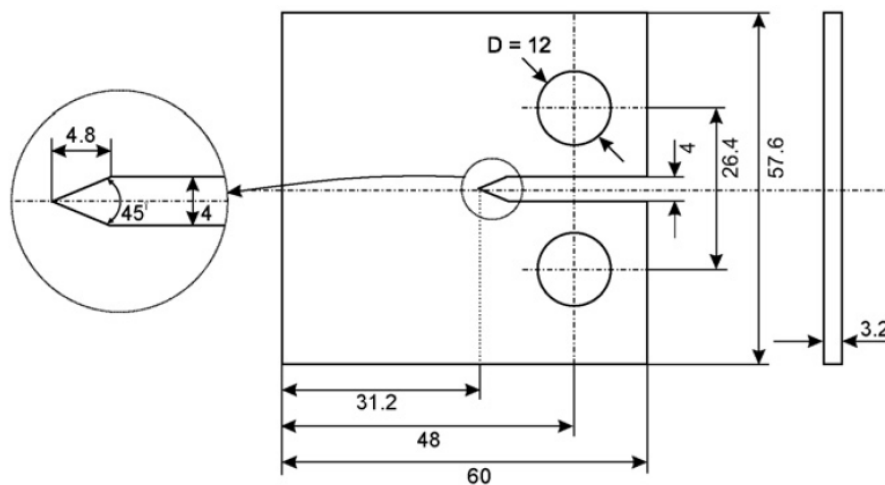
Τέλος, όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν στην επιλεγθείσα πειραματική διαδικασία της δυσθραυτότητας, η οποία διεξήχθη εξ' ολοκλήρου στο Εργαστήριο του Κτηρίου Αντοχής Υλικών του Τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), και καταγράφηκαν τα κατάλληλα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν ώστε να διεξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα για τη μηχανική συμπεριφορά του προκειμένου κράματος αλουμινίου συγκριτικά στις διάφορες προαναφερθείσες καταστάσεις (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Λογικό Διάγραμμα Ροής της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Συνολικά στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 16 δοκίμια δυσθραυστότητας, όλα με κοπή κάθετα στη φορά έλασης του υλικού (T), 8 από τα οποία μόνο κατεργάστηκαν θερμικά με στόχο την τεχνητή τους γήρανση ενώ τα υπόλοιπα 8 μετά τη θερμική τους κατεργασία υποβλήθηκαν και σε διάβρωση αποφλοιώσης. Τα δοκίμια δυσθραυστότητας και οι διαστάσεις τους φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2.2):



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση των δοκιμών δυσθραυστότητας με τις διαστάσεις τους (mm). [46]

2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Από τα 16 συνολικά δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πειραματική έρευνα, 4 χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς, επομένως δεν υπέστησαν καμία θερμική κατεργασία (T3). Τα υπόλοιπα 12 δοκίμια κατεργάστηκαν σε φούρνο Thermawatt TGT 50, με μέγιστη θερμική χωρητικότητα 1200 °C, για τρεις (3) διαφορετικές χρονικές περιόδους, 4 ώρες για τη κατάσταση προ-γήρανσης (under ageing - UA), 28 ώρες για τη κατάσταση μέγιστης γήρανσης (peak ageing - PA), και, τέλος, 96 ώρες για τη κατάσταση υπερ-γήρανσης (over ageing - OA) ανά 4 δοκίμια, σε θερμοκρασία 170 °C. Τα δύο (2) εκ των τεσσάρων δοκιμίων της κάθε κατηγορίας υποβλήθηκαν στις προαναφερθείσες καταστάσεις σε πειραματικές δοκιμές στη συνέχεια (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2: Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία

Θερμική Κατεργασία στους 170 °C	Χρόνος έκθεσης στη Θερμική Κατεργασία			
	Χωρίς	4 ώρες	28 ώρες	96 ώρες
	2	2	2	2

2.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗΣ (EXFOLIATION CORROSION)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, 8 εκ των συνολικά 16 δοκιμίων δυσθραυστότητας υποβλήθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον, και συγκεκριμένα αυτό της διάβρωσης αποφλοιώσης (EXCO), προκειμένου να επιτευχθεί με τεχνητή μέθοδο η φυσική διάβρωση που θα υποστεί το υλικό σε μακροχρόνια έκθεση στο φυσικό περιβάλλον και να μελετηθεί η διαφορά στις μηχανικές του ιδιότητες σε αυτή τη περίπτωση. Από τα 8 αυτά δοκίμια, δύο (2) αποτελούν δοκίμια αναφοράς χωρίς θερμική κατεργασία, δύο (2) δοκίμια που έχουν προηγουμένως υποστεί θερμική κατεργασία για 4 ώρες, δύο (2) για 28 ώρες και τέλος δύο (2) για 96 ώρες. Αναλυτικότερα φαίνονται οι πληροφορίες αυτές στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3):

Πίνακας 2.3: Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία και έπειτα σε διάβρωση αποφλοιώσης

Θερμική Κατεργασία στους 170 °C + EXCO για 2 ώρες	Χρόνος έκθεσης στη Θερμική Κατεργασία			
	Χωρίς	4 ώρες	28 ώρες	96 ώρες
	2	2	2	2

Τα έξι (6) συνολικά δοκίμια υποβλήθηκαν στην εξής διαβρωτική διαδικασία: σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G34 [45] η ποσότητα του διαβρωτικού υγρού το οποίο χρειάζεται για να διαβρωθεί ένα στοιχειώδες εμβαδόν του κράματος αλουμινίου είναι 20 mL/cm². Για τη δημιουργία του διαλύματος χρησιμοποιείται η εξής αναλογία επιμέρους ουσιών:

σε 1 λίτρο (L) απιονισμένου νερού αναμειγνύουμε 234 gr χλωριούχου νατρίου (NaCl), 50 gr νιτρικού καλίου (KNO₃) και 6.3 mL νιτρικού οξέος (HNO₃).

Τμήμα του κάθε δοκιμίου προστατεύτηκε από μονωτικό υλικό προκρίμενου να μην υποβληθεί στη διαβρωτική διαδικασία. Συμφωνά με τις αντίστοιχες διαστάσεις, το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας το οποίο διαβρώθηκε για κάθε δοκίμιο είναι 4.88 cm² για τη μία πλευρά του, δηλαδή το διπλάσιο και για τις δύο που τελικώς διαβρώθηκαν (9,76 cm²). Δεδομένου ότι τοποθετήθηκαν δύο (2) δοκίμια ανά διαβρωτικό διάλυμα, το διάλυμα που τελικά δημιουργήθηκε τρεις (3) φορές προκειμένου να διαβρωθούν τα έξι (6) αυτά δοκίμια είχε την εξής αναλογία: σε 390.4 mL απιονισμένου νερού διαλύθηκαν 91.3536 gr χλωριούχου νατρίου (NaCl), 19.52 gr νιτρικού καλίου (KNO₃) και 2.5 mL νιτρικού οξέος (KNO₃). Τα δοκίμια βυθίστηκαν εξ ολοκλήρου στο διάλυμα, χωρίς να έρχονται όμως σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου το οποίο περιείχε το εν λόγω διάλυμα, για δυο (2) ώρες. Έπειτα αφαιρέθηκε το μονωτικό υλικό από τις επιφάνειες στις οποίες είχε τοποθετηθεί, τα δοκίμια καθαρίστηκαν με νερό και τοποθετήθηκαν σε καταψύκτη ώστε να μην αλλοιωθεί η διαβρωμένη τους επιφάνεια (**Εικόνα 2.3**).



Εικόνες 2.3: Ένα δοκίμιο δυσθραυστότητας το οποίο έχει υποστεί διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) κατά την πειραματική του δοκιμή

2.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Οι δοκιμές δυσθραυστότητας πραγματοποιήθηκαν, όπως προαναφέρθηκε, στο Εργαστήριο του Κτηρίου Αντοχής Υλικών του Τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων σύμφωνα με τη προδιαγραφή ASTM E561 [46] χρησιμοποιήθηκε η γενικών δοκιμών μηχανή Instron 8801 μέγιστου στατικού φορτίου 100 kN, καθώς και κατάλληλοι μηχανισμοί αντι-λυγισμού με σκοπό την αποφυγή μη αντιπροσωπευτικών καταπονήσεων και κατ' επέκταση μη ορθών αποτελεσμάτων (Εικόνες 2.4 και 2.5). Για τη λήψη των αντίστοιχων μετρήσεων στο πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή SAX χρησιμοποιήθηκε το επιμηκυστόμετρο Instron 2570-114. Οι μετρήσεις οι οποίες λήφθηκαν και έπειτα επεξεργαστήκαν καταλλήλως αφορούν την μετατόπιση των χειλών της εξωτερικής εγκοπής των δοκιμίων (Crack Opening Displacement). Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο (2) στάδια τα οποία είναι τα ακόλουθα:



Εικόνες 2.4 και 2.5: Η πειραματική μηχανή Instron 8801 και η διάταξη κατά την εκπόνηση ενός πειράματος

1. Στάδιο προ-ρηγμάτωσης

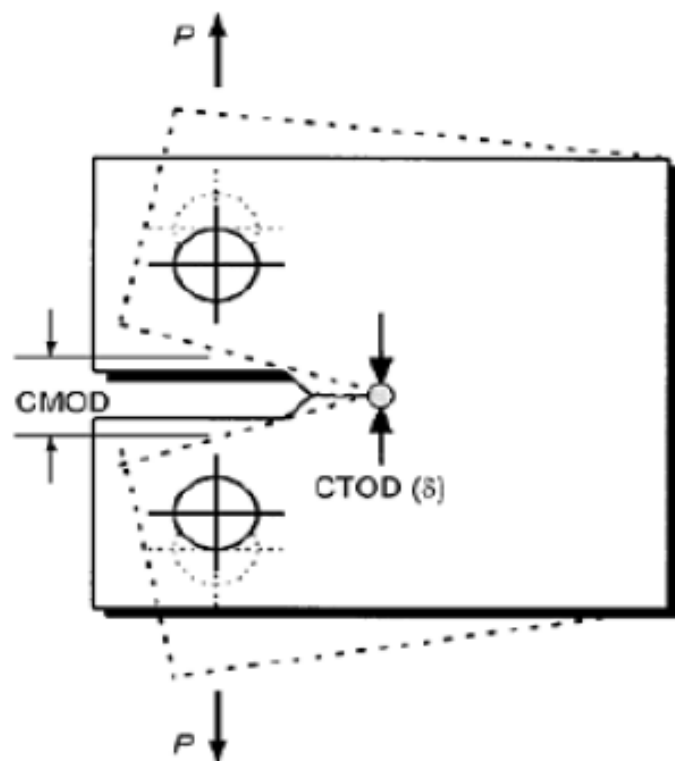
Αρχικά, κατά τη τοποθέτηση του δοκιμίου στη μηχανή για τη εκπόνηση της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκε ευθυγράμμιση των αρπάγων της με σκοπό την αποφυγή στρεπτικών καταπονήσεων. Έπειτα το κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε κόπωση με σταθερό εύρος φόρτισης (εύρος δύναμης 0.1 kN). Με την υποβολή του εκάστοτε δοκιμίου στη προαναφερθείσα διαδικασία επιτυγχάνεται η δημιουργία μίας τεχνητής ρωγμής ανάμεσα στις εγκοπές του, της οποίας, σύμφωνα με τη προδιαγραφή, το θεμιτό μήκος απαιτείται να κυμαίνεται από 1.3 mm έως 2.0 mm. Η μελέτη της πορείας της φυσικής ρωγμής έως το επιθυμητό αυτό μήκος έγινε με τη βοήθεια

κατάλληλου μεγεθυντικού φακού καθώς και τοπικό φωτισμό. Όταν επιτευχθεί το μήκος αυτό σταματάει η διαδικασία της κόπωσης.

Η διακύμανση των κοπωτικών φορτίων δεν πρέπει να είναι υψηλή διότι κάτι τέτοιο επιφέρει μεγάλη πλαστικές παραμορφώσεις ενδιάμεσα στις εγκοπές των δοκιμίων, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να είναι λανθασμένες. Με τη βοήθεια του προγράμματος SAX σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή του εργαστηρίου, έγινε η καταγραφή των αντίστοιχων μετρήσεων.

2. Στάδιο ψευδο-στατικής φόρτισης

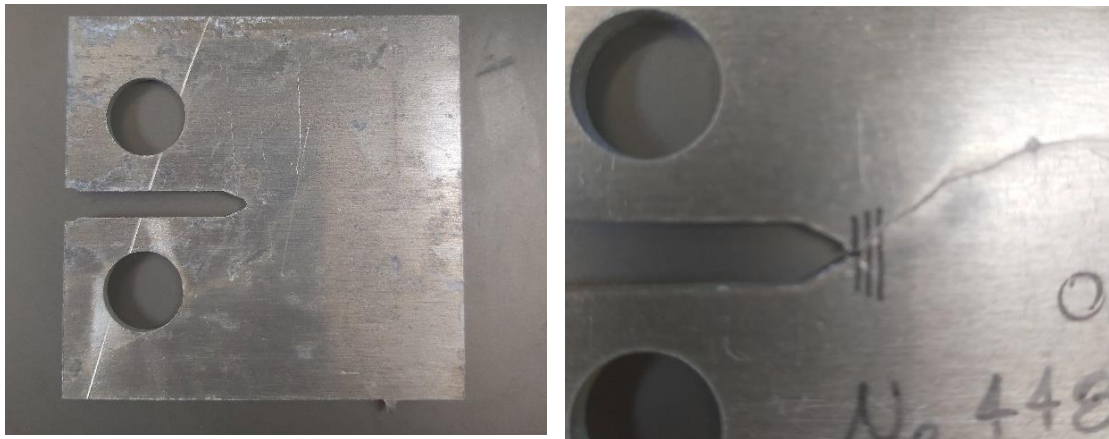
Αρχικά προσαρτιέται στο δοκίμιο, το οποίο παραμένει τοποθετημένο στη μηχανή από την προηγούμενη πειραματική διαδικασία (κόπωση), το επιμηκυνσιόμετρο COD (Crack Opening Displacement) ή CMOD (Crack Mouth Opening Displacement). Έπειτα, σύμφωνα με τη προδιαγραφή ASTM E561, το δοκίμιο υποβάλλεται σε εφελκυσμό με σταθερό και μικρό ρυθμό μετατόπισης της άνω αρπάγης της μηχανής, συγκεκριμένα 0.01 mm/min (Εικόνα 2.6). Συντόμως, η φυσική ρωγμή η οποία δημιουργήθηκε κατά το προηγούμενο πειραματικό στάδιο γίνεται ορατή και με το γυμνό μάτι.



Εικόνα 2.6: Δοκίμιο το οποίο δείχνει τον ορισμό του ανοίγματος της ρωγμής-μετατόπισης (Crack mouth opening displacement-CMOD) και το Crack-tip opening displacement (CTOD), το οποίο αποτελεί τη διάμετρο του κυκλικού τόξου στο άκρο της ρωγμής, που δε πρέπει να συγχέεται με την πλαστική ζώνη. [46]

Παράλληλα, επίσης μέσω του προγράμματος SAX, πραγματοποιείται καταγραφή της δύναμης την οποία ασκεί η μηχανή στο δοκίμιο συναρτήσει της ένδειξης του επιμηκυνσιόμετρου (COD). Μέσω της καμπύλης των δύο παραπάνω μετρήσεων

κατασκευάζεται η καμπύλη αντίστασης στη θραύση K_R του υλικού. Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τη κατασκευή της καμπύλης αυτής ονομάζεται μέθοδος της ενδοτικότητας (compliance method). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι καμπύλες έντασης τάσεων K του υλικού για διαφορετικές τιμές εξωτερικών φορτίων P . Κρίσιμο εξωτερικό φορτίο αποτελεί εκείνο για το οποίο η υπολογισμένη καμπύλη του συντελεστή έντασης τάσεων K εφάπτεται της καμπύλης αντίστασης στη θραύση του υλικού (K_R). Με βάση αυτό το σημείο, στο οποίο πραγματοποιείται ασταθής διάδοση της ρωγμής, αποτιμάται ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων K_{cr} για το δεδομένο πάχος υλικού (Εικόνες 2.7 και 2.8).



Εικόνες 2.7 και 2.8: Ένα δοκίμιο δυσθραυστότητας πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας.

Για την προσέγγιση του παραπάνω συντελεστή πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, σύμφωνα με τη προδιαγραφή ASTM E561. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Αρχικά υπολογίστηκε το πηλίκο C :

$$C = \frac{V}{P} \quad (1)$$

όπου V είναι το άνοιγμα των χειλών του δοκιμίου και P είναι το αξονικό φορτίο που επιβάλλεται στο δοκίμιο.

Στην συνέχεια υπολογίζεται το γινόμενο EBC :

$$EBC = E \cdot B \cdot C \quad (2)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του συγκεκριμένου υλικού, το οποίο έχει υπολογιστεί από δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια που έχουν υποστεί την ίδια τεχνητή γήρανση ή και διάβρωση αποφλοιώσης και B είναι το πάχος των δοκιμίων, που στην προκειμένη περίπτωση ήταν σταθερό, στα 3.2 mm.

Έπειτα υπολογίζεται το πηλίκο U :

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{E \cdot B \cdot C}} \quad (3)$$

Στη συνέχεια, γίνεται χρήση του υπολογισμένου U καθώς και των σταθερών $c_{0,1,2,3,4,5}$ για δοκίμιο με πλευρική εγκοπή τύπου C(T) στα χείλη της εγκοπής στο V_0 , οι οποίες δίνονται από το παρακάτω πολυώνυμο που περιέχεται στην προδιαγραφή ASTM E561. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα υπολογίζονται οι φαινομενικές τιμές μήκους ρωγμής προς μήκος δοκιμίου a/w ως:

$$\frac{a}{w} = c_0 + c_1 \cdot U + c_2 U^2 + c_3 U^3 + c_4 U^4 + c_5 U^5 \quad (4)$$

όπου a το μήκος ρωγμής πλαστικής ζώνης το οποίο μετριέται από την γραμμή φόρτωσης και w το ειδικό μήκος φόρτισης του δοκιμίου που μετριέται από την γραμμή φόρτισης. Εν κατακλείδι, οι τιμές για την συγκεκριμένη φόρτιση/μέτρηση που επιλέχθηκε είναι οι ακόλουθες: $c_0 = 1.0010$, $c_1 = -4.6695$, $c_2 = 18.460$, $c_3 = -236.82$, $c_4 = 1214.9$ και $c_5 = -2143.6$ (Εικόνα 2.9).

$$a/W = C_0 + C_1(U) + C_2(U)^2 + C_3(U)^3 + C_4(U)^4 + C_5(U)^5$$

$$U = 1/[[(EBW/P)^{1/2} + 1]$$

	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C(T) at V_1	+1.0008	-4.4473	+15.400	-180.55	+870.92	-1411.3
C(T) at V_0	+1.0010	-4.6695	+18.460	-236.82	+1214.9	-2143.6

Εικόνα 2.9: Οι τιμές των $C_{0,1,2,3,4,5}$ σύμφωνα με τη προδιαγραφή ASTM E561

Έπειτα υπολογίζεται το πολυώνυμο συσχέτισης μήκος ρωγμής με ειδικό μήκος:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \left[\left(2 + \frac{a}{w}\right) / \left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}\right] \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \left(\frac{a}{w}\right) - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^4\right] \quad (8)$$

Με την χρήση του $f(a/w)$ πραγματοποιείται ο υπολογισμός της συνάρτησης του συντελεστή έντασης τάσεων για διάφορα μήκη ενεργών ρωγμών:

$$K_R = \left(\frac{P}{B} \cdot W\right) \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (9)$$

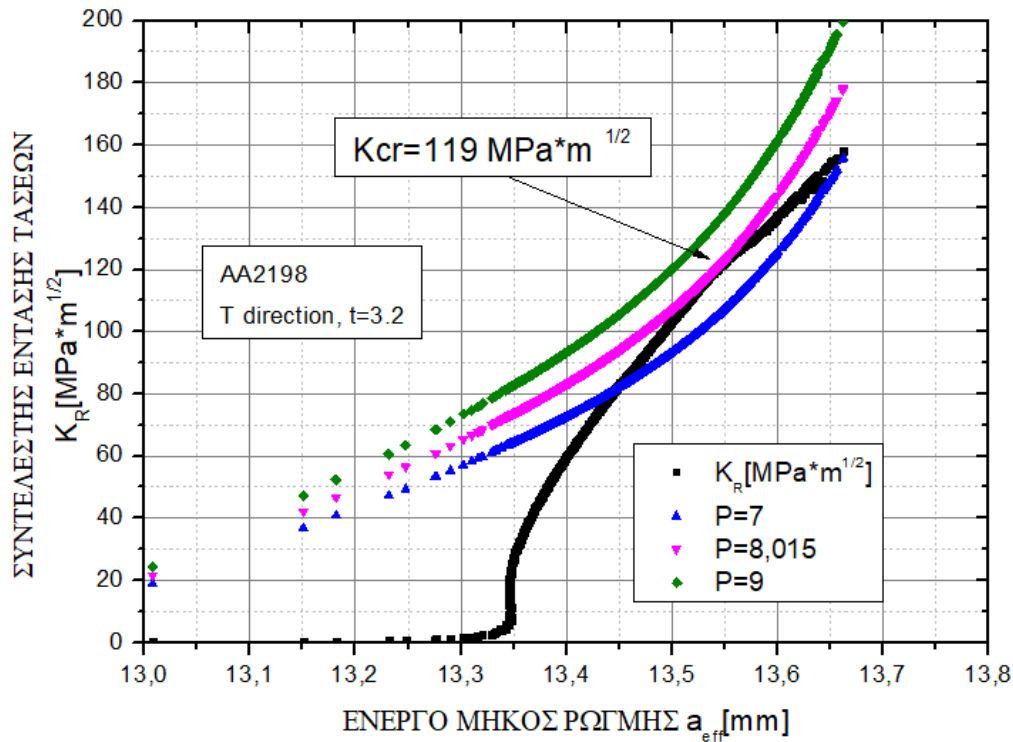
Στη συνέχεια υπολογίζεται το μήκος της πλαστικής ζώνης r_y συναρτήσει του ορίου διαρροής R_p , το οποίο ισοδυναμεί με:

$$r_y = \frac{1}{2} \pi \cdot \left(\frac{K_R}{R_p}\right)^2 \quad (10)$$

Τέλος, χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζεται το ενεργό μήκος ρωγμής a_{eff} συναρτήσει του αρχικού μήκους ρωγμής και της φαινομενικής τιμής αύξησης της ρωγμής, διορθωμένη με το μήκος της πλαστικής ζώνης μπροστά από την άκρη της ρωγμής:

$$a_{eff} = a_0 + f\left(\frac{a}{w}\right) + r_y \quad (11)$$

Έχοντας ως δεδομένα τα ζεύγη τιμών K_R και a_{eff} , κατασκευάζεται η καμπύλη αντίστασης που παρουσιάζεται γραφικά για κάθε δοκίμιο δυσθραυστότητας. Έπειτα, υπολογίζεται η αναλυτική, θεωρητική λύση του συντελεστή έντασης τάσεων για το συγκεκριμένο μήκος ρωγμής και για διάφορα αξονικά φορτία. Στην συνέχεια, θεωρώντας σημείο αναφοράς την μέγιστη τιμή αξονικού φορτίου που επιβλήθηκε στο δοκίμιο, P_{max} , και μειώνοντας σταδιακά την τιμή του στον τύπο, υπολογίζεται εκείνη η καμπύλη που εφάπτεται της πειραματικής καμπύλης. Σύμφωνα με τη προδιαγραφή, σε αυτό το σημείο τομής πραγματοποιείται η ασταθής διάδοση της ρωγμής, η οποία και χρησιμοποιείται για την αποτίμηση του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων K_{cr} για το συγκεκριμένο υλικό και με τις συγκεκριμένες γεωμετρικές διαστάσεις που διαθέτει το κάθε δοκίμιο. Η διαδικασία που περιγράφεται, λοιπόν, αποτελεί μία γραφική μέθοδο υπολογισμού του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων K_{cr} του υλικού (Εικόνα 2.10). [42-44]



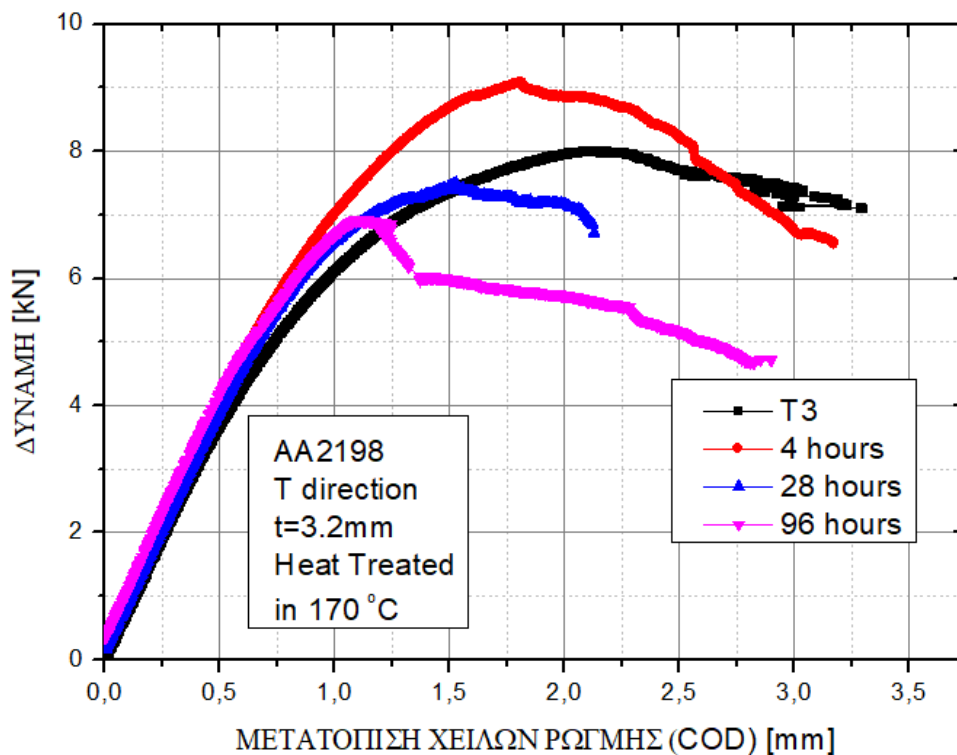
Εικόνα 2.10: Τυπική καμπύλη υπολογισμού του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων K_{cr}

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΘΡΑΥΣΗ

3.1.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

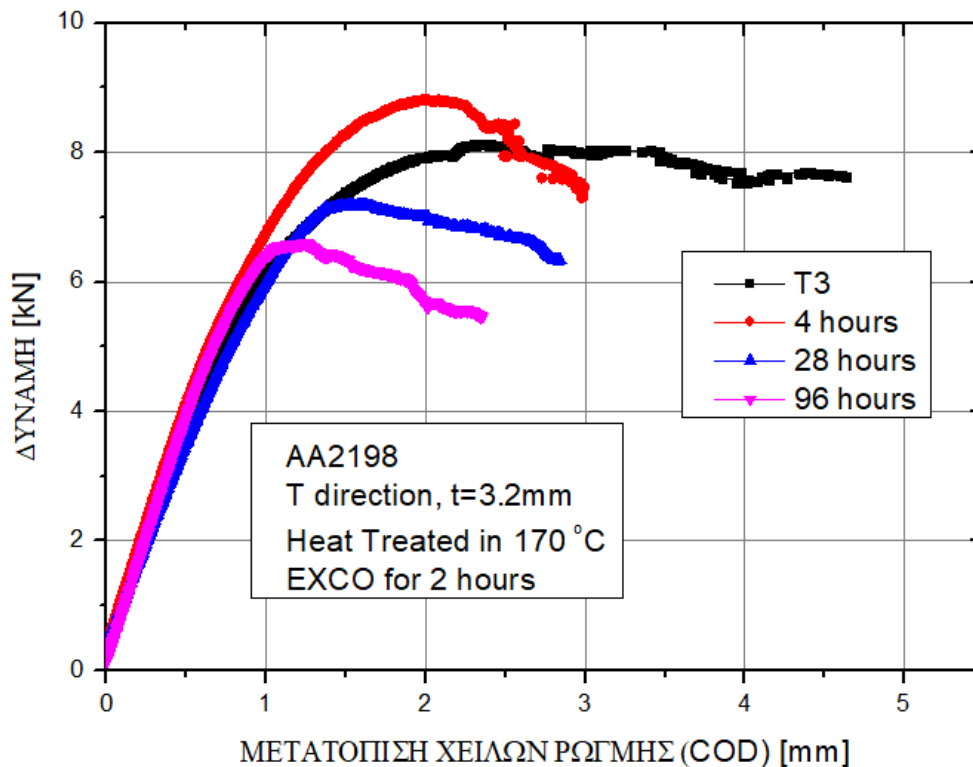
Μέσω των μετρήσεων που λάβαμε από κάθε πειραματική δοκιμή δυσθραυστότητας αλλά και τις επεξεργασίες αυτών όπως περιεγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο κατασκευάστηκαν οι καμπύλες αναλαμβανόμενης δύναμης (Load) – μετατόπισης του ανοίγματος των χειλών της ρωγμής (Crack Opening Displacement – COD) της πλευρικής εγκοπής του κάθε δοκιμίου. Αρχικά, όσων αφορά τα δοκίμια τα οποία δεν υποβλήθηκαν σε διαβρωτική διαδικασία: Μελετώντας τη καμπύλη η οποία προέκυψε από το δοκίμιο αναφοράς κράματος 2198-T3 παρατηρείται ότι η μέγιστη δύναμη την οποία ανέλαβε ανέρχεται στα 8 kN και με αντίστοιχη μετατόπιση χειλών 2.1 mm. Στο δοκίμιο του ίδιου κράματος με έκθεση σε τεχνητή γήρανση μέσω θερμικής κατεργασίας για 4 ώρες η αντίστοιχη καμπύλη φαίνεται να αναλαμβάνει περισσότερη δύναμη, με μέτρο 9 kN, ενώ αντίθετα η μετατόπιση των χειλών που της αντιστοιχεί να μειώνεται, με μέτρο 1.8 mm. Προχωρώντας στο δοκίμιο του κράματος που υποβλήθηκε στην ίδια θερμική κατεργασία για 28 ώρες παρατηρείται πτώση σε σχέση και με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, τόσο στην δύναμη, η οποία έλαβε μέγιστη τιμή τα 7.4 kN, όσο και στη μετατόπιση των χειλών, η οποία ανήλθε στα 1.5 mm. Τέλος, το δοκίμιο που υποβλήθηκε σε τεχνητή γήρανση για 96 ώρες παρουσίασε τις μικρότερες μέγιστες τιμές σε αναλαμβανόμενη δύναμη και μετατόπιση χειλών, 6.9 kN και 1.1 mm αντίστοιχα (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Τυπικές καμπύλες δύναμης– μετατόπισης των χειλών της ρωγμής για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης 170 °C για το κράμα αλουμινίου 2198.

3.1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΕΧΝΗΤΗ ΓΗΡΑΝΣΗ

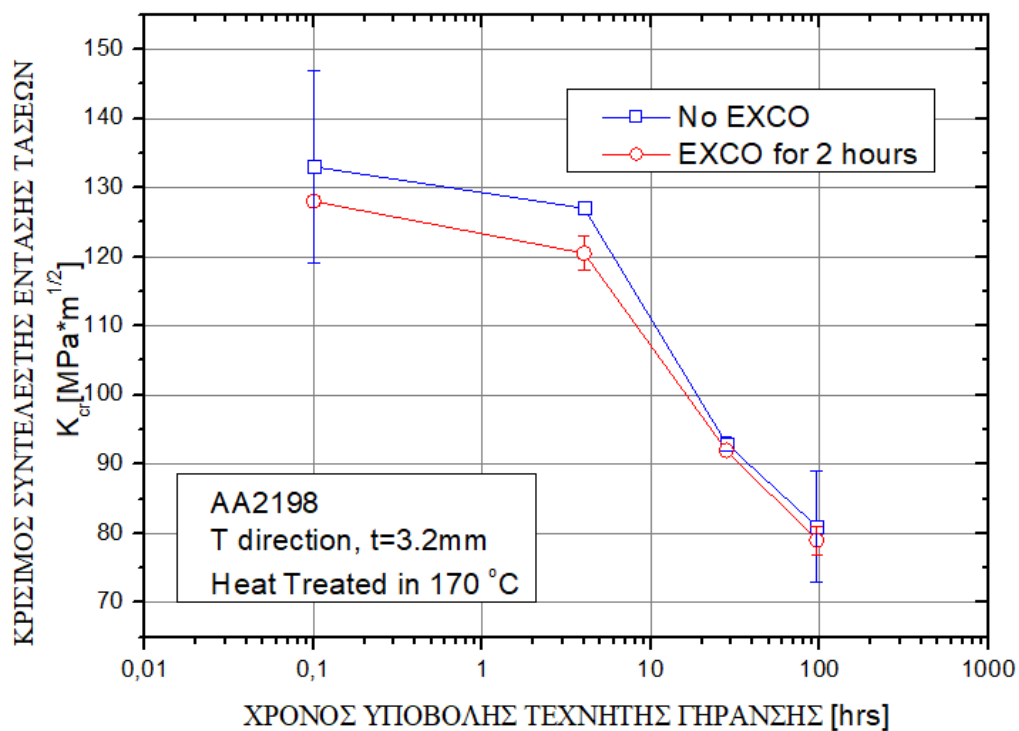
Έπειτα, η αντίστοιχη σύγκριση γίνεται και για τα δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν στη διαβρωτική διαδικασία, όπως αυτή περιεγράφηκε στις δύο προηγούμενες παραγράφους: Το ονομαστικό δοκίμιο κράματος 2198-T3 αυτής της περίπτωσης, δηλαδή αυτό το οποίο δεν κατεργάστηκε θερμικά αλλά διαβρώθηκε, παρουσίασε μέγιστη αναλαμβανόμενη δύναμη της τάξης των 8.1 kN με μετατόπιση χειλών 2.3 mm. Στο δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία πριν τη διάβρωσή του για 4 ώρες παρατηρήθηκε πως η μέγιστη δύναμη είναι 8.8 kN και η αντίστοιχη μετατόπιση χειλών στα 2 mm. Στη συνέχεια, με το χρόνο έκθεσης στη τεχνητή γήρανση πριν τη διάβρωση να ανέρχεται στις 28 ώρες, η μέγιστη τιμή της δύναμης βρίσκεται στα 7.2 kN με μεταβολή χειλών 1.5 mm, τιμές σαφώς μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες δύο προηγούμενες. Τέλος, στην περίπτωση τεχνητής γήρανσης για 96 ώρες με διάβρωση στη συνέχεια, οι τιμές μειώνονται επιπλέον σε σχέση με εκείνες της προηγούμενης περίπτωσης, με την αναλαμβανόμενη δύναμη να ανέρχεται στα 6.6 kN και την αντίστοιχη μετατόπιση χειλών στο 1.2 mm (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Τοπικές καμπύλες δύναμης– μετατόπισης των χειλών της ρωγμής για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης 170 °C και επακόλουθη διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) για 2 ώρες για το κράμα αλουμινίου 2198.

3.2 ΚΡΙΣΗΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ (K_{cr})

Στην **Εικόνα 3.3** απεικονίζεται ο κρίσιμος συντελεστής (K_{cr}) του υλικού, όπως αυτός μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου επιβολής του σε θερμική κατεργασία στους 170 °C (τεχνητή γήρανση), όταν αυτό έχει έπειτα υποβληθεί σε διάβρωση αποφλοιώσης (EXCO) και όταν αυτό δεν έχει συμβεί. Η συμπεριφορά του κρίσιμου συντελεστή φαίνεται να είναι παραπλήσια και στις δύο αυτές περιπτώσεις. Η τιμή του K_{cr} μειώνεται, αρχικά, με σχετικά μικρό ρυθμό έως το στάδιο της προ-γήρανσης, έπειτα με σαφώς πιο έντονο ρυθμό έως το στάδιο της μέγιστης γήρανσης (peak ageing), ενώ μέχρι το στάδιο της υπερ-γήρανσης ο ρυθμός της μείωσής του φαίνεται να ελαττώνεται ελαφρώς. Η τιμή του κρίσιμου συντελεστή σε κάθε στάδιο τεχνητής γήρανσης συγκριτικά για της περιπτώσεις που έχει ακολουθήσει η διαβρωτική διαδικασία σε σχέση με όταν αυτό δεν έχει συμβεί είναι σίγουρα μειωμένη. Για παράδειγμα, στην κατάσταση υπο-γήρανσης η τιμή του K_{cr} είναι 127 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, ενώ αν επακολουθήσει διάβρωση αποφλοιώσης η αντίστοιχη τιμή είναι 120.5 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (**Εικόνα 3.3**).

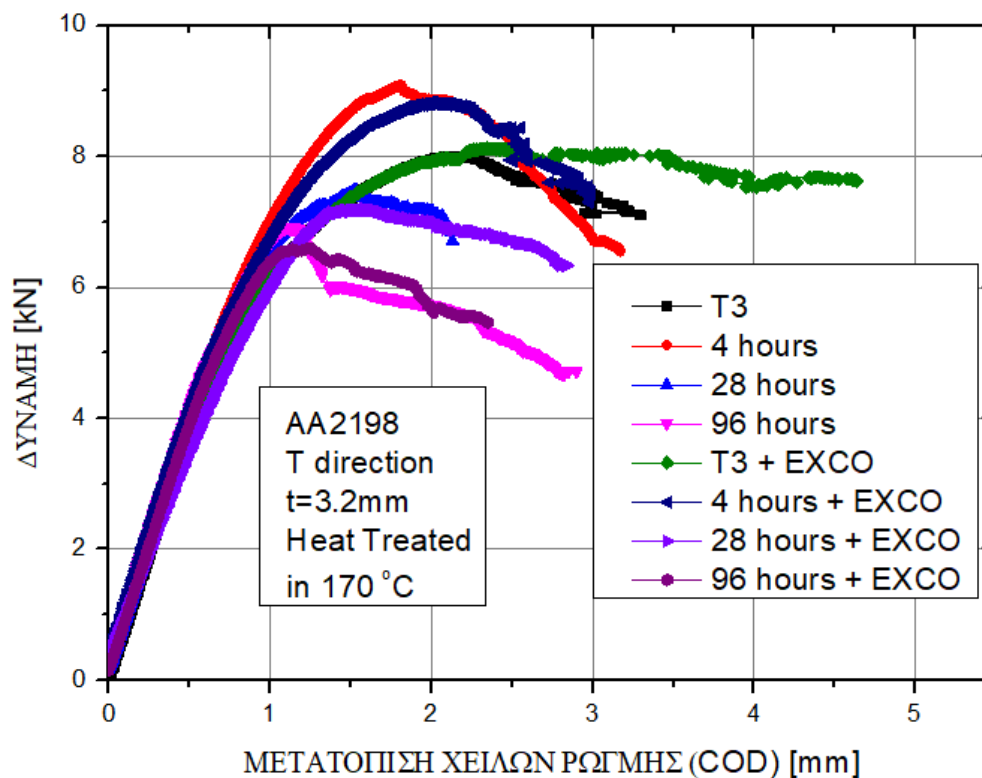


Εικόνα 3.3: Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων για διαφορετικούς χρόνους τεχνητής γήρανσης στους 170 °C με και χωρίς διάβρωση αποφλοιώσης (EXCO) για 2 ώρες, του κράματος αλουμινίου 2198.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ

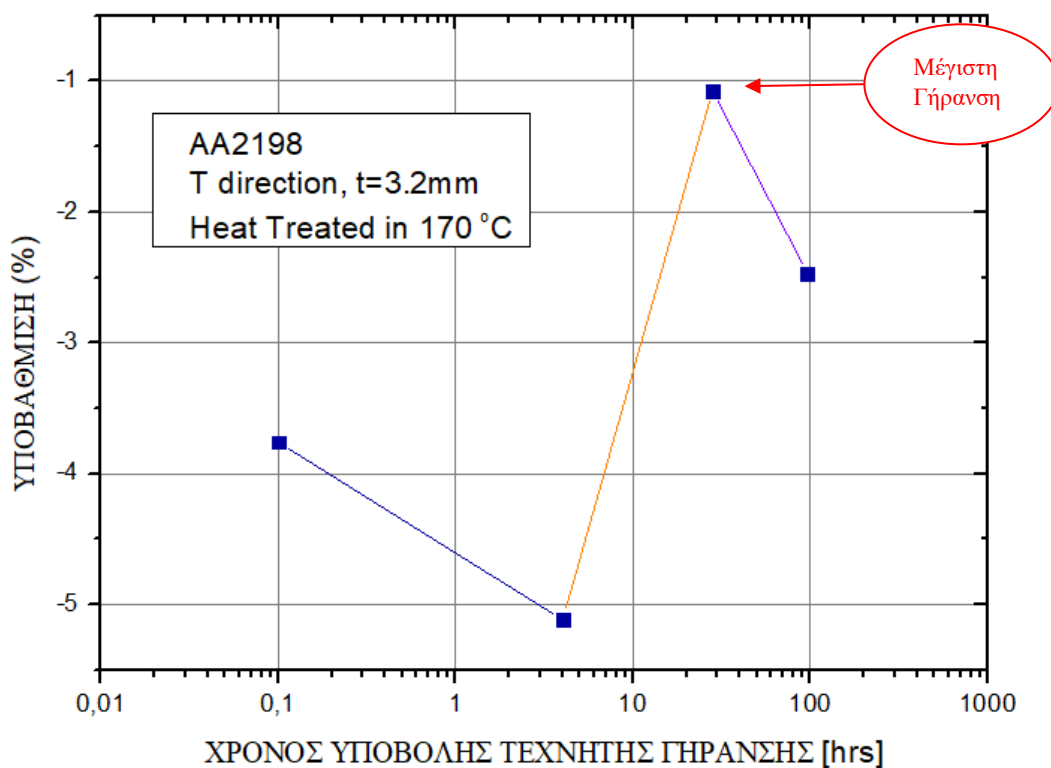
Συγκρίνοντας συνολικά όλες τις καμπύλες δύναμης – μεταβολής χειλών για τους τέσσερεις (4) προαναφερθέντες χρόνους υποβολής σε τεχνητή γήρανση μέσω θερμικής κατεργασίας (0, 4, 28 και 96 ώρες) για τα δοκίμια τα οποία έπειτα εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον αλλά και εκείνα τα οποία δεν ακολούθησαν αυτή τη διαδικασία σε ένα κοινό διάγραμμα, μπορούμε να αποφανθούμε ως προς τη διαφοροποίηση τις συμπεριφοράς των καμπυλών στις δύο αυτές περιπτώσεις. Επομένως, μέσω των καμπυλών που παρουσιάζονται στο σύνολό τους στην **Εικόνα 4.1**, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια τα οποία είχαν υποστεί διάβρωση αποφλοιώσης παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές αναλαμβανόμενης δύναμης οι οποίες, όμως, επιτυγχάνονται σε υψηλότερη μετατόπιση χειλών. Οι διαφορές παραμένουν μικρές, με εξαίρεση την περίπτωση της φυσικής γήρανσης (T3), όπου η τιμή μέγιστου αναλαμβανόμενου φορτίου φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη όταν το δοκίμιο έχει υποβληθεί σε διάβρωση αποφλοιώσης, πράγμα που πιθανώς οφείλεται σε αστοχίες που έλαβαν χώρα κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 4.1: Τυπικές καμπύλες δύναμης– μετατόπισης των χειλών της ρωγμής για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης 170 °C και επακόλουθη διάβρωση αποφλοιώσης (EXCO) για 2 ώρες και μη, για το κράμα αλουμινίου 2198.

4.2 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΑΣΕΩΝ

Στο γράφημα που ακολουθεί (Εικόνα 4.2) απεικονίζεται το ποσοστό (%) υποβάθμισης του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων για τα τέσσερα (4) διαφορετικά στάδια της θερμικής κατεργασίας στους 170 °C όταν το κράμα αλουμινίου 2198 εκτίθεται σε διάβρωση αποφλοιώσης για δύο (2) ώρες. Παρατηρείται ότι η μικρότερη μείωση (1.0753 %) σημειώνεται όταν το υλικό βρίσκεται στη κατάσταση μέγιστης γήρανσης (θερμική κατεργασία για 28 ώρες). Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι στη μέγιστη γήρανση προκύπτει καλύτερη διασπορά των κατακρημνίσεων, το οποίο συνεπάγεται τη πιο ομοιόμορφη εξάπλωση της υποβάθμισης λόγω διάβρωσης στην επιφάνεια του δοκιμίου που εκτέθηκε στο διαβρωτικό υδατικό διάλυμα.



Εικόνα 4.2: Υποβάθμιση (%) του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων για διαφορετικούς χρόνους τεχνητής γήρανση στους 170 °C, λόγω υποβολής σε διάβρωση αποφλοιώσης (EXCO) για 2 ώρες, του κράματος αλουμινίου 2198.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η αντοχή του υλικού στη θραύση φαίνεται να παρουσιάζει αύξηση στο στάδιο της προ-γήρανσης και να μειώνεται έπειτα έως το στάδιο της μέγιστης γήρανσης, συνεπώς συμπεραίνουμε την έντονη επίδραση των θερμικών κατεργασιών στη δυσθραυστότητα του υλικού.
- Την αντοχή στη θραύση επηρεάζει έντονα, επίσης, και η έκθεση του υλικού σε περιβάλλον διάβρωσης αποφλοίωσης για διάρκεια 2 ωρών, καθώς αυτή φαίνεται να υποβαθμίζεται περαιτέρω στα διάφορα στάδια θερμικής κατεργασίας σε συνδυασμό με την προαναφερθείσα διαβρωτική διαδικασία.
- Ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων (K_{cr}) υποβαθμίζεται όλο και περισσότερο για μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης του υλικού σε θερμική κατεργασία, και συνεπώς συμπεραίνουμε ότι η διάδοση της ρωγμής έως το σημείο της πλαστικής παραμόρφωσης είναι πιο επίφοβη κατά την γήρανση του υλικού.
- Ο κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων (K_{cr}) υποβαθμίζεται περαιτέρω όταν το υλικό έχει επιπλέον υποστεί διάβρωση αποφλοίωσης, γεγονός το οποίο ωθεί στο συμπέρασμα ότι, όταν το υλικό εκτεθεί στο εν λόγω διαβρωτικό περιβάλλον, η ρωγή διαδίδεται έως το στάδιο της θραύσης του με μεγαλύτερη ευκολία.

6 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

- Καθώς το υλικό είναι ιδιαίτερα ανισότροπο, είναι αναγκαία η σύγκριση των ανωτέρων πειραματικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα για καταπόνηση ως προς διαφορετικές φορές φόρτισης, όπως παράλληλη (L) ή κατά 45° (L+45°) ως προς τη φορά έλασης του υλικού.
- Καθώς η έρευνα των μηχανικών ιδιοτήτων για το εν λόγω υλικό έχει σκοπό τη πρότασή του ως εναλλακτική επιλογή για χρήση του στη θέση άλλων υλικών που ήδη θεωρούνται κατάλληλα και χρησιμοποιούνται, είναι απαραίτητη και η σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων υλικών, όπως το AA2024.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν, επίσης, να συσχετιστούν με αποτελέσματα άλλων πειραματικών δοκιμών, όπως για παράδειγμα εφελκυσμού ή κοπώσεως, ώστε να προέλθει μία ολοκληρωμένη έρευνα ως προς το σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων του AA2198 σε διάφορα στάδια γήρανσης και διάβρωσης,
- Λόγω της έλλειψης πληθώρας πειραματικών δοκιμών αλλά και των διαφόρων αστοχιών που προέκυψαν ως προς την ακεραιότητα της πειραματικής διαδικασίας κατά την διεκπεραίωσή της, προτείνεται να επαναληφθούν οι πειραματικές διαδικασίες με πανομοιότυπο τρόπο και περισσότερα πειραματικά δοκίμια, με στόχο την επαλήθευση ή διόρθωση των αποτελεσμάτων.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]Totten G, D Scott Mackenzie. Handbook of Aluminum Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes. Crc Press; 2003.
- [2]Kaufman JG, Rooy EL, American Foundry Society. Aluminum alloy castings : properties, processes, and applications. Materials Park, Oh: Asm International; 2004.
- [3]Kaufman JG. Introduction to aluminum alloys and tempers. Materials Park, Oh: Asm International; 2000.
- [4]Davis JR. Alloying : understanding the basics. Materials Park, Oh: Asm International; 2001.
- [5]Grushko O. ALUMINUM-LITHIUM ALLOYS : process metallurgy, physical metallurgy, and welding. CRC; 2019.
- [6]Ghali E. Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys : understanding, performance, and testing. Hoboken, N.J: John Wiley; 2010.
- [7]Dashwood RJ, Grimes R. Structural Materials: Aluminum and Its Alloys, Properties. Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons, Ltd 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae195>.
- [8]Horst Buhl. Advanced aerospace materials. Berlin: Springer; 1992.
- [9]Eswara Prasad, Amol Gokhale, R J H Wanhill. Aluminum-Lithium Alloys : Processing, Properties, and Applications. Amsterdam: Elsevier Science; 2014.
- [10]Giummara C, Thomas B, J Rioja R. New Aluminum-Lithium Alloys for Aerospace Applications n.d.
- [11]Γιαννακόπουλος ΚΙ. Σημειώσεις Πειραματικής Αντοχής Υλικών. Αθήνα: Τμήμα Μηχανολογίας Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Πειραιώς; 2011.
- [12]Παντελής ΔΙ, Χρυσουλάκης ΓΔ. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου; 1996.
- [13]Ασημακόπουλος Α. Πειραματική Αντοχή Υλικών. Κατασκευαστικός Τομέας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών; n.d.
- [14]Gdoutos EE. Fracture mechanics : an introduction. Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic Publishers; 1993.
- [15]Fracture Toughness. Nde-Edorg 2019. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm>.
- [16]Anderson TL. Fracture mechanics : fundamentals and applications. Boca Raton:

Crc Press/Taylor & Francis; 2017.

[17]Callister WD, Rethwisch DG. Materials science and engineering : an introduction. New York: Wiley; 2007.

[18]Κατσαμά Α. Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών: Μηχανισμός Ισχυροποίησης των μετάλλων, Σημειώσεις Μαθήματος. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας; 2008.

[19]Davis JR. Corrosion of aluminum and aluminum alloys. Materials Park: Asm International; 2000.

[20]Davis JR. Corrosion : understanding the basics. Materials Park, Ohio: Asm International; 2000.

[21]Keller S, Chupakhin S, Staron P, Maawad E, Kashaev N, Klusemann B. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198. Journal of Materials Processing Technology 2018;255:294–307. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.023>.

[22]Pero R, Maizza G, De Marco F, De Fazio P, Montanari R, Ohmura T. Determination of the Yield Radius and Yield Stress in 2198-T3 Aluminum Alloy by Means of the Dual-Scale Instrumented Indentation Test. MATERIALS TRANSACTIONS 2019;60:1450–6. <https://doi.org/10.2320/matertrans.mt-md2019010>.

[23]Goebel J, Reimann M, Norman A, dos Santos JF. Semi-stationary shoulder bobbin tool friction stir welding of AA2198-T851. Journal of Materials Processing Technology 2017;245:37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.011>.

[24]Reimann M, Goebel J, Gartner TM, dos Santos JF. Refilling termination hole in AA 2198–T851 by refill friction stir spot welding. Journal of Materials Processing Technology 2017;245:157–66. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.025>.

[25]Moreto JA, Broday EE, Rossino LS, Fernandes JCS, Bose Filho WW. Effect of Localized Corrosion on Fatigue–Crack Growth in 2524-T3 and 2198-T851 Aluminum Alloys Used as Aircraft Materials. Journal of Materials Engineering and Performance 2018;27:1917–26. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3244-7>.

[26]Schnubel D, Horstmann M, Ventzke V, Riekehr S, Staron P, Fischer T, et al. Retardation of fatigue crack growth in aircraft aluminium alloys via laser heating – Experimental proof of concept. Materials Science and Engineering: A 2012;546:8–14. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.094>.

[27]Xu L, Wang Q, Zhou M. Micro-crack initiation and propagation in a high strength aluminum alloy during very high cycle fatigue. Materials Science and Engineering: A

- 2018;715:404–13. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.008>.
- [28]Le Jolu T, Morgeneyer TF, Denquin A, Sennour M, Laurent A, Besson J, et al. Microstructural Characterization of Internal Welding Defects and Their Effect on the Tensile Behavior of FSW Joints of AA2198 Al-Cu-Li Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2014;45:5531–44. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2537-1>.
- [29]Canvalho AA. Residual Strength Analysis of AA2198 Laser Beam Welded Integral Structures. 2014.
- [30]Stanley D, Awerbuch J, Tan T-M, Anasori B. Reconstruction of fatigue crack growth in AA2024-T3 and AA2198-T8 fastened lap joints. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2016;82:33–50. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.06.006>.
- [31]Velotti C, Astarita A, Squillace A, Ciliberto S, Villano MG, Giuliani M, et al. On the critical technological issues of friction stir welding lap joints of dissimilar aluminum alloys. *Surface and Interface Analysis* 2013;45:1643–8. <https://doi.org/10.1002/sia.5277>.
- [32]Cavaliere P, Cabibbo M, Panella F, Squillace A. 2198 Al–Li plates joined by Friction Stir Welding: Mechanical and microstructural behavior. *Materials & Design* 2009;30:3622–31. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.02.021>.
- [33]Velonaki Z, Kourkoulis SK, Dietzel W, Alexopoulos ND. Mechanical Behavior Of Aluminum Alloy 2198 Under Different Corrosion Exposure Times n.d.
- [34]Alexopoulos ND, Migklis E, Stylianos AS Dimitrios P. Myriounis, Myriounis DP. Fatigue behavior of the aeronautical Al–Li (2198) aluminum alloy under constant amplitude loading n.d.
- [35]Alexopoulos ND, Proiou A, Dietzel W, Blawert C, Heitmann V, Zheludkevich M, et al. Mechanical properties degradation of (Al-Cu-Li) 2198 alloy due to corrosion exposure. *Procedia Structural Integrity* 2016;2:597–603. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.077>.
- [36]Tian-Zhang Z, Long J, Yong X, Shi-Hong Z. Anisotropic yielding stress of 2198 Al–Li alloy sheet and mechanisms. *Materials Science and Engineering: A* 2020;771:138572. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138572>.
- [37]Gamboni OC, Moreto JA, Bonazzi LHC, Ruchert COFT, Bose Filho WW. Effect of salt-water fog on fatigue crack nucleation of Al and Al-Li alloys. *Materials Research* 2013;17:250–4. <https://doi.org/10.1590/s1516-14392013005000190>.
- [38]Steglich D, Wafai H, Besson J. Interaction between anisotropic plastic deformation

- and damage evolution in Al 2198 sheet metal. *Engineering Fracture Mechanics* 2010;77:3501–18. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.08.021>.
- [39]Chen J, Madi Y, Morgeneyer TF, Besson J. Plastic flow and ductile rupture of a 2198 Al–Cu–Li aluminum alloy. *Computational Materials Science* 2011;50:1365–71. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.06.029>.
- [40]Wang X, Wang J, Yue X, Gao Y. Effect of aging treatment on the exfoliation corrosion and stress corrosion cracking behaviors of 2195 Al–Li alloy. *Materials & Design* 2015;67:596–605. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.007>.
- [41]Siskou N, Charalampidou Ch, Alexopoulos ND, Kourkoulis SK. Effect of corrosion exposure on aluminum alloy 2024 for different artificial ageing conditions. *Procedia Structural Integrity* 2018;10:79–84. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.012>.
- [42]Εξαμηλιώτη Θ. Μηχανική συμπεριφορά αεροναυπηγικού κράματος αλουμινίου 6156 συγκολλημένο με δέσμη ηλεκτρονίων. Διπλωματική Εργασία. 2016.
- [43]Λυμπεράκη Π. Επίδραση της Θερμικής Κατεργασίας Τεχνητής Γήρανσης στη Διάβρωση Ψαθυροποίησης του Αεροναυπηγικού Κράματος Αλουμινίου 2024-T3. Διπλωματική Εργασία. 2014.
- [44]Karanikolas D. The effect of artificial ageing heat treatments on the tensile and fracture properties of laser beam-welded AA2198 joints. Diploma Thesis. 2017.
- [45]American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM G34, Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test). ASTM International; n.d.
- [46]Annual Book of ASTM Standards. ASTM E561 - 98, Standard Practice for R-Curve Determination. ASTM International; n.d.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Σχεδιάγραμμα των βασικών προσμίξεων για τη δημιουργία των κραμάτων διαμόρφωσης ανά σειρά.....	12
Εικόνα 1.2: Προαπαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες για κατασκευή επιβατηγών αεροσκαφών.....	16
Εικόνα 1.3: Η χρήση των μεταλλικών υλικών σύμφωνα με το βάρος τους στα αεροσκάφη: (Α) Boeing 767 (Β) Boeing 777 (Γ) Boeing 787	17
Εικόνα 1.4: (α) Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμής εφελκυσμού του χαλκού (β) Παράσταση του εφελκυσμού δοκιμίου έως τη θραύση του.....	20
Εικόνα 1.5: Αναπαράσταση των δύο (2) τύπου δοκιμίων που χρησιμοποιούνται για τις δοκιμές εφελκυσμού.....	20
Εικόνα 1.6: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης με σκιαγραφημένο το εμβαδόν κάτωθεν της καμπύλης.....	21
Εικόνα 1.7: Διάγραμμα Δυσθραυστότητας – Θερμοκρασίας.....	22
Εικόνα 1.8: Οι τρεις (3) τύποι φόρτισης που μπορούν να εφαρμοστούν σε μία ρωγμή.....	23
Εικόνα 1.9: Ο συντελεστής έντασης τάσεων συναρτήσει του πάχους του δοκιμίου..	24
Εικόνα 1.10: Κύλινδρος σε πρώιμο στάδιο με περιστροφικό θόλο κατασκευασμένος από AA2198 για το αεροσκάφος Falcon 9.....	26
Εικόνα 1.11: Διαγράμματα περιγραφής της επίδρασης του χρόνου γήρανσης και της θερμοκρασίας στην ισχύ του κράματος αλουμινίου – χαλκού.....	27
Εικόνα 1.12: Υποθετικό διάγραμμα φάσης κράματος σύστασης C ₀ , το οποίο μπορεί να υποβληθεί σε σκλήρυνση με κατακρήμνισεις.....	28
Εικόνα 1.13: Περιγραφή των τριών (3) σταδίων της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας- χρόνου.....	29
Εικόνα 1.14: Σχηματική απεικόνιση διάφορων σταδίων έως την εμφάνιση σωματιδίων φάσης β, (α) Υπερκορεσμένο διάλυμα φάσης α (β) Παραμόρφωση κρυσταλλικού πλέγματος από σωματίδιο δευτερεύουσας φάσης (γ) Σωματίδιο φάσης β ενδιάμεσα σε μήτρα φάσης α.....	30
Εικόνα 1.15: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού Orowan.....	31
Εικόνα 1.16: Σχηματική απεικόνιση των πιο χαρακτηριστικών μορφών διάβρωσης.....	32
Εικόνα 1.17: Απεικόνιση των αποσυντεθειμένων στρωμάτων κράματος αλουμινίου (AA7004) κατόπιν έκθεσης σε διάβρωση αποφλοΐωσης.....	34
Εικόνα 1.18: a) Τυπική καμπύλη εφελκυσμού του AA2198 για διάφορους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση αποφλοΐωσης. b) Η επιμήκυνση θραύσης λόγω εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στη διάβρωση αποφλοΐωσης για τα κράματα 2198 και 2024.....	35
Εικόνα 1.19: (a) Τυπική καμπύλη εφελκυσμού του AA2198 για διάφορους χρόνους υποβολής σε θερμική κατεργασία στους 170 °C. (b) Η επιμήκυνση θραύσης λόγω εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου υποβολής θερμικής κατεργασίας με και διάβρωση αποφλοΐωσης για 2 ώρες.....	36
Εικόνα 1.20: Οι πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού των κραμάτων αλουμινίου (a) 2024 και (b) 2198 για διάφορους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση αποφλοΐωσης.....	36

Εικόνα 1.21: Η επιφάνεια των δοκιμών εφελκυσμού για διάφορους χρόνους έκθεσης σε διάβρωση αποφλοίωσης (a) 2 ώρες (b) 24 ώρες (c) 48 ώρες, και (d) έως (f) αντίστοιχα, έπειτα από τις δοκιμές εφελκυσμού.....	37
Εικόνα 1.22: Τυπικές καμπύλες εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2198 για διαφορετικούς χρόνους θερμικής κατεργασίας υπό διαφορετικές κατευθύνσεις έλασης.....	37
Εικόνα 1.23: Σύγκριση των καμπυλών σ -N για τα κράματα αλουμινίου 2198-T8 και 2524-T3 σε διαφορετικά περιβάλλοντα.	38
Εικόνα 1.24: Σύγκριση καμπυλών των πειραματικών αποτελεσμάτων (γραμμές) και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης (κουκίδες) για (a) δοκιμές εφελκυσμού (b) δοκίμια NT.....	39
Εικόνα 1.25: Τυπικές καμπύλες εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2195 για πέντε (5) διαφορετικές θερμοκρασίες (a) στον ατμοσφαιρικό αέρα (b) σε 3.5% NaCl.	39
Εικόνα 1.26: Τυπικές πειραματικές καμπύλες εφελκυσμού στο AA2024 για διάφορες ώρες έκθεσης σε διάβρωση αποφλοίωσης (a) σε κατάσταση T3 (b) σε κατάσταση μέγιστης γήρανσης.	40
Εικόνα 2.1: Λογικό Διάγραμμα Ροής της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.....	42
Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση των δοκιμών δυσθραυστότητας με τις διαστάσεις τους (mm).....	42
Εικόνες 2.3: Ένα δοκίμιο δυσθραυστότητας το οποίο έχει υποστεί διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) κατά την πειραματική του δοκιμή.....	44
Εικόνες 2.4 και 2.5: Η πειραματική μηχανή Instron 8801 και η διάταξη κατά την εκπόνηση ενός πειράματος.....	45
Εικόνα 2.6: Δοκίμιο το οποίο δείχνει τον ορισμό του ανοίγματος της ρωγμής-μετατόπισης (Crack mouth opening displacement-CMOD) και το Crack-tip opening displacement (CTOD), το οποίο αποτελεί τη διάμετρο του κυκλικού τόξου στο άκρο της ρωγμής, που δε πρέπει να συγχέεται με την πλαστική ζώνη.....	46
Εικόνες 2.7 και 2.8: Ένα δοκίμιο δυσθραυστότητας πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τη διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας.....	47
Εικόνα 2.9: Οι τιμές των $C_{0,1,2,3,4,5}$ σύμφωνα με τη προδιαγραφή ASTM E561	48
Εικόνα 2.10: Τυπική καμπύλη υπολογισμού του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων K_{Ic}	49
Εικόνα 3.1: Τυπικές καμπύλες δύναμης– μετατόπισης των χειλών της ρωγμής για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης 170 °C για το κράμα αλουμινίου 2198.....	50
Εικόνα 3.2: Τυπικές καμπύλες δύναμης– μετατόπισης των χειλών της ρωγμής για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης 170 °C και επακόλουθη διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) για 2 ώρες για το κράμα αλουμινίου 2198.....	51
Εικόνα 3.3: Κρίσιμος συντελεστής έντασης τάσεων για διαφορετικούς χρόνους τεχνητής γήρανση στους 170 °C με και χωρίς διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) για 2 ώρες, του κράματος αλουμινίου 2198.....	52
Εικόνα 4.1: Τυπικές καμπύλες δύναμης– μετατόπισης των χειλών της ρωγμής για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασία τεχνητής γήρανσης 170 °C και επακόλουθη διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) για 2 ώρες και μη, για το κράμα αλουμινίου 2198.....	53

Εικόνα 4.2: Υποβάθμιση (%) του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων για διαφορετικούς χρόνους τεχνητής γήρανση στους 170 °C, λόγω υποβολής σε διάβρωση αποφλοίωσης (EXCO) για 2 ώρες, του κράματος αλουμινίου 2198. 54

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Οι σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης.....	12
Πίνακας 1.2: Οι σειρές των κραμάτων διαμόρφωσης με τις βασικές τους μηχανικές ιδιότητες (ASM International 2009).....	13
Πίνακας 1.3: Οι σειρές των κραμάτων χύτευσης.....	13
Πίνακας 2.1: Σύσταση (βάρος %) των συστατικών του κράματος 2198, εκτός του αλουμινίου.	41
Πίνακας 2.2: Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία.....	43
Πίνακας 2.3: Δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία και έπειτα σε διάβρωση αποφλοίωσης	43

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ – ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

- Ο μικρός αριθμός πειραματικών δοκιμίων και, κατά συνέπεια, ο εύλογος περιορισμένος αριθμός πειραμάτων αποτελεί βασικό περιορισμό ως προς την ορθότητα των συμπερασμάτων που εξάχθηκαν.
- Η στρέψη της πειραματικής μηχανής (Instron 8801) πιθανώς προκάλεσε επιβολή στρεπτικών καταπονήσεων οι οποίες δεν ήταν επιθυμητές στη παρούσα πειραματική μελέτη, και συνεπώς τα αποτελέσματα είναι μερικώς αμφίβολα.
- Καθώς τα πειραματικά δοκίμια είναι μικρού πάχους (2 mm), είναι πιθανό να υποβλήθηκαν μερικώς σε στρεπτικές καταπονήσεις λόγω μικρών αστοχιών στην δομή της πειραματικής διαδικασίας.