

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**



**«Μηχανική συμπεριφορά ελατών κραμάτων αλουμινίου υπό  
σταθερού εύρους τάσης κοπωτικά φορτία »**

**Μιγκλής Ευάγγελος**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Αλεξόπουλος**

**Χίος**  
**Οκτώβριος 2012**

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμηση και τις ευχαριστίες μου στον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Νικόλαο Αλεξόπουλο, του τμήματος Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, για τη συνεχή καθοδήγηση και τη συμπαράσταση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Έρευνας και Ανάπτυξης της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας για την υποστήριξη που μου παρείχε κατά της διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Μηριούνη Δημήτριο, Λέκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Sheffield Hallam στην Αγγλία για τη βοήθεια του στη μελέτη της επιφάνειας θραύσης των δοκιμών κόπωσης.

## Πίνακας περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ .....</b>	<b>6</b>
<b>1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....</b>	<b>7</b>
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ .....	7
1.2 ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ .....	7
1.3 ΕΛΑΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ .....	11
1.4 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	13
1.5 ΚΟΠΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	14
1.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ .....	15
<b>2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>17</b>
2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ .....	17
2.2 ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2024-T3 .....	18
2.3 ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 2198-T351 .....	19
2.4 ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ 6156-T4 .....	19
2.5 ΔΟΚΙΜΙΑ .....	20
2.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΕΩΝ .....	21
2.7 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	22
2.8 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΟΠΩΣΗΣ.....	24
2.9 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ .....	25
<b>3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>26</b>
3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ .....	26
3.1.1 Υλικό 2024.....	26
3.1.2 Υλικό 2198.....	28
3.1.3 Υλικό 6156.....	29
3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ – ΚΑΜΠΥΛΕΣ S-N .....	30
3.2.1 Υλικό 2024.....	30
3.2.2 Υλικό 2198.....	32
3.2.3 Υλικό 6156.....	34
3.3 ΕΙΔΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	36
3.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΤΙΜΗ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΗΣ.....	37
3.4.1 Υλικό 2024.....	38
3.4.2 Υλικό 6156.....	39
3.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕ ΜΕΣΑΙΑ Η ΧΑΜΗΛΗ ΤΙΜΗ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΗΣ .....	39
3.5.1 Υλικό 2024.....	40
3.5.2 Υλικό 6156.....	40
<b>4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>42</b>
4.1 ΕΝΑΠΟΜΕΝΟΥΣΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	42

4.1.1	Υλικό 2024.....	44
4.1.2	Υλικό 2198.....	46
4.1.3	Υλικό 6156.....	47
4.2	ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΚΥΚΛΟ ΚΟΠΩΣΗΣ .....	48
4.2.1	Υλικό 2024.....	48
4.2.2	Υλικό 6156.....	50
4.3	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΟΠΩΣΗΣ.....	52
4.3.1	Κανόνας του Basquin .....	52
4.4	ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ .....	55
4.4.1	Υλικό 2024.....	55
4.4.2	Υλικό 6156.....	56
4.5	ΕΚΘΕΤΗΣ ΕΡΓΟΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ .....	57
4.5.1	Υλικό 2024.....	58
4.5.2	Υλικό 6156.....	58
<b>5</b>	<b>ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ .....</b>	<b>61</b>
5.1	ΥΛΙΚΟ 2198 .....	62
5.2	ΥΛΙΚΟ 6156 .....	65
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>69</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>70</b>
	<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>73</b>
	<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>75</b>

## Περίληψη

Διαχρονικά ένας από τους βασικότερους στόχους της αεροπορικής βιομηχανίας είναι η μείωση του βάρους των αεροχημάτων προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση του ωφέλιμου φορτίου και παράλληλα μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω της μείωσης εκπομπής ρύπων. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση μεταλλικών υλικών με καλή συγκολλησιμότητα, όπως είναι για παράδειγμα τα κράματα αλουμινίου 2198-T351 και 6156-T4, μπορεί να αποτελέσει σημαντική τεχνολογική καινοτομία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς τριών διαφορετικών ελατών κραμάτων αλουμινίου: του συμβατικού 2024-T3 και των καινοτόμων 2198-T351 και 6156-T4 υπό σταθερού εύρους τάσης κοπωτικά φορτία λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς παραμόρφωσης και αστοχίας των υλικών. Αρχικά κατασκευάστηκαν δοκίμια εφελκυσμού και κόπωσης σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές. Πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού και αποτιμήθηκαν οι εφελκυστικές μηχανικές ιδιότητές τους. Για την αξιολόγηση της μηχανικής επίδοσης των εν λόγω κραμάτων σε κόπωση, πραγματοποιήθηκε εκτενής πειραματική μελέτη, η οποία περιελάμβανε την κατασκευή τριών καμπυλών  $S-N$ , μία για κάθε ένα υλικό. Παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση εξαρτάται ισχυρά από μικρές μεταβολές της επιβαλλόμενης εφελκυστικής μέγιστης τάσης. Υπολογίστηκε η εναπομένουσα ελαστικότητα για τα τρία κράματα και η απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης σε σύγκριση με την επιβαλλόμενη εφελκυστική μέγιστη τάση καθώς και με το ποσοστό βλάβης κόπωσης του υλικού. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, κατασκευάστηκαν οι κυκλικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης των κραμάτων και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Τέλος, υπολογίστηκε ο εκθέτης εργοσκήρυνσης των κραμάτων και η μεταβολή του με αυξανόμενη βλάβη κόπωσης.

## Κατάλογος συμβόλων

Σύμβολο	Μονάδες	Ερμηνεία
$L_0$	mm	μήκος δοκιμίου
$\sigma_m$	MPa	μέση τιμή καταπόνησης
$\sigma_a$	MPa	εύρος καταπόνησης
$\Delta\sigma$	MPa	πλάτος της καταπόνησης
$R$	-	λόγος τάσεων σταθερού εύρους τάσης κόπωσης
$E$	GPa	μέτρο ελαστικότητας
$R_p$	MPa	όριο διαρροής
$R_m$	MPa	όριο θραύσης
$A_f$	%	παραμόρφωση θραύσης
$\varepsilon$	%	ονομαστική παραμόρφωση
$N_f$	-	κύκλοι αστοχίας
$E_{un}$	GPa	εναπομένουσα ελαστικότητα
$D$	%	ποσοστό βλάβης κόπωσης
$W$	kJ/m <sup>3</sup>	απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης
$C$	-	εμπειρικός συντελεστής στον κανόνα του Basquin
$b$	-	εμπειρικός συντελεστής στον κανόνα του Basquin
$n$	-	εκθέτης εργοσκήρυνσης

## **1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

### **1.1 Ιστορική αναδρομή του αλουμινίου**

Πριν από 145 χρόνια ο Ιούλιος Βερν έγραψε το «Από τη Γη στη Σελήνη» χαρακτηρίζοντας το αλουμίνιο: «Άσπρο σαν το ασήμι και ελαφρύ σαν το γυαλί». Σήμερα το αλουμίνιο συμπληρώνει πραγματική ζωή 180 ετών περίπου, ενώ βρίσκεται σε βιομηχανική κλίμακα παραγωγής σχεδόν για 120 χρόνια. Το αλουμίνιο δεν υπάρχει στη φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπασίμες, με αποτέλεσμα η απομόνωση του μετάλλου αυτού να καθυστερήσει σημαντικά λόγω έλλειψης της απαραίτητης τεχνολογίας. Αν και το αλουμίνιο έγινε γνωστό στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, παρ' όλα αυτά χρησιμοποιήθηκε από την αρχαιότητα. Οι αρχαίοι Έλληνες, οι Αιγύπτιοι, οι Κινέζοι και οι Ρωμαίοι, χρησιμοποίησαν το αλουμίνιο στις φυσικές του ενώσεις, χωρίς κατά πάσα πιθανότητα να γνωρίζουν την ύπαρξη ενός μετάλλου που έδινε ειδικές ιδιότητες στις δημιουργίες τους.

Πρώτος ο Βρετανός Davy υποστήριξε την ύπαρξη του αλουμινίου το 1807, ενώ ο Δανός Oerstead κατάφερε να απομονώσει το αλουμίνιο 18 χρόνια αργότερα. Το 1827 ο Γερμανός Wöhler ανακάλυψε την παραγωγή αλουμινίου μέσω της αντίδρασης ποτάσας με άνυδρο χλωρίδιο του αλουμινίου και το 1845 ανακάλυψε και κατέγραψε την πυκνότητα του αλουμινίου και μία από τις βασικές του ιδιότητες, την ελαφρότητα. Το 1854 ο Γάλλος Deville ανέπτυξε για πρώτη φορά μια χημική μέθοδο παραγωγής αλουμινίου. Η τιμή του μετάλλου ξεπέρασε για πρώτη φορά αυτή του χρυσού και της πλατίνας.

Το 1886 δύο νέοι επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Toussaint Heroult και ο Αμερικάνος Charles Martin Hall, ανακάλυψαν τη μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος αλουμίνης. Οι δύο επιστήμονες εργάστηκαν ξεχωριστά, χωρίς να ξέρουν ο ένας την εργασία του άλλου. Τέλος, ο Γερμανός Bayer το 1888 επινόησε μια οικονομική μέθοδο παραγωγής αλουμίνης από το βωξίτη, ξεκινώντας έτσι η βιομηχανική ιστορία του αλουμινίου.

### **1.2 Το αλουμίνιο και τα κράματα του**

Το αλουμίνιο και η οικογένεια των κραμάτων του είναι σήμερα από τα πιο σημαντικά βιομηχανικά μέταλλα και η χρήση τους διαρκώς και επεκτείνεται κυρίως στην αεροναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία λόγω του χαμηλού τους βάρους και των ιδιαίτερων μηχανικών ιδιοτήτων τους. Τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε μηχανολογικές εφαρμογές και κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές ειδικές αντοχές. Το αλουμίνιο είναι σχετικά μη ανθεκτικό αλλά πολύ όλκιμο μέταλλο. Το μέτρο ελαστικότητας του αλλά και το βάρος του, είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι η παραμόρφωση του αλουμινίου

κάτω από αντίστοιχη φόρτιση είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα. Επιπλέον το αλουμίνιο και τα κράματα του διατηρούν την ολκιμότητα τους και δε γίνονται ψαθυρά ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, αντίθετα με το χάλυβα. Τα πλεονεκτήματα του αλουμινίου συνοψίζονται ως: είναι πολύ ελαφρύ αν και μερικά από τα κράματα του έχουν αντοχή συγκρίσιμη με του χάλυβα, παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση ακόμα και κάτω από δυσμενείς συνθήκες, δεν είναι τοξικό, είναι καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος και της θερμότητας, ανακλά σε μεγάλο ποσοστό το φως και τη θερμότητα και επιδέχεται με ευκολία μηχανουργικές κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης αλλά και επιφανειακές επικαλύψεις.

Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το λίθιο, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για ειδικούς σκοπούς. Με την προσθήκη αυτών των στοιχείων το υπό ανάπτυξη υλικό μπορεί να αποκτήσει διαφορετικές ιδιότητες.

Στις αεροπορικές εφαρμογές ο λόγος αντοχής προς το βάρος των τεχνολογικών υλικών που χρησιμοποιούνται είναι ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες. Αυτός είναι και ο λόγος που στα σύγχρονα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τα κράματα αλουμινίου. Ενδεικτικό στοιχείο για τη χρησιμοποίηση των κραμάτων αλουμινίου στα αεροσκάφη, αποτελεί το γεγονός ότι συναντώνται σε διάφορα τμήματα του αεροσκάφους όπως είναι π.χ. το κέλυφος και τα φτερά.

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τα ελατά κράματα και τα κράματα χύτευσης και αυτά με τη σειρά τους διακρίνονται σε κράματα που είναι ή όχι θερμικά κατεργάσιμα. Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται οι κύριες κραματικές σειρές του αλουμινίου για ελατά κράματα και για κράματα χύτευσης [1]. Το σύστημα ονοματολογίας των ελατών κραμάτων και χύτευσης αλουμινίου περιλαμβάνει τέσσερα ψηφία όπου: το πρώτο ψηφίο υποδεικνύει το κύριο κραματικό στοιχείο, ενώ τα επόμενα ψηφία δίνουν πληροφορίες σχετικά με τη χημική σύσταση και την κατεργασία του κάθε κράματος.

Για την κραματική σειρά 1xxx των ελατών κραμάτων αλουμινίου, το τρίτο και το τέταρτο ψηφίο κωδικοποίησης υποδεικνύουν το μικρότερο ποσοστό αλουμινίου π.χ το κράμα αλουμινίου 1175 έχει ελάχιστο ποσοστό αλουμινίου 99.75 %. Για τις κραματικές σειρές 2xxx έως 7xxx των ελατών κραμάτων αλουμινίου, σε μεγαλύτερο ποσοστό στο κράμα βρίσκεται το κύριο κραματικό στοιχείο και είναι αυτό που υποδεικνύει την κατηγορία στην οποία ανήκει το κάθε κράμα. Για τις κραματικές σειρές 2xxx έως 8xxx, το δεύτερο ψηφίο κωδικοποίησης δείχνει τροποποιήσεις που μπορούν να υποστούν τα κράματα. Τα δυο τελευταία ψηφία κωδικοποίησης βοηθούν μόνο την ταυτοποίηση διαφορετικών κραμάτων της ίδιας κατηγορίας [2].

**Πίνακας 1: Κωδικοποίηση των ελατών κραμάτων του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης.**

<b>Ελατά κράματα</b>	
1xxx	Καθαρό αλουμίνιο
2xxx	Κράματα Al-Cu
3xxx	Κράματα Al-Mn
4xxx	Κράματα Al-Si
5xxx	Κράματα Al-Mg
6xxx	Κράματα Al-Mg-Si
7xxx	Κράματα Al-Zn
8xxx	Κράματα Al με άλλα στοιχεία
9xxx	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά

**Πίνακας 2: Κωδικοποίηση των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης.**

<b>Κράματα χύτευσης</b>	
1xx.x	Καθαρό αλουμίνιο
2xx.x	Κράματα Al-Cu
3xx.x	Κράματα Al-Si+Cu και/η Mg
4xx.x	Κράματα Al-Si
5xx.x	Κράματα Al-Mg
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7xx.x	Κράματα Al-Zn
8xx.x	Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία
9xx.x	Κράματα Al με άλλα στοιχεία

Για τα κράματα χύτευσης το πρώτο ψηφίο κωδικοποίησης είναι αυτό που υποδεικνύει το κύριο κραματικό στοιχείο που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ποσοστό στο κράμα. Το δεύτερο και το τρίτο ψηφίο κωδικοποίησης υποδεικνύουν την ειδική κατηγορία του κράματος της ίδιας κραματικής ομάδας. Το τελευταίο ψηφίο κωδικοποίησης χωρίζεται από τα προηγούμενα τρία με τελεία και δηλώνει τη μορφολογία του προϊόντος της χύτευσης [2].

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας για τα ελατά κράματα και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, που έχουν υποστεί τα κράματα. Η ανάλυση της κωδικοποίησης αυτής παρουσιάζεται στον Πίνακα 3 [2, 3].

**Πίνακας 3: Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminum Association, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί.**

Κωδικός	Κατεργασία
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για κράματα διαμόρφωσης
	H1X Μόνον ενδοτράχυνση (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης)
	H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας
	H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25 %
	H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50 %
	H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75 %
	H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100 %
	H19: Υπέρσκληρο κράμα
	H2X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
	H3X Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση
	T1 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.
	T2 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
	T3 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
	T4 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
	T5 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
	T6 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
	T7 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
	T8 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, θερμική κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
	T9 Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10 Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.	
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

### 1.3 Ελατά κράματα αλουμινίου

Ελατά κράματα (*wrought alloys*) ονομάζονται τα κράματα που μετά τη χύτευσή τους έχουν υποστεί κατεργασία διαμορφώσεως (έλαση, διέλαση, σφυρηλάτηση) στη μορφή με την οποία εμφανίζονται στο εμπόριο και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες [1].

#### Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1xxx

Η σειρά 1xxx αντιπροσωπεύει το εμπορικά καθαρό αλουμίνιο με 99.00 % ελάχιστη καθαρότητα. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων για τη σειρά 1xxx είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Τα κράματα της σειράς 1xxx είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και της θερμότητας και παρουσιάζουν καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες [2, 4]. Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι η κατασκευή χημικού εξοπλισμού και η κατασκευή συρμάτων και αγωγών ηλεκτρικού ρεύματος.

#### Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2xxx

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το χαλκό (*Al-Cu*). Ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2.6 – 6.3 %. Η σειρά 2xxx μπορεί να κατεργαστεί θερμικά και συνδυάζει σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλή αντοχή, ακαμψία και σε μερικές περιπτώσεις συνήθως κακή συγκολλησιμότητα [2]. Κάτω από ορισμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν έχει καλή αντοχή σε διάβρωση. Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών είχε ως αρχικό στόχο τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας [5]. Τα πιο ανθεκτικά κράματα της σειράς 2xxx κυρίως χρησιμοποιούνται για αεροσκάφη (2024) και για σασί φορτηγών (2014).

#### Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3xxx

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγγάνιο (*Al-Mn*). Η σειρά 3xxx υφίσταται σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, έχει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, εύκολη μορφοποίηση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα [4]. Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1xxx, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

Τα διάφορα κράματα της σειράς 3xxx χρησιμοποιούνται σε μορφή λαμαρίνας και σωλήνα, καθώς και για εναλλάκτες θερμότητας σε φορτηγά και εργοστάσια παραγωγής ρεύματος. Χαρακτηριστικά κράματα το 3003 και 3004. Το κράμα 3003 χρησιμοποιείται σε εναλλάκτες θερμότητας εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρισμού [6], ενώ αντίστοιχα το κράμα 3004 χρησιμοποιείται στα τενεκεδάκια των αναψυκτικών.

### Σειρά κραμάτων αλουμινίου 4xxx

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το πυρίτιο ( $Al-Si$ ). Η παρουσία του πυριτίου ελαττώνει το σημείο τήξης των κραμάτων της κατηγορίας αυτής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση των κραμάτων αυτών ως ηλεκτρόδια πλήρωσης σε εργασίες συγκόλλησης κομματιών αλουμινίου [2]. Επιπλέον τα κράματα της σειράς 4xxx παρουσιάζουν υψηλές τιμές ολκιμότητας που οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο.

Χαρακτηριστικά κράματα της σειράς 4xxx είναι τα κράματα 4032 και 4043. Το κράμα 4032 είναι ένα μέτριας προς υψηλής αντοχής κράμα, το οποίο μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία και χρησιμοποιείται κυρίως για σφυρήλατα προϊόντα και σε εφαρμογές όπως πιστόνια αεροσκαφών, ενώ το κράμα 4043 είναι ένα από τα πλέον γνωστά υλικά συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 6xxx για κατασκευές και εφαρμογές στα αυτοκίνητα [4, 7].

### Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5xxx

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο σε ποσοστά μικρότερα του 4 % ( $Al-Mg$ ). Όλα τα κράματα της σειράς 5xxx υφίστανται σκλήρυνση με ψυξηλασία και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή, εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση και μεγάλη ακαμψία ακόμη και σε κρύο περιβάλλον κοντά στους 0°C. Επιπλέον συγκολλούνται εύκολα με πολλές τεχνικές ακόμη και σε μεγάλα πάχη μέχρι 20 cm [4, 8].

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται ώστε να αποφεύγεται η χρήση κραμάτων σειράς 5xxx με  $Mg > 3$  %, σε εφαρμογές συνεχούς έκθεσης σε θερμοκρασίες άνω των 100°C. Τέτοια κράματα μπορεί να ευαισθητοποιηθούν σε διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνιστώνται κράματα σαν τα 5454 και 5754.

### Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6xxx

Πρόκειται για κράματα με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο και το πυρίτιο ( $Al-Mg-Si$ ). Τα κράματα της σειράς 6xxx μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση και πολύ καλή συγκολλησιμότητα [4, 9]. Αποτελούν τα κράματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται στη διέλαση για την παραγωγή προφίλ.

Χαρακτηριστικά κράματα της σειράς 6xxx είναι τα κράματα 6063 και 6061. Το κράμα 6063 ίσως είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο, λόγω της ικανότητας του για διέλαση και είναι το κράμα που έχει επιλέξει η Audi για το πλαίσιο των αυτοκινήτων της. Το κράμα 6061 με υψηλότερη αντοχή βρίσκει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές συνδεδεμένες με συγκολλήσεις όπως φορτηγά και βαγόνια τραίνου [10].

### **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7xxx**

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το ψευδάργυρο ( $Al-Zn$ ). Το ποσοστό του ψευδάργυρου κυμαίνεται από 4 – 8 %. Τα κράματα της σειράς 7xxx επιδέχονται θερμική κατεργασία και μεταξύ των διαφόρων κραμάτων οι τύποι  $Al-Zn-Mg-Cu$  έχουν τις μεγαλύτερες αντοχές μεταξύ όλων των κραμάτων αλουμινίου [2].

Η μεγαλύτερη εφαρμογή των σειρών 7xxx είναι στη βιομηχανία αεροσκαφών όπου απαιτούνται μεγάλες τιμές ακαμψίας και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Τα κράματα δεν παρουσιάζουν καλή συγκολλησιμότητα με τις κοινές μεθόδους και συνήθως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές με ήλους [4, 11]. Η αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση της σειράς 7xxx δεν είναι τόσο υψηλή όσο των σειρών 5xxx και 6xxx, και για αυτό το λόγο συνήθως επικαλύπτονται με στρώση από καθαρό αλουμίνιο.

### **Σειρά κραμάτων αλουμινίου 8xxx**

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με προσθήκη άλλων στοιχείων. Η σειρά 8xxx χρησιμοποιείται για τα κράματα με τα λιγότερα χρησιμοποιούμενα κραματικά στοιχεία όπως σίδηρος, νικέλιο και λίθιο ( $Fe, Ni, Li$ ) και μπορεί να υποστεί θερμική κατεργασία. Το καθένα χρησιμοποιείται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρέχει στο κράμα: τα  $Fe$  και  $Ni$  παρέχουν αντοχή με μικρή απώλεια ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ενώ το  $Li$  στο κράμα 8090 παρέχει εξαιρετικά υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, έτσι χρησιμοποιείται για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

## **1.4 Εφελκυσμός τεχνολογικών υλικών**

Ως εφελκυσμός [12] ορίζεται η μηχανική καταπόνηση ενός δοκιμίου, όταν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις  $F$  που είναι ίσες και αντίθετες, ενεργούν κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου και τείνουν να αυξήσουν το μήκος του.

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η πιο βασική μέθοδος προσδιορισμού της μηχανικής συμπεριφοράς των τεχνολογικών υλικών σε στατικές καταπονήσεις. Το μηχάνημα εφελκυσμού είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε, να προκαλεί την επιμήκυνση ενός δοκιμίου με αρχική διατομή  $A_0$  και αρχικό μήκος  $L_0$  με έναν σταθερό ρυθμό μέχρι την αστοχία του, να μετράει το φορτίο που εφαρμόζεται στο υλικό, καθώς επίσης και τις προκαλούμενες επιμηκύνσεις. Οι απολήξεις του δοκιμίου είναι συνήθως μεγαλύτερες, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια για την πάκτωση του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού αλλά και για την αποφυγή της αστοχίας του υλικού στην περιοχή της πάκτωσης. Τα δοκίμια εφελκυσμού είναι συνήθως ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. Η δοκιμασία εφελκυσμού διαρκεί μικρό χρόνο και είναι

καταστρεπτική, εφόσον το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και σπάει. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και η αντίστοιχη επιμήκυνση καταγράφονται και σχεδιάζεται η λεγόμενη καμπύλη τάσης εφελκυσμού – παραμόρφωσης. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή.

Ένα υλικό θεωρείται ότι είναι όλκιμο (*ductile*) όταν αστοχεί μετά από εκτεταμένη παραμόρφωση. Τα όλκιμα υλικά μπορούν να παραμορφώνονται πλαστικά και να αποταμιεύουν μεγάλες τιμές ελαστικής ενέργειας παραμορφώσεων ανά μονάδα όγκου έως τη θραύση τους. Αντίθετα, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως ψαθυρό (*brittle*) όταν αστοχεί σε πολύ μικρές παραμορφώσεις, δηλαδή όταν ξεφεύγει από τη γραμμική περιοχή [12].

### **1.5 Κόπωση τεχνολογικών υλικών**

Η μελέτη της κόπωσης ξεκίνησε από τον Γερμανό τεχνολόγο A. Wölher στα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Καθώς εργαζόταν στους γερμανικούς σιδηρόδρομους, προβληματίστηκε ιδιαίτερα από την αστοχία των αξόνων των σιδηροδρομικών βαγονιών μετά από ορισμένο χρόνο λειτουργίας και σε επιβαλλόμενα φορτία πολύ μικρότερα από τα υπολογισμένα επιτρεπόμενα φορτία. Ο άξονας ενός σιδηροδρομικού βαγονιού είναι ουσιαστικά μια κυλινδρική δοκός υποβαλλόμενη σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Ουσιαστικά στη δοκό αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις κατά μήκος της επάνω επιφάνειας και εφελκυστικές τάσεις κατά μήκος της κάτω επιφάνειας. Εάν ο άξονας προχωρήσει κατά μήκος της σιδηροτροχιάς κατά μισή περιστροφή, το επάνω μέρος του άξονα γίνεται τώρα κάτω και αντίστροφα. Επομένως, οι τάσεις σε ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας του υλικού μεταβάλλονται ημιτονοειδώς από εφελκυσμό σε θλίψη και πάλι πίσω. Αυτή η φόρτιση είναι γνωστή ως συμμετρική αντιστρεπτή καταπόνηση.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [13], ως *κόπωση* ορίζεται η προοδευτική, τοπική και μόνιμη αλλαγή στη δομή του υλικού που καταπονείται από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις και ενδέχεται να αστοχήσει σε τάσεις κάτω από το όριο διαρροής του.

Ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται το μεταλλικό υλικό διακρίνονται δυο κατηγορίες κόπωσης. Η κατηγορία κόπωσης σε μη ρηγματωμένο υλικό με την οποία θα ασχοληθεί η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία και η κατηγορία κόπωσης σε ήδη ρηγματωμένο υλικό. Κατά την κατηγορία κόπωσης σε μη ρηγματωμένο υλικό δεν υπάρχει κάποια προϋπάρχουσα ρωγμή σε αυτό. Αυτή η κατηγορία χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες ανάλογα με το χρόνο αστοχίας του υλικού, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις επιβαλλόμενες τάσεις στο υλικό: (α) στην πολυκυκλική κόπωση και (β) στην ολιγοκυκλική κόπωση.

Κατά την πολυκυκλική κόπωση (*high cycle fatigue* ή *HCF*) [14] οι επιβαλλόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής  $R_p$  του υλικού, ενώ η διάρκεια ζωής του υλικού κυμαίνεται από τους  $10^4$  έως περίπου  $10^6$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού. Παραδείγματα πολυκυκλικής κόπωσης είναι όλα τα συστήματα που περιστρέφονται ή δονούνται, όπως π.χ. τροχοί, άξονες.

Στην ολιγοκυκλική κόπωση (*low cycle fatigue* ή *LCF*) [14] το υλικό υπόκειται σε φορτίσεις με υψηλές τιμές τάσης, οι οποίες είναι μεγαλύτερες του ορίου διαρροής  $R_p$  του υλικού και επομένως αναμένονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Η διάρκεια ζωής του υλικού είναι σύντομη, και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει τους  $10^4$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού. Παραδείγματα ολιγοκυκλικής κόπωσης είναι τα στοιχεία που υπόκειται σε υπερφορτίσεις, π.χ. στον σεισμό.

Οι έντονες μηχανικές καταπονήσεις, αλλά και η παρουσία διαβρωτικών συνθηκών του περιβάλλοντος υποβοηθούν το φαινόμενο της κόπωσης με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία πολλών υλικών. Η βελτίωση της αντοχής σε κόπωση επιτυγχάνεται με τον καθαρισμό των επιφανειακών ατελειών με λείανση, καθώς και με επιφανειακή σκλήρυνση.

## 1.6 Κατασκευή πειραματικών καμπυλών κόπωσης

Πολύ πριν την κατασκευή των μικροσκοπίων υψηλής ευκρίνειας και τη μέθοδο για την επίβλεψη των ρωγμών των κατασκευών, οι μηχανικοί ανέπτυξαν εμπειρικούς τρόπους για να ποσοτικοποιήσουν τη διαδικασία της κόπωσης και να μπορέσουν να τη λάβουν υπόψη για τον σωστό και επαρκή σχεδιασμό των κατασκευαστικών εξαρτημάτων. Τα πιο σημαντικά τους επιτεύγματα είναι η κατασκευή των πειραματικών καμπυλών τάσης κόπωσης – κύκλων αστοχίας [15] (συχνά ονοματίζονται στη βιβλιογραφία ως καμπύλες  $S - N$ ). Ουσιαστικά πρόκειται για ένα διάγραμμα με κατακόρυφο άξονα το σταθερό εύρος επιβαλλόμενων τάσεων  $\Delta\sigma$  ή  $S$  (*stress*) και με οριζόντιο άξονα τους κύκλους φόρτισης  $N$  του δοκιμίου. Για την εξαγωγή μιας καμπύλης  $S - N$  απαιτούνται πάρα πολλές δοκιμές κόπωσης. Είναι αντιληπτό ότι αυξάνοντας το εύρος τάσης  $\Delta\sigma$  σε κόπωση, μειώνεται η διάρκεια ζωής  $N_f$  σε κύκλους φόρτισης και αντίστροφα.

Η στατιστική και η τυχαιότητα είναι αρκετά πολύπλοκη για τον υπολογισμό της καμπύλης  $S - N$  σε κόπωση. Για την κατασκευή μιας καμπύλης  $S - N$  με στατιστική εμπιστοσύνη είναι απαραίτητο να βρεθεί η διάρκεια ζωής σε κόπωση τουλάχιστον τριών δοκιμίων σε κάθε ένα από τρία διαφορετικά επίπεδα φορτίσεως. Γενικά δεν είναι αποδεκτό να πραγματοποιούνται δοκιμές κόπωσης σε υλικά με συχνότητες μεγαλύτερες από 30 Hz, λόγω της αδράνειας της μηχανής κόπωσης και της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας του υλικού. Στο εργαστήριο προτιμώνται οι συχνότητες 5 έως 30 Hz (κύκλοι φόρτισης ανά δευτερόλεπτο), και για να φτάσει το δοκίμιο στους

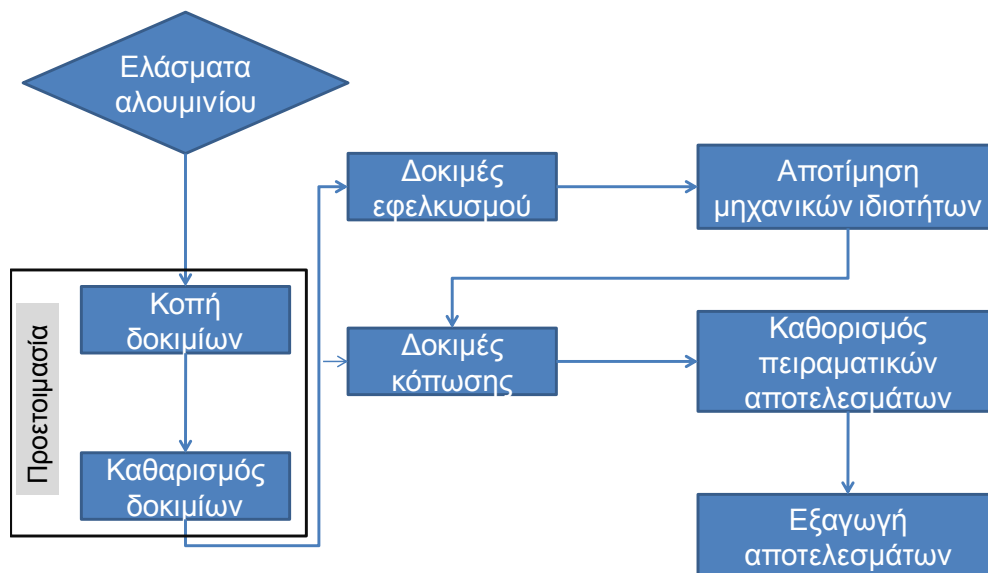
$10^7$  κύκλους καταπόνησης (τεχνητό όριο κόπωσης), σημαίνει ότι παίρνει από 5 έως 12 ημέρες συνεχούς καταπόνησης. Συνεπώς η κατασκευή μιας πλήρους καμπύλης κόπωσης  $S - N$  είναι μια δύσκολη και ακριβή διαδικασία.

## 2 Πειραματική διαδικασία

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να παρουσιάσει τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, να περιγράψει τα υλικά και τις πειραματικές διαδικασίες, και να παρουσιάσει τις πειραματικές σειρές που διεξήχθησαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων εφελκυσμού, καθώς και της επίδρασης της κόπωσης στη μηχανική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4.

### 2.1 Μεθοδολογία προσέγγισης

Η μεθοδολογία προσέγγισης περιελάμβανε αρχικά κοπή και επιφανειακό καθαρισμό με λείανση των πειραματικών δοκιμίων εφελκυσμού και κόπωσης σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Τα δοκίμια εφελκυσμού υπεβλήθησαν σε μηχανική δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8 και αποτιμήθηκαν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Στη συνέχεια τα δοκίμια κόπωσης υπεβλήθησαν σε μηχανική δοκιμή κόπωσης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E466. Τέλος, καθορίστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές και έγινε η καταγραφή τους, Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας προσέγγισης.

## 2.2 Κράμα αλουμινίου 2024-T3

Το κράμα αλουμινίου 2024-T3 αποτελεί το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό της αεροναυπηγικής βιομηχανίας λόγω των αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει και είναι το βασικό υλικό της ατράκτου των επιβατικών αεροσκαφών. Ανήκει στην κραματική σειρά 2xxx των ελατών κραμάτων αλουμινίου και στο κραματικό σύστημα αλουμινίου – χαλκού (Al-Cu). Το κράμα 2024-T3 παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως χαμηλή πυκνότητα και υψηλή σκληρότητα, υψηλή αντίσταση σε διάβρωση και είναι θερμικά κατεργάσιμο [2, 16].

Η αστοχία των μεταλλικών υλικών που οφείλεται σε κόπωση αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα τα τελευταία χρόνια και ακόμα και σήμερα αποτελεί αντικείμενο σε πολλές πειραματικές έρευνες. Σαν αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη μηχανική συμπεριφορά σε κόπωση του κράματος αλουμινίου 2024 [17-19]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχουν διεξαχθεί δοκιμές κόπωσης και έχει αξιολογηθεί η συμπεριφορά κόπωσης του κράματος αλουμινίου 2024-T351 σε ολιγοκυκλική κόπωση, όπου η διάρκεια ζωής του μη ρηγματωμένου υλικού είναι σύντομη και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει τους  $10^4$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού [20], και σε πολυκυκλική κόπωση όπου η διάρκεια ζωής του μη ρηγματωμένου υλικού κυμαίνεται από τους  $10^4$  έως περίπου  $10^6$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού [21]. Επιπλέον αρκετές μελέτες έχουν γίνει σε διαβρωμένα και μη διαβρωμένα δοκίμια, αποδεικνύοντας τη μεγάλη επίπτωση της διάβρωσης στην κόπωση και στη διάδοση της ρωγμής σε ρηγματωμένα κράματα αλουμινίου 2024 [22, 23].

Η χημική σύσταση του κράματος 2024 που ευρέθηκε στη βιβλιογραφία [24] παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. Τα κράματα της σειράς 2xxx μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία διαλυτοποίησης την οποία ακολουθεί διεργασία γήρανσης με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και της σκληρότητας του κράματος, με ταυτόχρονη μείωση της ολκιμότητας [21]. Ο συμβολισμός T3 χαρακτηρίζει τη θερμική κατεργασία στην οποία έχει υποβληθεί το κράμα και περιλαμβάνει θερμική κατεργασία στερεής διαλυτοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση, Πίνακας 5 [25].

**Πίνακας 4: Χημική σύσταση του κράματος 2024.**

Υλικό	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2024	0,50	0,50	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	Υπόλ.

Πίνακας 5: Θερμική κατεργασία του κράματος 2024-T3.

Υλικό	Θερμοκρασία διαλυτοποίησης	Ψύξη	Ψυχρή έλαση	Θερμοκρασία φυσικής γήρανσης	Θερμική κατεργασία
2024	495° C	0° C	Ναι	25 ° C (2μέρες)	T3

### 2.3 Κράμα αλουμινίου 2198-T351

Το κράμα αλουμινίου 2198-T351 ανήκει και αυτό στην κραματική σειρά 2xxx. Είναι ένα νέο σχετικά κράμα αλουμινίου με λίθιο (*Li*) που χρησιμοποιείται κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές. Το εν λόγω κράμα έχει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, παρουσιάζει καλή συγκολλησιμότητα και διαμορφωσιμότητα [26], καθώς και καλές εφελκυστικές ιδιότητες και ανοχή στη βλάβη [27]. Λόγω της προσθήκης του λιθίου (*Li*), η πυκνότητα του κράματος μειώνεται με αποτέλεσμα τη γενικότερη μείωση του βάρους μιας κατασκευής [26, 28]. Στην εργασία [26] εκτελέστηκαν δοκιμές σε δυο διαφορετικά θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου 2198 παρατηρώντας την πλαστική συμπεριφορά τους. Επιπρόσθετα, στην εργασία [29] εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης χαλκού στην αύξηση της αντοχής του υλικού, έτσι η φάση T1 όπως ονομάστηκε, θεωρείται ως μια από τις πιο σημαντικές φάσεις καθώς είναι υπεύθυνη για τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου κράματος.

Ο συμβολισμός T3 χαρακτηρίζει τη θερμική κατεργασία στην οποία έχει υποβληθεί το κράμα και περιλαμβάνει θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση. Ο συμβολισμός -51 δηλώνει ότι έχει επακολουθήσει κατάλληλη θερμική αποτακτική κατεργασία για την επάλειψη των τάσεων που δημιουργήθηκαν κατά τη διεργασία της έλασης [2]. Στον Πίνακα 6 δίνεται η χημική σύσταση του κράματος 2198 που ευρέθηκε στη βιβλιογραφία [26].

Πίνακας 6: Χημική σύσταση του κράματος 2198.

Υλικό	Cu	Li	Zn	Mn	Mg	Zr	Si	Ag	Fe	Al
2198	2.9-3.5	0.8-1.1	≤0.35	≤0.5	0.25-0.8	0.04-0.18	≤0.08	0.1-0.5	≤0.01	Υπόλ.

### 2.4 Κράμα αλουμινίου 6156-T4

Το κράμα 6156-T4 ανήκει στην κραματική σειρά 6xxx και στο κραματικό σύστημα αλουμινίου – μαγνησίου – πυριτίου (*Al-Mg-Si*) και πρόκειται για ένα κράμα αλουμινίου νέας

γενιάς. Τα κράματα της κραματικής αυτής σειράς είναι θερμικά κατεργάσιμα, έχουν σχετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που συνδυάζεται με άριστη αντοχή σε διάβρωση και συγκολλούνται εύκολα [2]. Επειδή το κράμα αλουμινίου 6156-T4 είναι καινούργιας γενιάς υλικό, η σχετική βιβλιογραφία είναι πάρα πολύ περιορισμένη. Στην εργασία [30] εξετάσθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας και της διάρκειας της θερμικής κατεργασίας στερεής διαλυτοποίησης στη δυσθραυστότητα του κράματος 6156, χρησιμοποιώντας τυποποιημένα δοκίμια εφελκυσμού με πλευρικές εγκοπές (δοκιμές κατά Kahn). Στην εργασία [31] διερευνήθηκε η συμπεριφορά σε κόπωση κραμάτων της ίδιας κραματικής σειράς, συγκεκριμένα των κραμάτων 6082-T6 και 6060-T6, τα οποία παρουσίασαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες της εν λόγω σειράς. Εφόσον η σχετική βιβλιογραφία για το κράμα 6156 είναι περιορισμένη, μπορούν να εξαχθούν αποτελέσματα από κράματα χύτευσης με παρόμοια χημική σύνθεση ( $Al-Mg-Si$ ) όπως π.χ. το κράμα A356. Μια πρόσφατη εργασία [32], διερεύνησε την κυκλική συμπεριφορά τάσης κόπωσης – παραμόρφωσης και την ολιγοκυκλική κόπωση του κράματος A356. Επιπλέον στην εργασία [33], μελετήθηκαν οι εφελκυστικές ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά της κυκλικής κόπωσης και η ζωή σε κόπωση του χυτού κράματος A356.

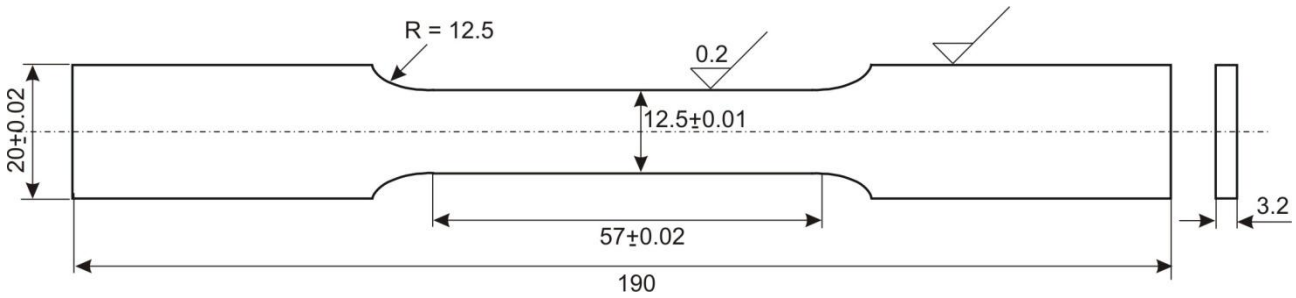
Ο συμβολισμός T4 χαρακτηρίζει τη θερμική κατεργασία στην οποία έχει υποβληθεί το κράμα και περιλαμβάνει θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση. Η χημική σύσταση του κράματος 6156 ευρέθηκε στη βιβλιογραφία [30] και δίνεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Χημική σύσταση του κράματος 6156.

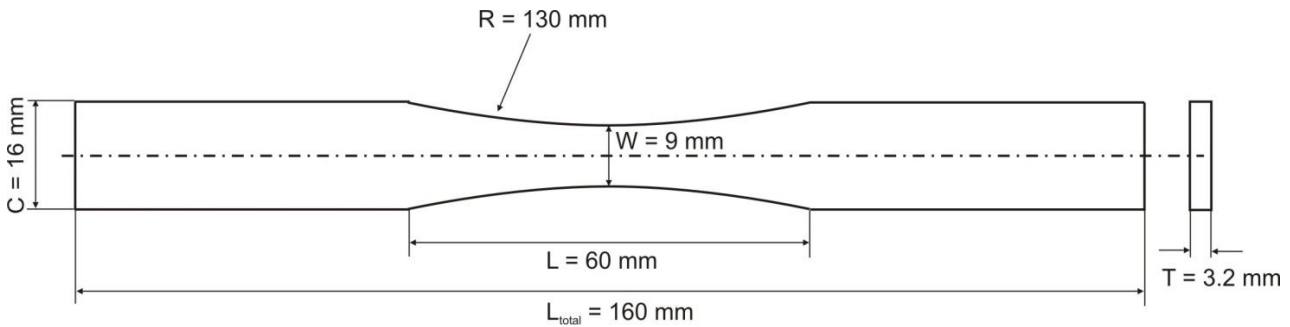
Υλικό	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
6156	0,7-1,3	<0,2	0,7-1,1	0,4-0,7	0,6-1,2	<0,25	0,1-0,7	Υπόλοιπο

## 2.5 Δοκίμια

Τα δοκίμια εφελκυσμού και κόπωσης που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της Διπλωματικής Εργασίας κατασκευάστηκαν από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM E8 [34] για εφελκυσμό και ASTM E466 [35] για κόπωση. Τα δοκίμια κόπηκαν στο μηχανουργείο της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας από ελάσματα που είχαν γεωμετρικές διαστάσεις 35 x 50 cm. Τα δοκίμια κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης (L) από ελάσματα ονομαστικού πάχους 3.2 mm για το κράμα αλουμινίου 2024-T3, 3.5 mm για το 6156-T4 και 1.56 mm για το 2198-T351. Η γεωμετρία των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν παρουσιάζεται στα Σχήμα 2 Σχήμα 3, αντίστοιχα. Συνολικά κόπηκαν 21 δοκίμια κόπωσης του κράματος αλουμινίου 2024-T3, 19 του κράματος αλουμινίου 6156-T4, 11 του κράματος αλουμινίου 2198-T351 και 6 δοκίμια εφελκυσμού αντίστοιχα για κάθε υλικό.



Σχήμα 2: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8.

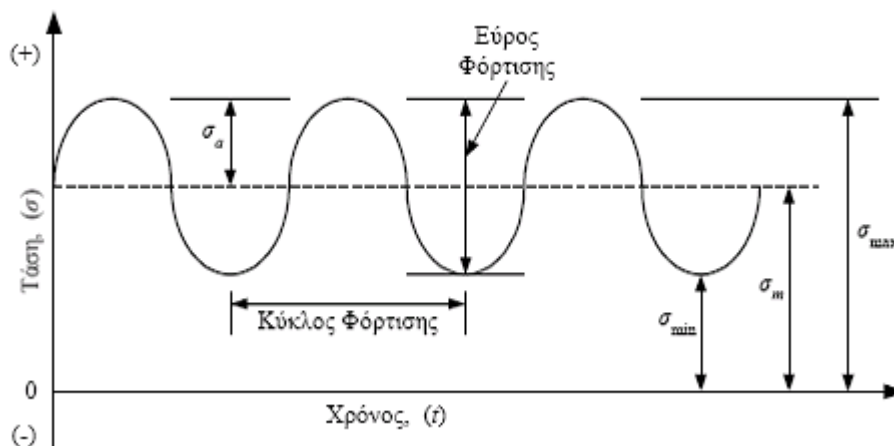


Σχήμα 3: Γεωμετρία δοκιμίου κόπωσης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E466.

## 2.6 Χαρακτηριστικά των δυναμικών καταπονήσεων

Οι μηχανικές δοκιμές κόπωσης επιβάλλονται για το χαρακτηρισμό της μηχανικής συμπεριφοράς είτε του υλικού της κατασκευής (δοκίμιο) είτε της ίδιας της κατασκευής (πλήρους κλίμακας). Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Airbus, η οποία υποβάλλει τα φτερά του αεροσκάφους σε δοκιμές πλήρους κλίμακας. Στο εργαστήριο συνηθέστερη είναι η μηχανική δοκιμή κόπωσης σε δοκίμια, τα οποία γεωμετρικά μπορεί να είναι επίπεδα ή κυλινδρικά.

Μια δυναμική καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δυο συνιστώσες, μια μέση ή σταθερή τάση  $\sigma_m$  και μια μεταβαλλόμενη τάση  $\sigma_a$ . Επίσης, στην ανάλυση μιας δυναμικής καταπόνησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το εύρος της τάσης  $\Delta\sigma$ . Στις περισσότερες δοκιμές στο Εργαστήριο οι επιβαλλόμενες τάσεις μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο, Σχήμα 4 [15].



Σχήμα 4: Ονοματολογία περιοδικών φορτίσεων.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κόπωσης είναι:

- Η μέγιστη  $\sigma_{\max}$  και ελάχιστη  $\sigma_{\min}$  τάση. (2.6.1)

- Το εύρος καταπόνησης  $\sigma_a$ , όπου  $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ . (2.6.2)

- Η μέση τιμή της καταπόνησης  $\sigma_m$ , όπου  $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$ . (2.6.3)

- Το πλάτος ή η μεταβολή της καταπόνησης  $\Delta\sigma$ , όπου  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2 \cdot \sigma_a$ . (2.6.4)

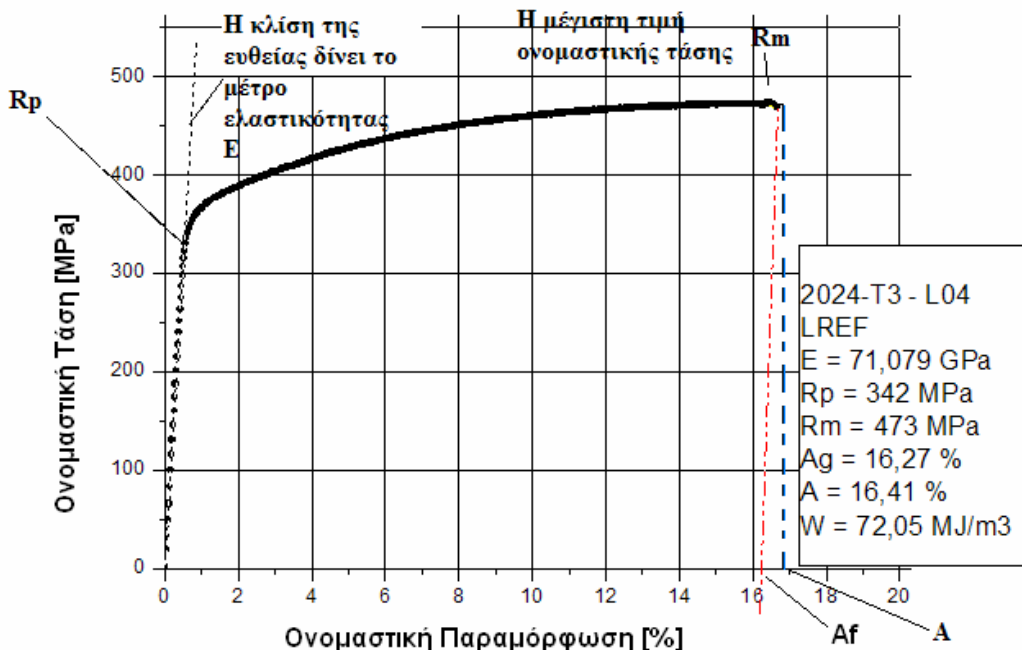
- Ο λόγος των τάσεων της καταπόνησης  $R$ , όπου  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ . (2.6.5)

## 2.7 Δοκιμές εφελκυσμού

Με τη διεξαγωγή δοκιμών εφελκυσμού σε δοκίμια προέκυψαν τα απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό της επίδρασης του εφελκυσμού στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8 [34]. Για τη διεξαγωγή τους χρησιμοποιήθηκε σερβο-υδραυλική μηχανή Instron του Εργαστηρίου Συνθέτων Υλικών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας με ικανότητα εφαρμογής μέγιστου εφελκυστικού φορτίου 100 kN. Σε όλες τις δοκιμές εφελκυσμού, ο ρυθμός μετατόπισης των αρπαγών της μηχανής εφελκυσμού διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0.3 mm/min. Η καταγραφή της επιμήκυνσης των υπό εξέταση δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κατάλληλου επιμηκυνσιομέτρου (*extensometer*). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όλα τα δεδομένα δύναμης, μετατόπισης των αρπαγών της μηχανής και παραμόρφωσης του επιμηκυνσιομέτρου καταγράφονταν και αποθηκεύονταν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο σημείο αυτό, για την καλύτερη εποπτεία των πειραματικών αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται συνοπτικά ο

τρόπος αποτίμησης των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων. Από τις πειραματικές τιμές δύναμης – μετατόπισης του μήκους αναφοράς του δοκιμίου, υπολογίζεται η καμπύλη ονομαστικών τάσεων – ονομαστικών παραμορφώσεων. Μια τυπική τέτοια καμπύλη παρουσιάζεται στο Σχήμα 5 που απεικονίζει τον τρόπο αποτίμησης των εφελκυστικών μηχανικών ιδιοτήτων.

Με βάση την καμπύλη ονομαστικών τάσεων – ονομαστικών παραμορφώσεων, προσδιορίζεται και η γενικότερη εφελκυστική συμπεριφορά του εκάστοτε υλικού.



Σχήμα 5: Καμπύλη ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων του δοκιμίου αναφοράς κράματος 2024-T3 στη διεύθυνση έλασης (L).

Με τη βοήθεια του Σχήματος 5 που παρουσιάζει μια τυπική εφελκυστική καμπύλη για το κράμα 2024-T3, αποτιμήθηκαν οι παρακάτω μηχανικές ιδιότητες [12]:

- Όριο αντοχής (*tensile strength*,  $R_m$ ): Ορίζεται ως η μέγιστη ονομαστική τάση που αναπτύσσεται στο υλικό πριν αυτό αστογήσει. Υπολογίζεται ως το πηλίκο του μέγιστου φορτίου  $P_{max}$  προς την αρχική διατομή του υλικού  $A_0$ . Το όριο αντοχής μετράται σε MPa.
- Όριο διαρροής (*yield strength*,  $R_p$ ): Ορίζεται ως το σημείο εκείνο στο οποίο δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες δεν μηδενίζονται με την απομάκρυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Επομένως οι πλαστικές παραμορφώσεις προκαλούν μόνιμες παραμορφώσεις. Το όριο διαρροής μετράται σε MPa.
- Παραμόρφωση θραύσης (*elongation at fracture*,  $A_f$ ): Ορίζεται ως το πηλίκο της μεταβολής του μήκους της περιοχής μέτρησης του εν λόγω δοκιμίου, προς το αρχικό μήκος αναφοράς ( $L_0$ ) και αποτελεί ένα μέτρο της ολκιμότητας (*ductility*) του υλικού. Σύμφωνα με το Σχήμα 5 αν από το σημείο θραύσης φέρουμε παράλληλη ως προς την

ελαστική περιοχή του υλικού, τότε το σημείο τομής αυτής της ευθείας με τον άξονα των ονομαστικών παραμορφώσεων δίνει την παραμόρφωση θραύσης. Η παραμόρφωση θραύσης είναι αδιάστατο μέγεθος ενώ συνήθως εκφράζεται ως επί τοις εκατό παραμόρφωση [%].

- Μέτρο ελαστικότητας (*modulus of elasticity, E*): Ορίζεται ως η κλίση της ευθείας που είναι εφαπτόμενη της καμπύλης ονομαστικών τάσεων – ονομαστικών παραμορφώσεων, στην ελαστική περιοχή. Το μέτρο ελαστικότητας μετράται σε GPa.

## 2.8 Δοκιμές κόπωσης

Τα απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό της επίδρασης της κόπωσης στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4 προέκυψαν με τη διεξαγωγή δοκιμών κόπωσης σε δοκίμια. Για τη διεξαγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 100 kN του Εργαστηρίου Συνθέτων Υλικών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας, που επιβάλλει στατικό φορτίο και συγχρόνως ένα ημιτονοειδές φορτίο σταθερού εύρους και σταθερής συχνότητας, Σχήμα 6. Οι δοκιμές κόπωσης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E466 [35] και υπό συνθήκες σταθερού εύρους τάσης (*constant amplitude tests*). Αρχικά το δοκίμιο τοποθετείται στις αρπάγες της μηχανής και ακολουθεί η ευθυγράμμιση του. Η ευθυγράμμιση του δοκιμίου κρίνεται απαραίτητη έτσι ώστε η επιβολή της εφαρμοζόμενης δύναμης να είναι αξονική κατά τον άξονα του δοκιμίου και να αποφευχθούν παρασιτικά φαινόμενα λόγω κάμψης. Στη συνέχεια τοποθετείται πάνω στο δοκίμιο κατάλληλο επιμηκυνσιόμετρο (*extensometer*), το οποίο και καταγράφει τις αλλαγές της παραμόρφωσης στη συγκεκριμένη επιφάνεια ελέγχου του δοκιμίου. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε ημιτονοειδής φόρτιση σταθερού εύρους τάσης με σταθερό λόγο τάσεων  $R = 0.1$ . Ο λόγος τάσεων υπολογίζεται σύμφωνα με  $R = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max})$  και η εν λόγω τιμή του είναι η συνηθέστερη στην αεροναυπηγική βιομηχανία. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν η εφαρμοζόμενη στατική δύναμη  $F_m$  και η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη συνιστώσα  $F_a$  ξεχωριστά για κάθε δοκίμιο. Οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν, καθώς και η συχνότητα φόρτισης τοποθετούνται στο πρόγραμμα του υπολογιστή έτσι ώστε να ξεκινήσει το πείραμα. Για την πιο γρήγορη διεξαγωγή των πειραμάτων η συχνότητα φόρτισης που εφαρμόστηκε σε όλα τα πειράματα ήταν ίση με 10 Hz. Στους κύκλους ζωής στους οποίους γινόταν καταγραφή των δεδομένων η συχνότητα μεταβαλλόταν στα 0.04 Hz για την πιο σωστή διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όλα τα δεδομένα χρόνου, δύναμης, μετατόπισης των αρπαγών της μηχανής και παραμόρφωσης του επιμηκυνσιόμετρου καταγράφονταν και αποθηκεύονταν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την ευκολότερη

αξιολόγηση των πειραμάτων, τα αποτελέσματα της δύναμης μετατράπηκαν σε τάση  $\sigma$ , η οποία και ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης  $F$  προς την αρχική επιφάνεια  $A$  των δοκιμίων και μετράται σε MPa. Τέλος, η αποτίμηση όλων των πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το εμπορικό πρόγραμμα Microcal Origin 6.0.



Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη λίγο πριν την έναρξη της δοκιμής κόπωσης.

## 2.9 Μελέτη επιφανειών θραύσης

Η μελέτη της επιφάνειας θραύσης επιλεγμένων δοκιμίων κόπωσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της συσκευής ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (*SEM*) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Sheffield Hallam στην Αγγλία και από τον Λέκτορα Δημήτριο Μηριούνη. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου JEOL JSM- 6100 με δυνατότητα μεγέθυνσης έως και χίλιες φορές ( $\times 1000$ ) και ονομαστικό φορτίο 25 kV. Η προετοιμασία των δοκιμίων αρχικά περιελάμβανε τον καθαρισμό της επιφάνειας από προϊόντα οξείδωσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια κόβονταν στο κατάλληλο μέγεθος (περίπου  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ). Για την παρατήρηση με *SEM* είναι απαραίτητο να εξασφαλισθεί η αγωγιμότητα του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της παρατήρησης. Για το λόγο αυτό στα κομμάτια των θραυσμένων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε γραφίτης. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνταν στον θάλαμο κενού του μικροσκοπίου για την παρατήρηση.

### **3 Πειραματικά αποτελέσματα**

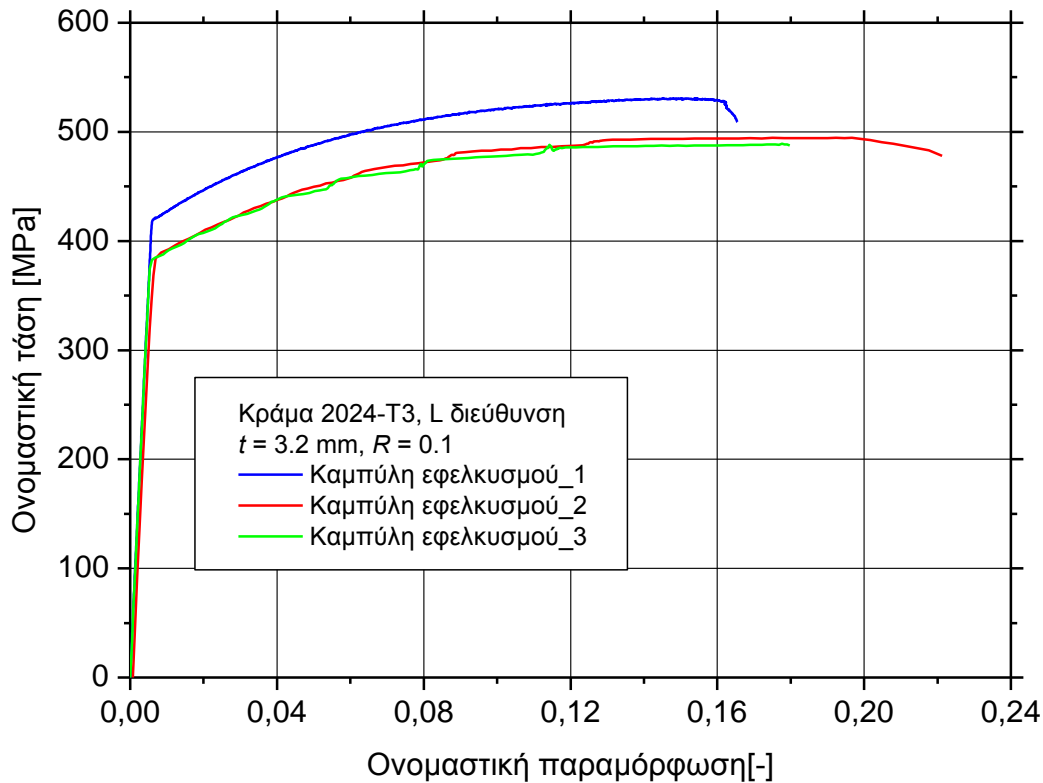
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού και κόπωσης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Τα εν λόγω αποτελέσματα θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της κόπωσης στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

#### **3.1 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού**

Από τα δεδομένα των δοκιμών εφελκυσμού για τα τρία υλικά σε δοκίμια κομμένα στη διεύθυνση της έλασης (L) είναι εφικτή η δημιουργία γραφημάτων, π.χ. τα Σχήματα 7, 8 και 9, όπου παρουσιάζονται οι τυπικές καμπύλες εφελκυσμού των τριών κραμάτων αλουμινίου, από τις οποίες γίνεται η αποτίμηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετημημένων αντιπροσωπεύει την ονομαστική παραμόρφωση (γραμμική κλίμακα), ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει την ονομαστική τάση (γραμμική κλίμακα).

##### **3.1.1 Υλικό 2024**

Οι αντιπροσωπευτικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το ελατό κράμα αλουμινίου 2024-T3, που προέκυψαν για τη διεύθυνση της έλασης (L), παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 7.



Σχήμα 7: Τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 2024-T3.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το Σχήμα 7, το εν λόγω υλικό παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας  $E$ , που υπολογίζεται σε τάξη μεγέθους από την κλίση της εφελκυστικής καμπύλης ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης μόνο για την ελαστική περιοχή. Επιπρόσθετα παρατηρείται ότι το υλικό παρουσιάζει μεγάλη παραμόρφωση θραύσης, που φαίνεται από το γεγονός ότι το υλικό αστοχεί στην πλαστική περιοχή παραμόρφωσης.

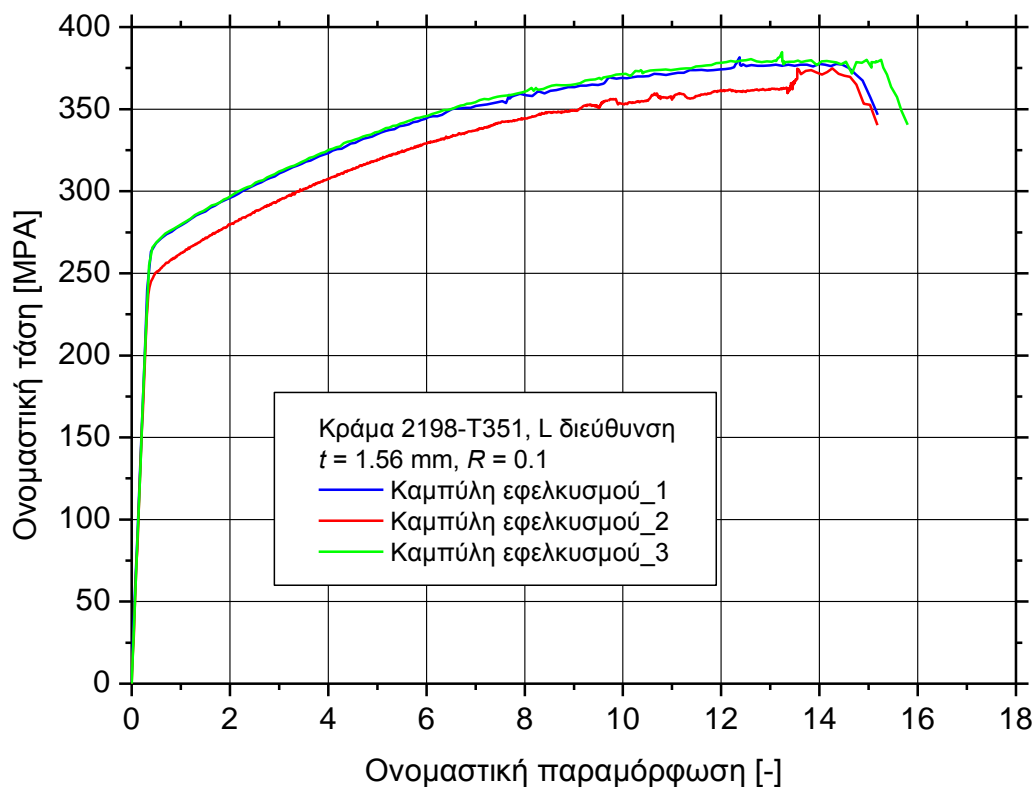
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2024-T3 που προσδιορίστηκαν από τη μέση τιμή των μετρήσεων τριών δοκιμίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2024-T3.

Υλικό 2024-T3	Όριο θραύσης $R_m$ [MPa]	Όριο διαρροής $R_p$ [MPa]	Παραμόρφωση θραύσης $A_f$ [%]	Μέτρο ελαστικότητας $E$ [GPa]	Πυκνότητα $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Μέση τιμή	490	389	18.10	69.76	2.78
Τυπική απόκλιση	±18.54	±25.9	±2.31	±2.7337	-

### 3.1.2 Υλικό 2198

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες εφελκυσμού για το ελατό κράμα αλουμινίου 2198-T351 και για τη διεύθυνση της έλασης (L).



Σχήμα 8: Τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 2198-T351.

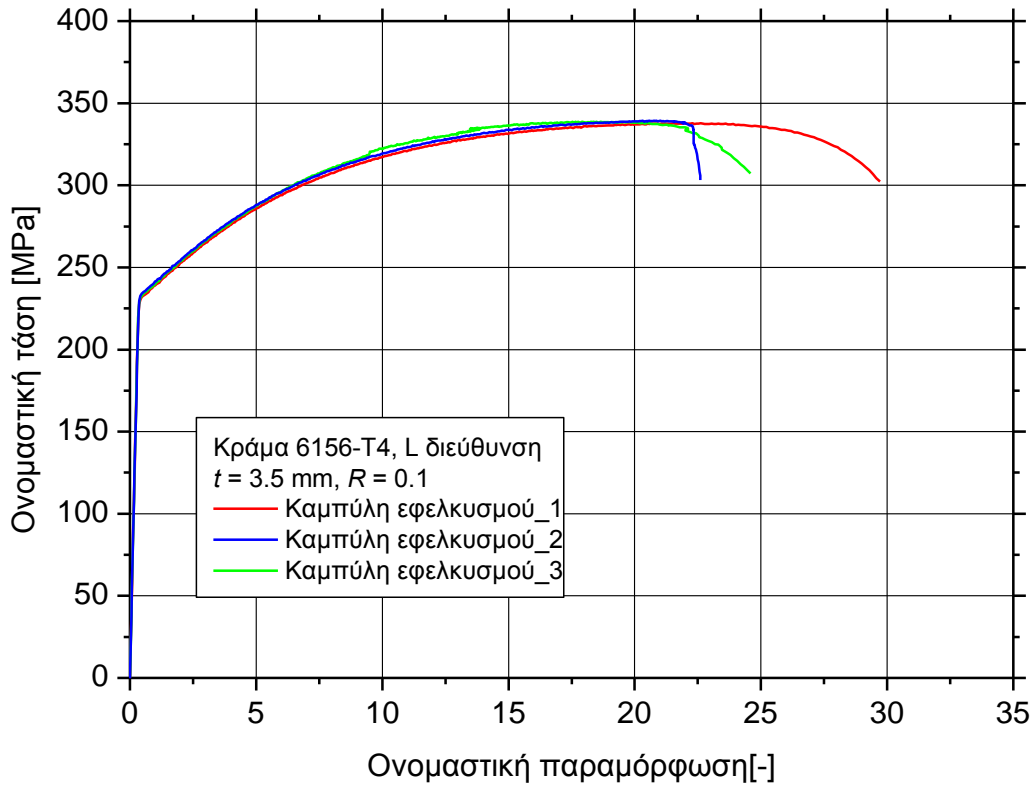
Το κράμα αλουμινίου 2198-T351 παρουσιάζει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το κράμα 2024-T3. Το εν λόγω κράμα παρουσιάζει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι την αστοχία του και το όριο αντοχής του υπολείπεται αρκετά από το κράμα 2024-T3. Στον Πίνακα 9 συνοψίζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 2198-T351 που προσδιορίστηκαν από το διάγραμμα αυτό.

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2198-T351.

Υλικό 2024-T3	Όριο θραύσης $R_m$ [MPa]	Όριο διαρροής $R_p$ [MPa]	Παραμόρφωση θραύσης $A_f$ [%]	Μέτρο ελαστικότητας $E$ [GPa]	Πυκνότητα $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Μέση τιμή	380	258	15.00	73.58	2.69
Τυπική απόκλιση	±3.74	±10.2	±0.3	±0.06	-

### 3.1.3 Υλικό 6156

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης εφελκυσμού για το ελατό κράμα αλουμινίου 6156-T4 για τη διεύθυνση της έλασης (L).



Σχήμα 9: Τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 6156-T4.

Το κράμα αλουμινίου 6156-T4 παρουσιάζει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, λίγο μικρότερο από το κράμα 2024-T3. Ακόμα παρουσιάζει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι την αστοχία του και το όριο αντοχής του υπολείπεται σημαντικά από τα όρια αντοχής των κραμάτων 2024-T3 και 2198-T351. Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού του κράματος αλουμινίου 6156-T4 που προσδιορίστηκαν από το διάγραμμα αυτό.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 6156-T4.

Υλικό 6156-T4	Όριο θραύσης $R_m$ [MPa]	Όριο διαρροής $R_p$ [MPa]	Παραμόρφωση θραύσης $A_f$ [%]	Μέτρο ελαστικότητας $E$ [GPa]	Πυκνότητα $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Μέση τιμή	338	231	23.76	67.58	2.72
Τυπική απόκλιση	±0.82	±0.00	±1.28	±0.32	-

### 3.2 Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης – Καμπύλες S-N

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές κόπωσης σταθερού εύρους τάσης που πραγματοποιήθηκαν για τα τρία υλικά σε δοκίμια κομμένα στη διεύθυνση της έλασης (L) αξιοποιήθηκαν για την κατασκευή των καμπύλων  $S - N$  των τριών κραμάτων. Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετημημένων αντιπροσωπεύει τους κύκλους κόπωσης για τη θραύση  $N_f$  (λογαριθμική κλίμακα), ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{max}$  κατά τη διάρκεια της δοκιμής (γραμμική κλίμακα).

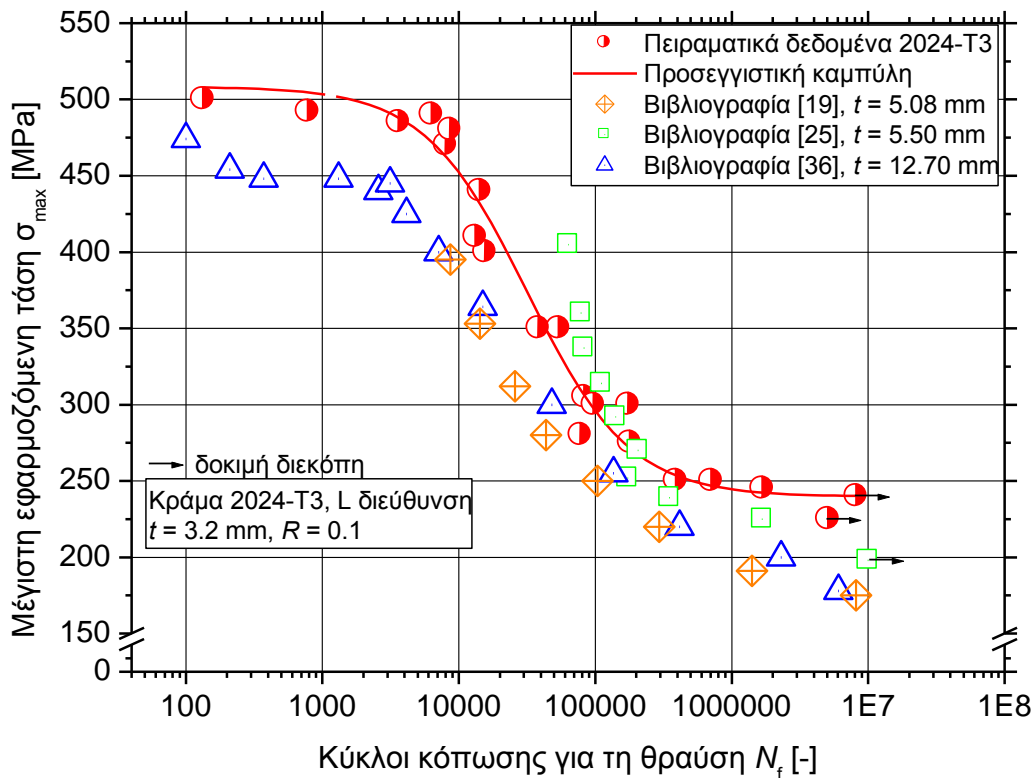
#### 3.2.1 Υλικό 2024

Στις πειραματικές σειρές που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν 21 δοκίμια του κράματος αλουμινίου 2024-T3 που είχαν κοπεί μηχανουργικά κατά τη διεύθυνση έλασης (L). Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται ο αύξων αριθμός, ο κωδικός δοκιμίου, η διεύθυνση κοπής, η μέγιστη τάση, οι κύκλοι αστοχίας καθώς και παρατηρήσεις για κάθε δοκίμιο. Στα δοκίμια 1 και 2 η δοκιμή διεκόπη, καθώς εξαιτίας της μικρής επιβαλλόμενης τάσης τα δοκίμια θα ήταν πολύ δύσκολο και χρονοβόρο να αστοχήσουν. Ακόμα η δοκιμή κόπωσης των δοκιμίων 11, 14, 16, 18, 19 και 20 έγινε χωρίς την καταγραφή μετρήσεων, καθώς τα δοκίμια αυτά ήταν απαραίτητα μόνο για την δημιουργία της καμπύλης  $S - N$ . Επομένως χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι κύκλοι αστοχίας τους.

Πίνακας 11: Δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια κράματος 2024-T3.

Υλικό	A/A	Κωδικός δοκιμίου	Διεύθυνση κοπής	Μέγιστη τάση [MPa]	Κύκλοι αστοχίας [-]	Παρατηρήσεις
Κράμα αλουμινίου 2024-T3	1	No12	L	225	5.108.110	Δοκιμή διεκόπη
	2	No14	L	240	8.216.386	Δοκιμή διεκόπη
	3	No05	L	245	1.682.661	-
	4	No08	L	250	709.261	-
	5	No10	L	250	390.829	-
	6	No11	L	275	180.037	-
	7	No07	L	280	78.441	-
	8	No09	L	300	175.873	-
	9	Fat03	L	300	97.611	-
	10	No06	L	305	83.313	-
	11	Fat01	L	350	53.930	Δοκιμή χωρίς μετρήσεις
	12	Fat02	L	350	38.416	-
	13	Fat08	L	400	15.626	-
	14	Fat04	L	410	13.231	Δοκιμή χωρίς μετρήσεις
	15	Fat05	L	440	14.279	-
	16	Fat06	L	470	8.071	Δοκιμή χωρίς μετρήσεις
	17	Fat07	L	480	8.660	-
	18	Fat09	L	485	3.636	-
	19	Fat10	L	490	6.350	Δοκιμή χωρίς μετρήσεις
	20	Fat11	L	490	786	-
	21	Fat12	L	500	134	-

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η καμπύλη κόπωσης  $S - N$  του κράματος αλουμινίου 2024-T3. Στο εν λόγω Σχήμα παρατηρείται ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση (δηλ. ο αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία) αυξάνεται όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Όπως φαίνεται στο γράφημα η πειραματική καμπύλη παρουσιάζει μια ήπια μετάβαση από τα 500 έως τα 470 MPa. Στη συνέχεια παρατηρείται μια έντονη γραμμική μετάβαση από τα 470 έως 250 MPa. Η έντονη μετάβαση από την περιοχή της ολιγοκυκλικής σε εκείνη της πολυκυκλικής κόπωσης αποτελεί τυπική συμπεριφορά για τα κράματα αλουμινίου. Η παρατηρούμενη ισχυρή εξάρτηση από την τάση έχει ως αποτέλεσμα μικρές μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση να οδηγούν σε μεγάλες μεταβολές στη διάρκεια ζωής των υλικών. Από τα 250 MPa και μετά η μετάβαση τείνει να γίνει σταθερή.



Σχήμα 10: Καμπύλες κόπωσης  $S-N$  του κράματος αλουμινίου 2024.

Στο γράφημα ακόμα παρουσιάζονται και άλλες καμπύλες  $S - N$  σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [19, 25, 36]. Στη βιβλιογραφία [25] για υλικό 2024-T351, ονομαστικό πάχος 5.5 mm και  $R = 0.1$ , παρατηρείται ότι η καμπύλη  $S - N$  συμπεριφέρεται ποιοτικά παρόμοια με το κράμα 2024-T3 με τη διαφορά ότι για τις ίδιες εφαρμοζόμενες τάσεις υπάρχει διάφορα ανάμεσα στους κύκλους αστοχίας των δυο υλικών. Επιπρόσθετα, στις βιβλιογραφίες [36] για υλικό 2024-T351, κυκλική διάμετρο 5.08 mm και 12.7 mm αντίστοιχα, και  $R = -1$ , οι καμπύλες  $S - N$  παρουσιάζουν ποιοτικά την ίδια συμπεριφορά με τη διαφορά ότι για τις ίδιες εφαρμοζόμενες τάσεις το εν λόγω υλικό αστοχεί σε χαμηλότερους κύκλους κόπωσης από τα κράμα 2024-T3. Η διαφορά ανάμεσα στα πειραματικά

αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, θεωρείται αποδεκτή καθώς υπαισέρονται και οι τυπικές αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων.

Σε μεταλλικά υλικά υψηλής τεχνολογικής σημασίας, υπάρχει μία χαρακτηριστική τιμή τάσης κάτω από την οποία η καμπύλη γίνεται οριζόντια. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρότερη από τη χαρακτηριστική τάση, τότε ουσιαστικά το υλικό έχει άπειρη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να μην υποστεί θραύση λόγω κόπωσης. Για αυτό και η τάση  $\sigma_e$  ονομάζεται όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση (*endurance limit*). Αυτό δε συμβαίνει στο κράμα αλουμινίου 2024-T3. Όπως φαίνεται στο παραπάνω γράφημα η καμπύλη δεν γίνεται οριζόντια σε καμία τάση, αλλά τείνει ασυμπτωτικά προς τον άξονα  $N_f$  όσο μειώνεται η εφαρμοζόμενη τάση. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται στο ότι τα κράματα με τη συγκεκριμένη συμπεριφορά πάντοτε έχουν μία πεπερασμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση, άσχετα με το πόσο μικρή είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Έστω και μετά από πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης, θα υποστεί αστοχία λόγω κόπωσης, ακόμα και για πολύ χαμηλές εναλλασσόμενες τάσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, για να μπορεί να ορισθεί μία τάση σαν αντοχή του υλικού σε κόπωση, έχει καθιερωθεί η χρήση της συμβατικής αντοχής σε κόπωση (*fatigue strength*). Η συμβατική αντοχή σε κόπωση είναι η τάση εκείνη, για την οποία το υλικό θα έχει μία προκαθορισμένη διάρκεια ζωής σε κόπωση.

Συμβατικό όριο κόπωσης (*fatigue limit*) στο γράφημα θεωρήθηκε οι  $5 \times 10^6$  κύκλοι καταπόνησης. Οι τιμές της μέγιστης τάσης κόπωσης για το συμβατικό όριο κόπωσης για λόγο τάσεων  $R = 0.1$  στο συγκεκριμένο γράφημα κυμαίνονται από 200 έως 240 MPa.

### 3.2.2 Υλικό 2198

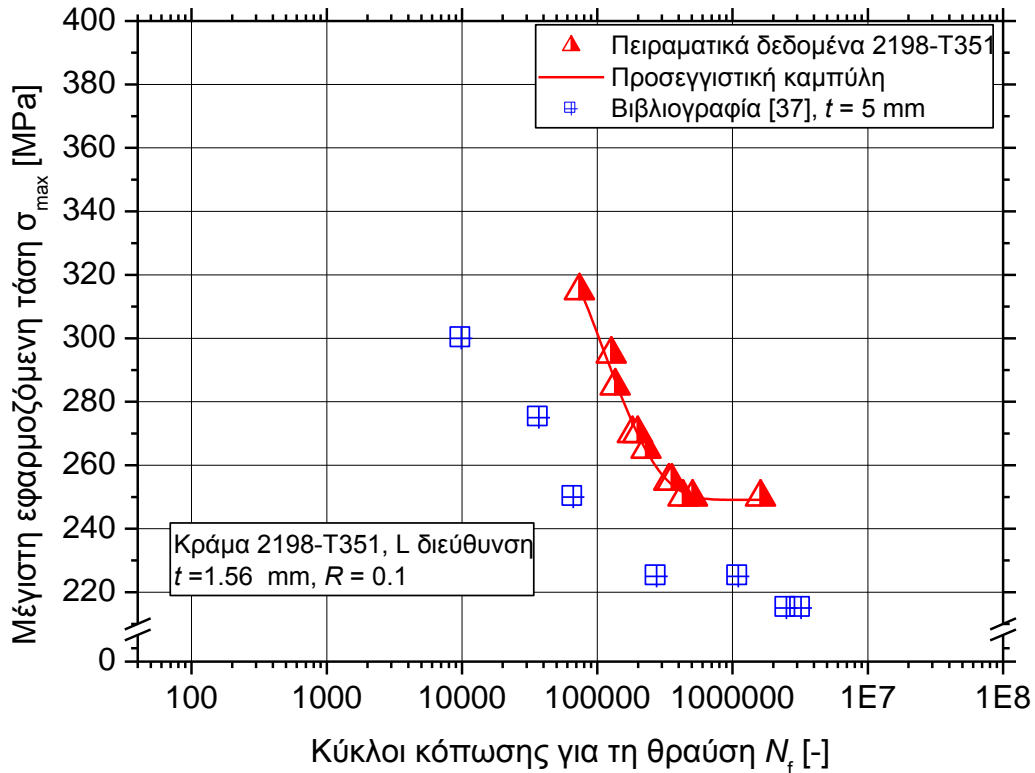
Για τις πειραματικές σειρές του κράματος αλουμινίου 2198-T351 που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν 11 δοκίμια που είχαν κοπεί μηχανουργικά κατά τη διεύθυνση έλασης (L). Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται ο αύξων αριθμός, ο κωδικός δοκιμίου, η διεύθυνση κοπής, η μέγιστη τάση, οι κύκλοι αστοχίας καθώς και παρατηρήσεις για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 12: Δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια κράματος 2198-T351.

Υλικό	A/A	Κωδικός δοκιμίου	Διεύθυνση κοπής	Μέγιστη τάση [MPa]	Κύκλοι αστοχίας [-]	Παρατηρήσεις
Κράμα αλουμινίου 2198-T351	1	No11	L	250	1.609.940	-
	2	No14	L	250	506.775	-
	3	No12	L	250	431.037	-
	4	No13	L	255	337.804	-
	5	No10	L	255	354.879	-
	6	No08	L	265	229.801	-
	7	No07	L	270	181.708	-
	8	No06	L	270	198.759	-
	9	No05	L	285	135.555	-
	10	No03	L	295	126.936	-
	11	No01	L	315	73.728	-

Οι αντίστοιχες μετρήσεις για το κράμα αλουμινίου 2198-T351 παρουσιάζονται στο Σχήμα 11. Αρχικά, όπως φαίνεται στο γράφημα η καμπύλη παρουσιάζει μια έντονη γραμμική μετάβαση από τα 315 έως τα 255 MPa. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο ότι το υλικό βρίσκεται στην περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης. Από τα 255 MPa και μετά η καμπύλη τείνει να σταθεροποιηθεί. Συμβατικό όριο κόπωσης (*fatigue limit*) θεωρήθηκε οι  $5 \times 10^6$  κύκλοι καταπόνησης. Η μέγιστη τάση κόπωση για το συμβατικό όριο κόπωσης για λόγο τάσεων  $R = 0.1$  στο συγκεκριμένο γράφημα είναι 250 MPa.

Στο γράφημα ακόμα παρουσιάζεται ακόμα μια καμπύλη  $S - N$  του κράματος αλουμινίου 2198-T351 για λόγο τάσεων  $R = 0.33$ , ονομαστικό πάχος 5 mm και θερμικής κατεργασία T8 σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [37], καθώς δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφία για το κράμα αλουμινίου 2198-T351. Όπως παρατηρείται και αυτή η καμπύλη παρουσιάζει έντονη γραμμική μετάβαση από τα 300 έως τα 215 MPa, ενώ μετά τα 215 MPa η καμπύλη τείνει να σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 11: Καμπύλες κόπωσης S-N του κράματος αλουμινίου 2198.

### 3.2.3 Υλικό 6156

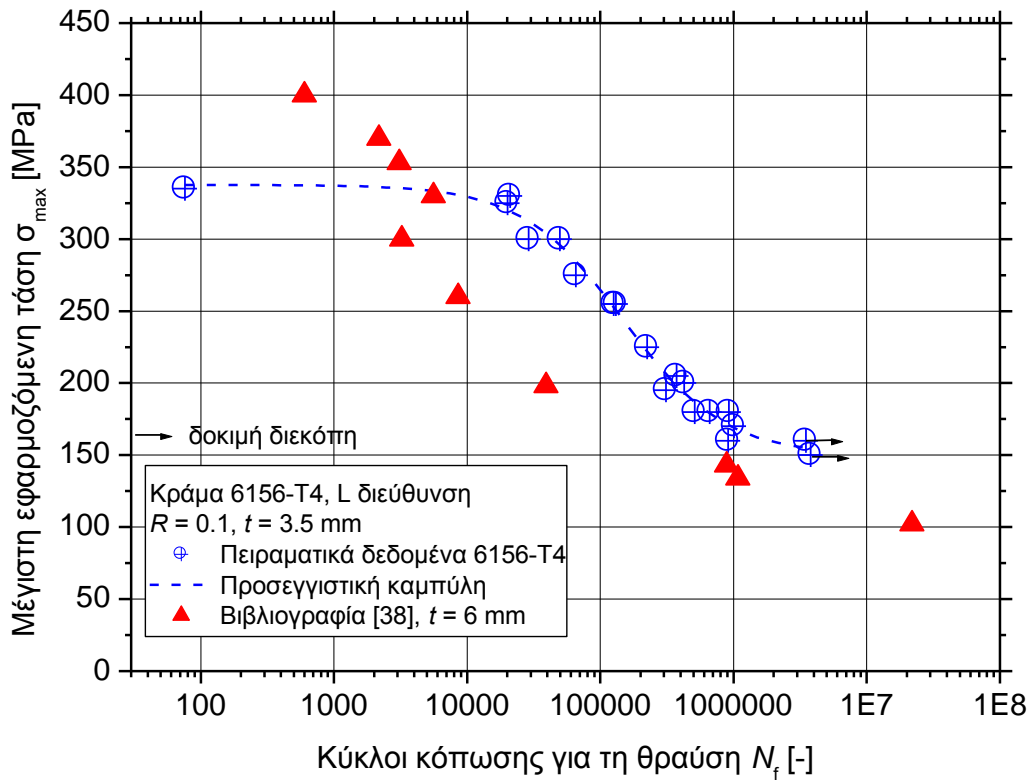
Στις πειραματικές σειρές που διεξήχθησαν, χρησιμοποιήθηκαν 19 δοκίμια του κράματος αλουμινίου 6156-T4 που είχαν κοπεί μηχανουργικά κατά τη διεύθυνση έλασης (L). Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται ο αύξων αριθμός, ο κωδικός δοκιμίου, η διεύθυνση κοπής, η μέγιστη τάση, οι κύκλοι αστοχίας καθώς και παρατηρήσεις για κάθε δοκίμιο. Στα δοκίμια 1 και 3 η δοκιμή διεκόπη, λόγω της μικρής επιβαλλόμενης τάσης όπως και στο κράμα 2024-T3. Ακόμα η δοκιμή κόπωσης των δοκιμίων 15 και 19 έγινε χωρίς την καταγραφή μετρήσεων καθώς τα δοκίμια αυτά ήταν απαραίτητα μόνο για την δημιουργία της καμπύλης S – N. Επομένως χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι κύκλοι αστοχίας τους.

Πίνακας 13: Δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια κράματος 6156-T4.

Υλικό	A/A	Κωδικός δοκιμίου	Διεύθυνση κοπής	Μέγιστη τάση [MPa]	Κύκλοι αστοχίας [-]	Παρατηρήσεις
Κράμα αλουμινίου 6156-T4	1	No04	L	150	3.800.750	Δοκιμή διεκόπη
	2	No11	L	160	912.027	-
	3	No07	L	160	3.486.680	Δοκιμή διεκόπη
	4	No09	L	170	1.004.160	-
	5	No06	L	180	511.004	-
	6	No05	L	180	924.667	-
	7	No13	L	180	661.289	-
	8	No12	L	195	310.202	-
	9	No03	L	200	424.774	-
	10	No08	L	205	373.766	-
	11	No10	L	225	224.494	-
	12	No02	L	255	130.950	-
	13	No01	L	255	125.809	-
	14	Fat02	L	275	65.510	-
	15	Fat03	L	300	49.696	Δοκιμή χωρίς μετρήσεις
	16	Fat01	L	300	28.916	-
	17	Fat04	L	325	20.071	-
	18	Fat06	L	330	21.010	-
	19	Fat05	L	335	76	Δοκιμή χωρίς μετρήσεις

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μετρήσεις για την καμπύλη  $S - N$  του κράματος αλουμινίου 6156-T4. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η καμπύλη  $S - N$  παρουσιάζει μια ήπια μετάβαση από τα 335 έως τα 300 MPa. Στη συνέχεια από τα 300 έως τα 170 MPa παρατηρείται μια έντονη γραμμική μετάβαση. Το γεγονός της έντονης μετάβασης από την περιοχή της ολιγοκυκλικής σε εκείνη της πολυκυκλικής κόπωσης πιθανότατα οφείλεται στην τυπική συμπεριφορά των κραμάτων αλουμινίου όπως ακριβώς συμβαίνει και με το υλικό 2024-T3. Συμβατικό όριο κόπωσης (*fatigue limit*) θεωρήθηκε οι  $5 \times 10^6$  κύκλοι καταπόνησης. Η τιμή της μέγιστης τάσης κόπωσης για το συμβατικό όριο κόπωσης για λόγο τάσεων  $R = 0.1$  είναι 150 MPa.

Στο γράφημα ακόμα παρουσιάζεται ακόμα μια καμπύλη  $S - N$  του κράματος αλουμινίου 6082-T6 με ονομαστικό πάχος 6 mm και θερμική κατεργασία T6 σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [38], καθώς δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφία για το κράμα αλουμινίου 6156-T4. Όπως παρατηρείται η καμπύλη παρουσιάζει έντονη γραμμική μετάβαση από τα 400 έως τα 140 MPa. Από τα 140 MPa και μετά η καμπύλη τείνει να σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 12: Καμπύλες κόπωσης S-N του κράματος αλουμινίου 6156.

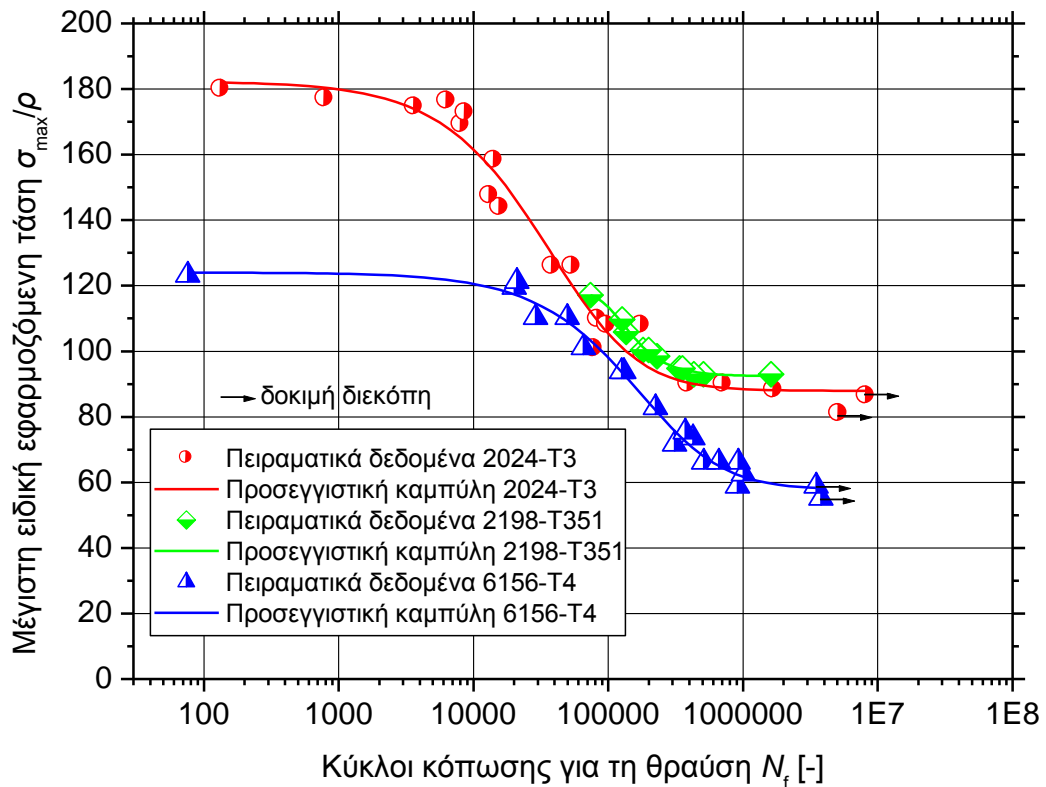
### 3.3 Ειδικές μηχανικές ιδιότητες

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις ειδικές μηχανικές ιδιότητες και των τριών κραμάτων. Με τον όρο ειδικές εννοείται ο λόγος των μηχανικών ιδιοτήτων προς την πυκνότητα του κάθε κράματος αντίστοιχα. Ο λόγος ελαστικότητας προς το βάρος των κραμάτων αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα αεροσκάφη είναι ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες. Γι' αυτό το λόγο σύμφωνα με τον Πίνακα 14 ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο λόγος ελαστικότητας προς το βάρος του κράματος 2198-T351, καθώς είναι μεγαλύτερος από το λόγο των άλλων δυο κραμάτων.

Πίνακας 14: Ειδικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4.

Υλικό	Ειδικό όριο θραύσης $R_m/\rho$	Ειδικό όριο διαρροής $R_p/\rho$	Ειδικό μέτρο ελαστικότητας $E/\rho$
2024-T3	176	139	25.09
2198-T351	141	95	27.35
6156-T4	124	84	24.84

Στο Σχήμα 13 απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα των ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων και των τριών ελατών κραμάτων αλουμινίου σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τεταγμένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ειδική εφαρμοζόμενη τάση του κάθε υλικού αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της δοκιμής (γραμμική κλίμακα), ενώ ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει τους κύκλους κόπωσης για τη θραύση  $N_f$  (λογαριθμική κλίμακα).



Σχήμα 13: Μέγιστη ειδική εφαρμοζόμενη τάση έναντι των κύκλων κόπωσης για τη θραύση για τα κράματα αλουμινίου 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 13 η καμπύλη του κράματος 2198-T351 είναι ελαφρά μετατοπισμένη προς τα πάνω σε σχέση με τα άλλα δυο κράματα στην περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης. Συγκεκριμένα είναι περίπου κατά 5 με 10 MPa υψηλότερη του 2024-T3. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς από τον Πίνακα 14 παρατηρείται ότι ο λόγος ελαστικότητας προς το βάρος του κράματος 2198-T351 είναι μεγαλύτερος από το λόγο των άλλων δυο κραμάτων.

### 3.4 Συμπεριφορά στην περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης

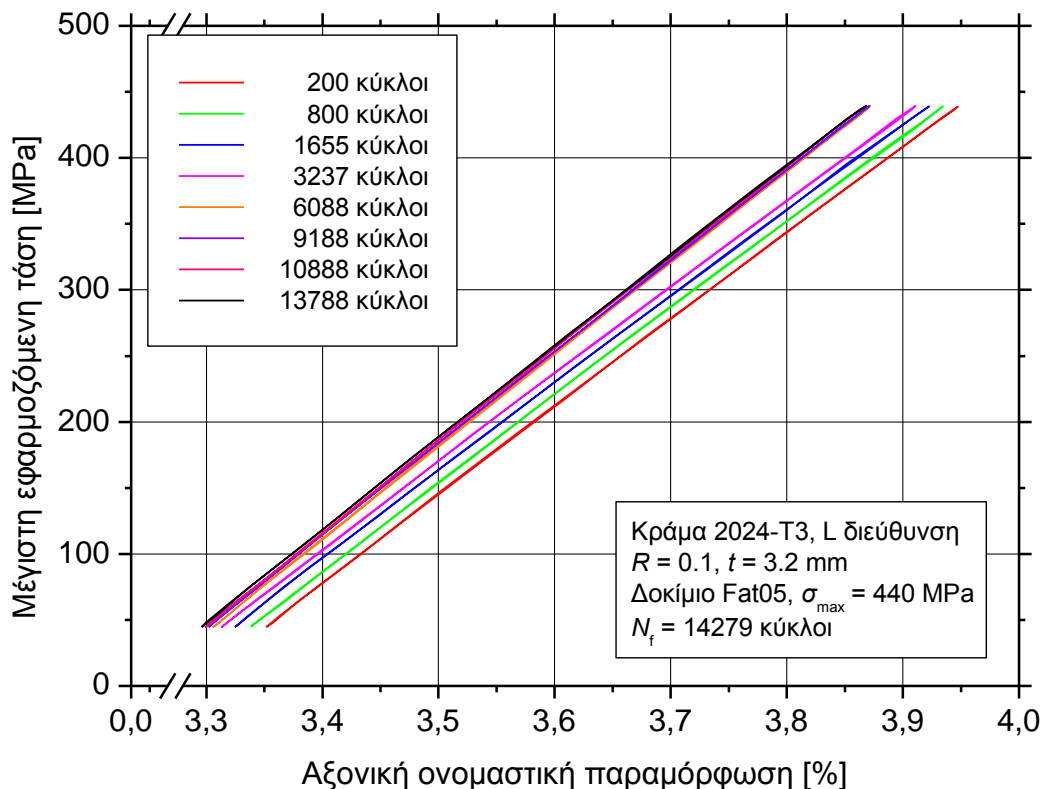
Στην περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης η διάρκεια ζωής του μη ρηγματωμένου υλικού είναι σύντομη, και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει τους  $10^4$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού [14]. Το υλικό υπόκειται σε φορτίσεις με υψηλές τιμές τάσης, οι οποίες είναι

μεγαλύτερες του ορίου διαρροής  $R_p$  του υλικού και επομένως αναμένονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Παραδείγματα καταπονήσεων με υψηλή τιμή εύρους τάσης είναι τα κατασκευαστικά στοιχεία που υπόκεινται σε υπερφορτίσεις, π.χ. ο σεισμός.

Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει την αξονική ονομαστική παραμόρφωση (γραμμική κλίμακα) ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{max}$  κατά τη διάρκεια της δοκιμής (γραμμική κλίμακα).

### 3.4.1 Υλικό 2024

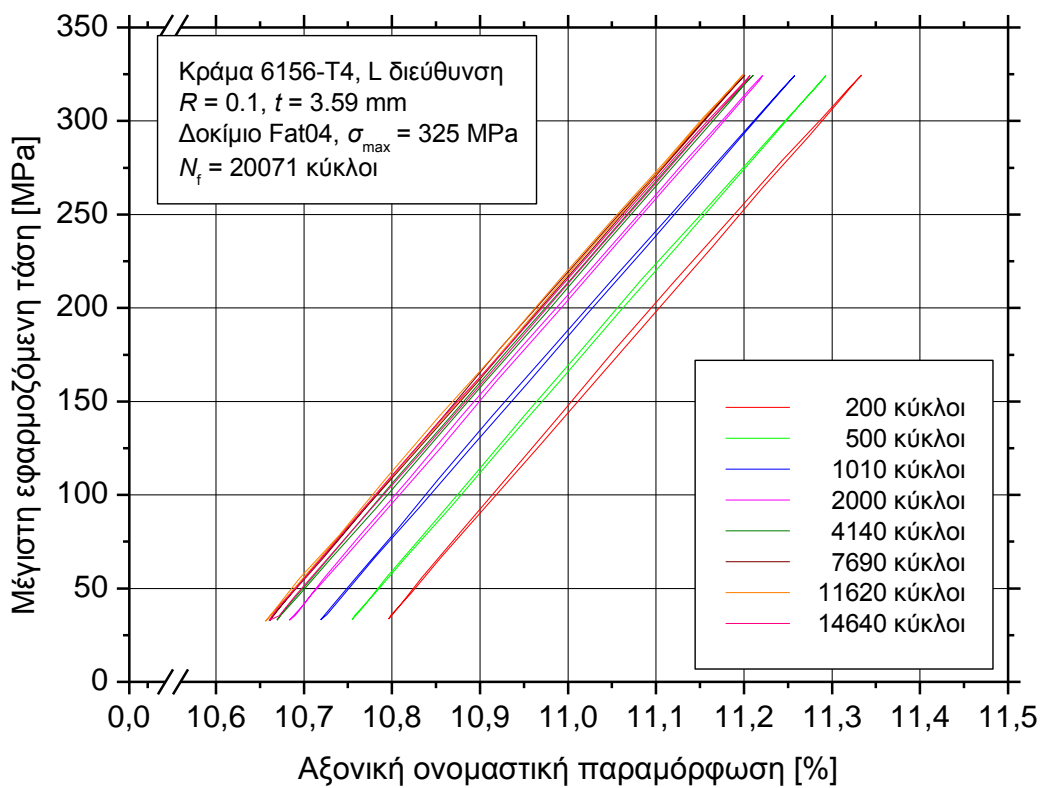
Στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του κράματος αλουμινίου 2024-T3 σε περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης. Στο πείραμα αυτό η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση του υλικού είναι  $\sigma_{max} = 440$  MPa, ο κωδικός δοκιμίου Fat05 και οι κύκλοι για τη θραύση του υλικού είναι  $N_f = 14.279$ . Όπως παρατηρείται η αξονική ονομαστική παραμόρφωση μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του υλικού. Ακόμα στο γράφημα φαίνεται ότι στα αρχικά στάδια καταπόνησης η παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη, ενώ όσο πλησιάζει στους κύκλους αστοχίας η παραμόρφωση είναι σχεδόν η ίδια.



Σχήμα 14: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 2024-T3 σε περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης.

### 3.4.2 Υλικό 6156

Οι αντίστοιχες μετρήσεις για τη συμπεριφορά του κράματος αλουμινίου 6156-T4 σε περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 15. Στο εν λόγω πείραμα η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση είναι  $\sigma_{\max} = 325$  MPa, ο κωδικός δοκιμίου Fat04 και το υλικό αστοχεί στους 20.071 κύκλους καταπόνησης. Όπως και για το κράμα αλουμινίου 2024-T3 η αξονική ονομαστική παραμόρφωση μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του υλικού. Ακόμα παρατηρείται ότι στα αρχικά στάδια καταπόνησης οι τιμές που λαμβάνει η παραμόρφωση είναι μεγαλύτερες από αυτές του κράματος 2024-T3, ενώ όσο πλησιάζει στους κύκλους αστοχίας η παραμόρφωση είναι σχεδόν η ίδια.



Σχήμα 15: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 6156-T4 σε περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης.

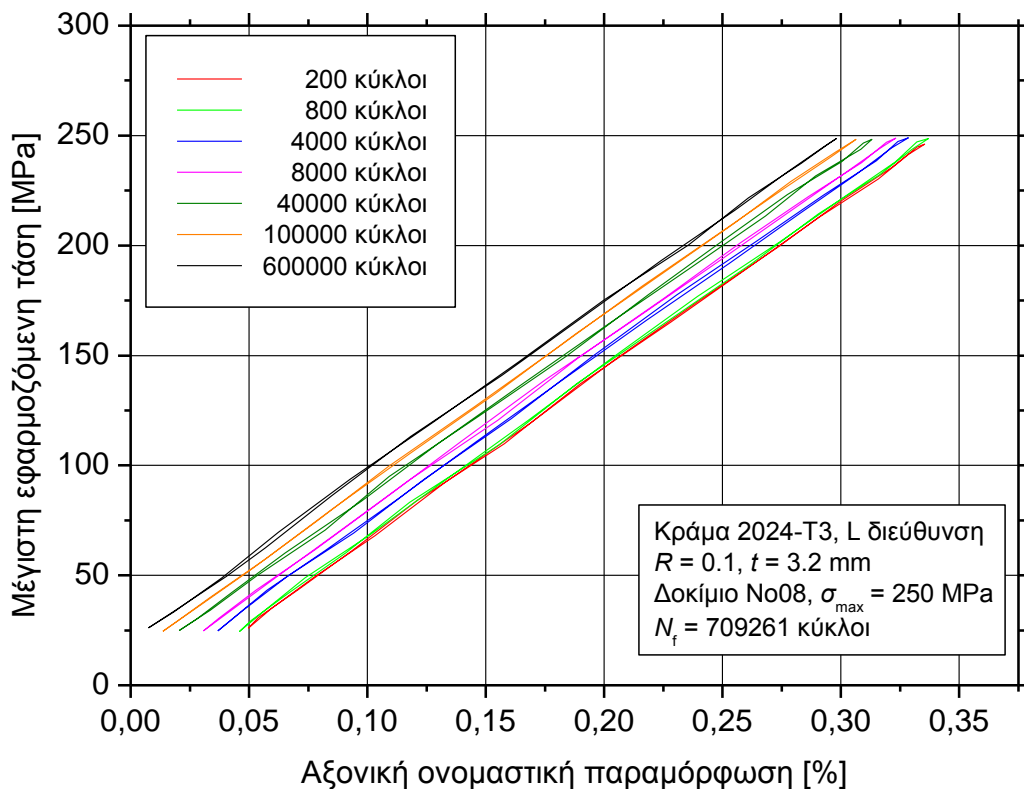
### 3.5 Συμπεριφορά στην περιοχή με μεσαία ή χαμηλή τιμή εύρους τάσης

Στην περιοχή με μεσαία ή χαμηλή τιμή εύρους τάσης η διάρκεια ζωής του μη ρηγματωμένου υλικού κυμαίνεται από τους  $10^4$  έως περίπου  $10^6$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού [14]. Οι επιβαλλόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής  $R_p$  του υλικού. Παραδείγματα υψηλής τιμής εύρους τάσης είναι όλα τα συστήματα που περιστρέφονται ή δονούνται, όπως π.χ. τροχοί, άξονες, κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών εσωτερικής καύσης.

Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει την αξονική ονομαστική παραμόρφωση (γραμμική κλίμακα) ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{\max}$  κατά τη διάρκεια της δοκιμής (γραμμική κλίμακα).

### 3.5.1 Υλικό 2024

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του κράματος αλουμινίου 2024-T3 σε περιοχή με μεσαία τιμή εύρους τάσης. Όπως παρατηρείται η αξονική ονομαστική παραμόρφωση μειώνεται σταθερά όσο αυξάνεται η διάρκεια ζωής του υλικού. Ακόμα φαίνεται στο γράφημα ότι το εύρος τιμών της παραμόρφωσης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο σε υψηλά φορτία κόπωσης. Στο πείραμα αυτό η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση του υλικού είναι  $\sigma_{\max} = 250$  MPa, ο κωδικός δοκιμίου No08 και οι κύκλοι για τη θραύση του είναι  $N_f = 709.261$ .

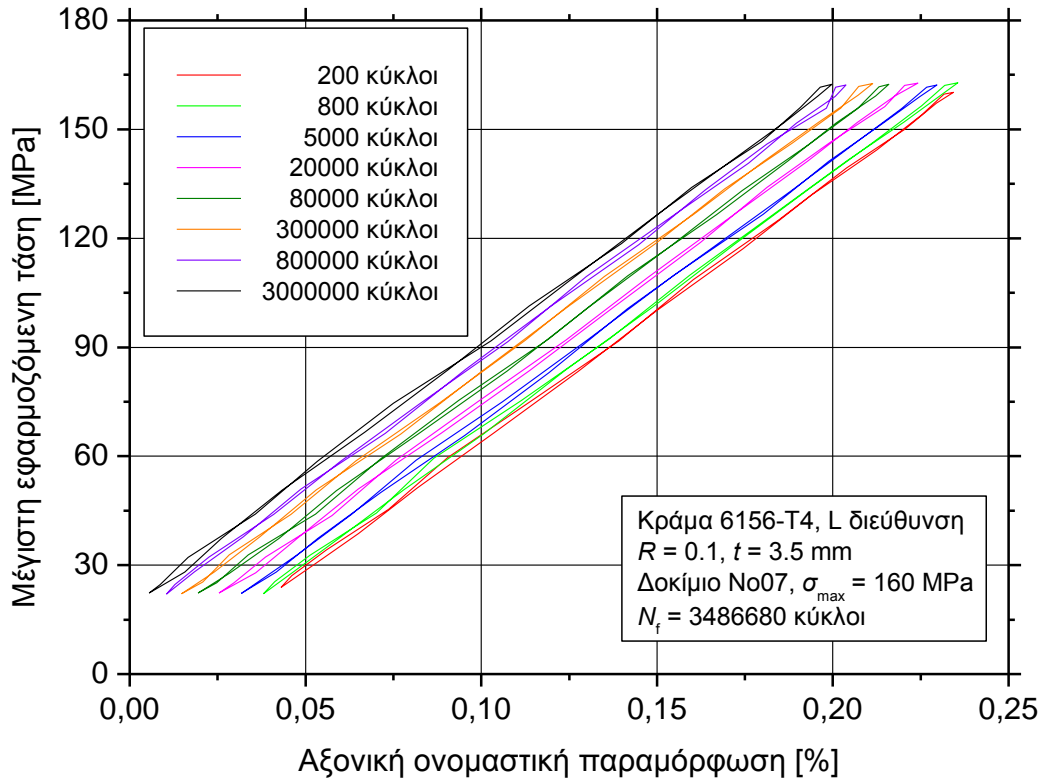


Σχήμα 16: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 2024-T3 σε περιοχή με μεσαία τιμή εύρους τάσης.

### 3.5.2 Υλικό 6156

Οι αντίστοιχες μετρήσεις για τη συμπεριφορά του κράματος αλουμινίου 6156-T4 στην περιοχή με χαμηλή τιμή εύρους τάσης απεικονίζονται στο Σχήμα 17. Στο εν λόγω πείραμα ο κωδικός δοκιμίου είναι No07, η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση καταπόνησης του υλικού  $\sigma_{\max} = 160$  MPa, και το υλικό αστοχεί στους 3.486.680 κύκλους καταπόνησης. Όπως και για το κράμα

αλουμινίου 2024-T3 η αξονική ονομαστική παραμόρφωση μειώνεται σταθερά όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του υλικού. Ακόμα σε αυτό το γράφημα παρατηρείται ότι το εύρος τιμών της παραμόρφωσης είναι μικρό πιθανότατα λόγω της τυπικής συμπεριφοράς για το συγκεκριμένο κράμα αλουμινίου.



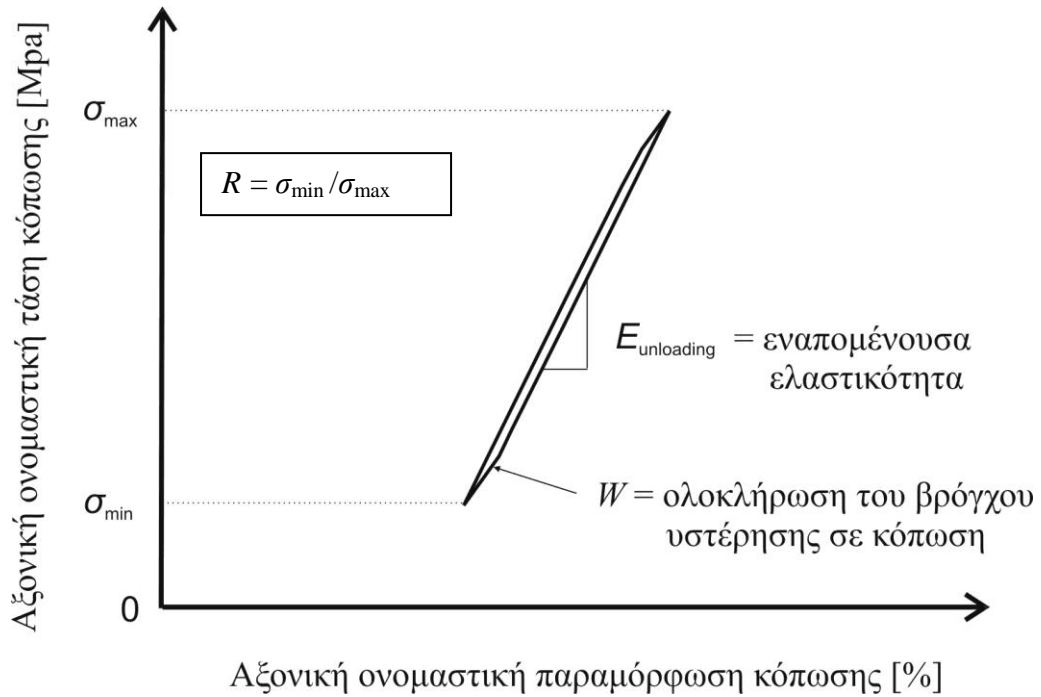
Σχήμα 17: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 6156-T4 σε περιοχή με χαμηλή τιμή εύρους τάσης.

## 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών κόπωσης που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Τα εν λόγω αποτελέσματα θα αξιοποιηθούν στη συνέχεια για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της κόπωσης στις μηχανικές ιδιότητες που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

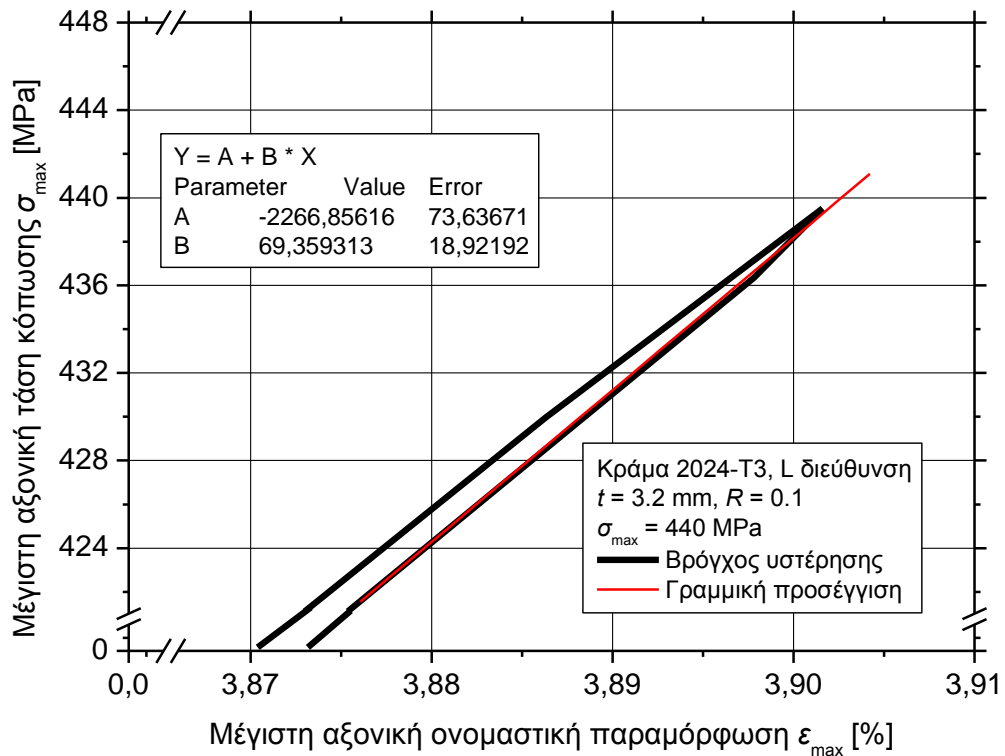
### 4.1 Εναπομένουσα ελαστικότητα

Κάθε υλικό σώμα με την άσκηση μηχανικής τάσης, δηλαδή δύναμης ανά μονάδα διατομής, παραμορφώνεται. Για μικρές τάσεις η παραμόρφωση είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται. Ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση σε κάθε σώμα είναι σταθερός και ονομάζεται μέτρο ελαστικότητας [12]. Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το υλικό που παραμορφώνεται και τη φύση της παραμόρφωσης. Ως εναπομένουσα ελαστικότητα  $E_{un}$  (*stiffness of fatigue loop during unloading*) ορίζεται το μέτρο ελαστικότητας στην αποφόρτιση του δοκιμίου και μετράται σε GPa. Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται η μεθοδολογία αποτίμησης της εναπομένουσας ελαστικότητας σε έναν τυπικό βρόγχο μέγιστης τάσης κόπωσης – παραμόρφωσης. Η εναπομένουσα ελαστικότητα υπολογίζεται ως η κλίση της ευθείας τάσεων – παραμορφώσεων και μετράται σε GPa. Για τον καλύτερο υπολογισμό της εναπομένουσας ελαστικότητας δεν επιλέγεται ο κλάδος φόρτισης καθώς υπάρχουν παρασιτικά φαινόμενα όπως αδράνεια της μηχανής, φαινόμενα συναρμογής κτλ. Επιπλέον, είναι εφικτός ο υπολογισμός της απορροφούμενης ενέργειας  $W$  ανά κύκλο κόπωσης ολοκληρώνοντας το βρόγχο μέγιστης τάσης κόπωσης – αξονικής παραμόρφωσης.



**Σχήμα 18:** Μεθοδολογία αποτίμησης εναπομένουσας ελαστικότητας  $E_{un}$  και απορροφούμενης ενέργειας  $W$  ανά κύκλο κόπωσης.

Στο σημείο αυτό, για την καλύτερη εποπτεία των πειραματικών αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα υπολογισμού της εναπομένουσας ελαστικότητας στην αποφόρτιση για μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{\max} = 440 \text{ MPa}$ , Σχήμα 19. Στον άνω πίνακα του γραφήματος αναγράφεται η εναπομένουσα ελαστικότητα μετά τη διεξαγωγή της γραμμικής προσέγγισης στον κλάδο της αποφόρτισης.



**Σχήμα 19: Βρόγχος υστέρησης ενός κύκλου κόπωσης και μεθοδολογία υπολογισμού της εναπομένουσας ελαστικότητας στον κλάδο αποφόρτισης.**

Τα πειραματικά αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει το ποσοστό βλάβης – κόπωσης (γραμμική κλίμακα), ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει την εναπομένουσα ελαστικότητα ανά κύκλο κόπωσης (γραμμική κλίμακα). Ως ποσοστό βλάβης – κόπωσης ορίζεται ο λόγος επί τις % του τρέχοντος κύκλου καταπόνησης ως προς τους κύκλους αστοχίας του ίδιου δοκιμίου. Σύμφωνα με τον κανόνα του Miner (*Palagren – Miner’s rule*) [39] κάθε κύκλος ή σύνολο κύκλων υπό συγκεκριμένο κοπωτικό φορτίο, συνεισφέρει στη συνολική βλάβη ένα ποσό ίσο προς το κλάσμα της κοπωτικής ζωής που διανύθηκε υπό το φορτίο αυτό.

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = D \tag{4.1.1}$$

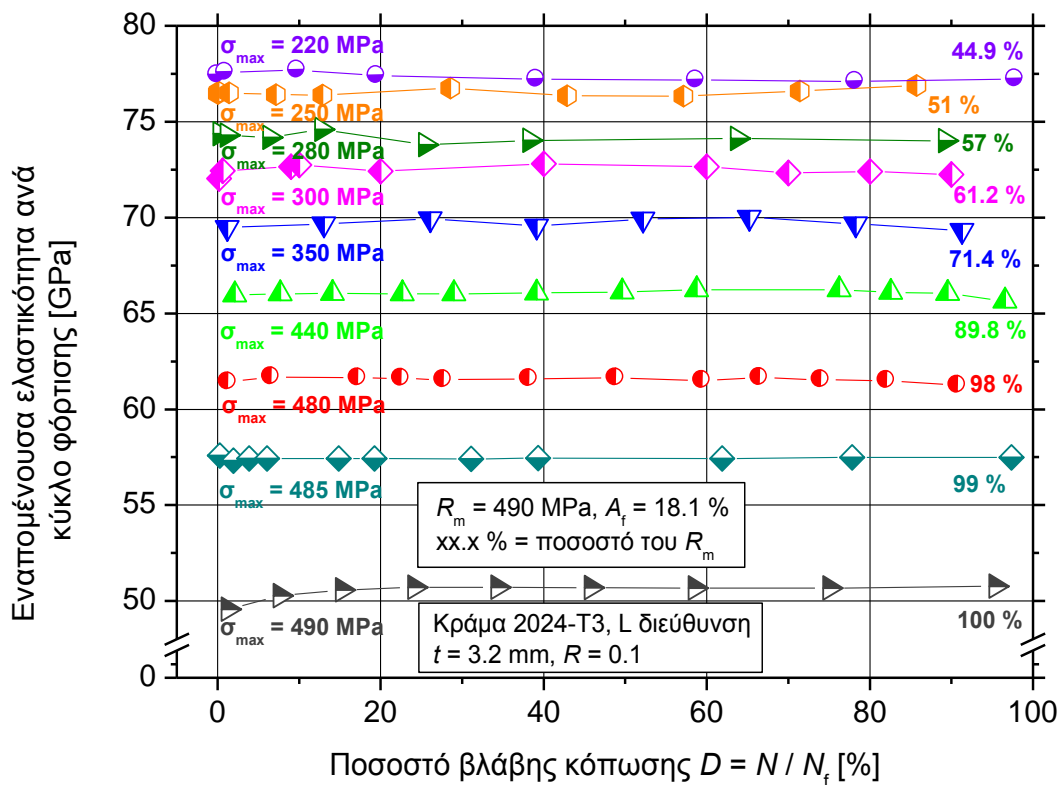
Πρόκειται για έναν απλό, γραμμικό, εμπειρικό κανόνα ο οποίος, αν και δε μπορεί να εξηγήσει τις παρατηρούμενες επιδράσεις λόγω της σειράς επιβολής των φορτίων, χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές δομικού σχεδιασμού.

#### 4.1.1 Υλικό 2024

Στο Σχήμα 20 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για την εναπομένουσα ελαστικότητα στην αποφόρτιση του κράματος αλουμινίου 2024-T3 για διαφορετικά ποσοστά βλάβης – κόπωσης. Όπως

φαίνεται στο γράφημα η εναπομένουσα ελαστικότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση.

Αναλυτικότερα, η εναπομένουσα ελαστικότητα λαμβάνει τιμές από 78 GPa για τη μικρότερη εφαρμοζόμενη τάση έως 49 GPa για τη μεγαλύτερη εφαρμοζόμενη τάση. Η μεταβολή των καμπυλών στο γράφημα για διαφορετικά ποσοστά βλάβης – κόπωσης θεωρείται ομαλή. Ακόμα παρατηρείται μια μικρή μείωση της εναπομένουσας ελαστικότητας σε μεγάλα ποσοστά βλάβης – κόπωσης στις καμπύλες των 280, 350, 440 και 480 MPa, πιθανότατα λόγω του ότι τα δοκίμια σε αυτό το σημείο είναι έτοιμα να αστοχήσουν. Τέλος στο γράφημα φαίνεται ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν μια ομαλή αύξηση έως το 65 % του ποσοστού βλάβης – κόπωσης, παρατήρηση που θα είναι πολύ χρήσιμη για το σχεδιασμό των κυκλικών καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων σε επόμενο κεφάλαιο. Το ποσοστό στα διαγράμματα του γραφήματος αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τάση κόπωσης με βάση το όριο αντοχής του κράματος αλουμινίου 2024-T3 που είναι  $R_m = 490$  MPa.

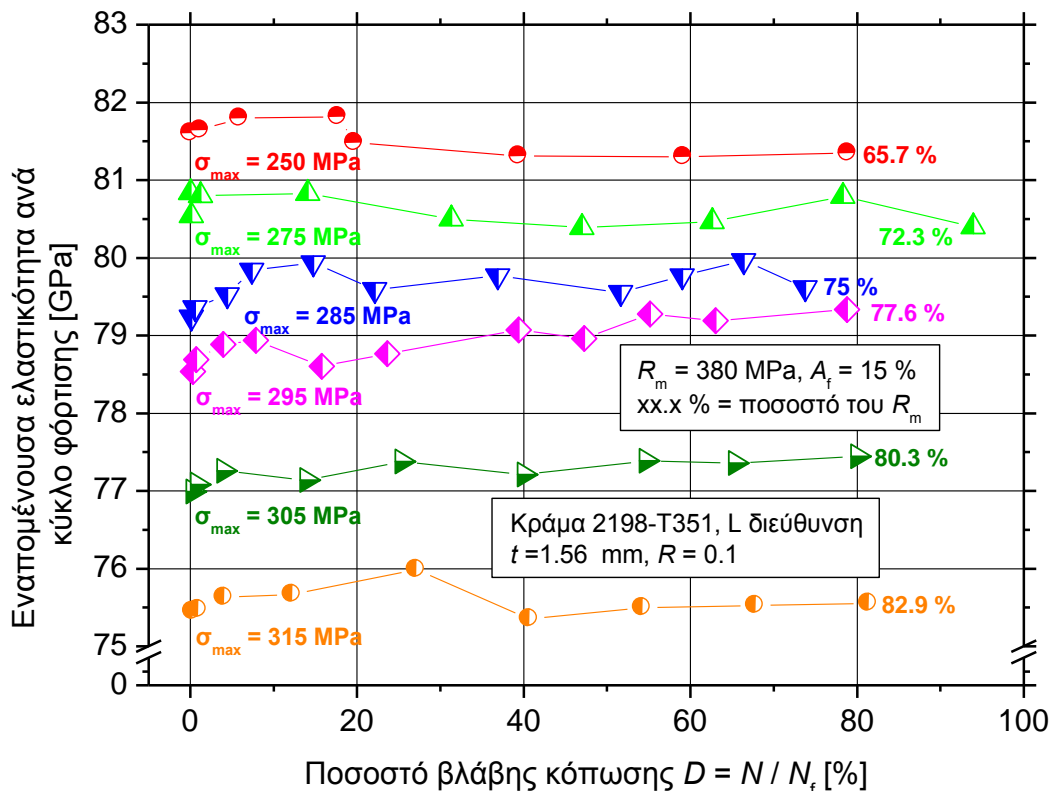


Σχήμα 20: Εναπομένουσα ελαστικότητα έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.

#### 4.1.2 Υλικό 2198

Οι αντίστοιχες μετρήσεις για την εναπομένουσα ελαστικότητα στην αποφόρτιση του κράματος αλουμινίου 2198-T351 για διαφορετικά ποσοστά βλάβης – κόπωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 21. Η εναπομένουσα ελαστικότητα για το εν λόγω κράμα παίρνει τιμές από 81 έως 75 GPa. Όπως φαίνεται στο γράφημα η εναπομένουσα ελαστικότητα αυξάνεται με την υποβάθμιση του μέγιστου φορτίου τάσης του κράματος. Ακόμα παρατηρείται ότι για τις περισσότερες εφαρμοζόμενες τάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα η εναπομένουσα ελαστικότητα αυξάνεται έως το 65 % του ποσοστού βλάβης – κόπωσης. Επιπρόσθετα στο γράφημα παρουσιάζεται μια μικρή μείωση της εναπομένουσας ελαστικότητας σε μεγάλα ποσοστά βλάβης – κόπωσης των 275, 285 και 315 MPa. Το ποσοστό στα διαγράμματα του γραφήματος αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τάση κόπωσης με βάση το όριο αντοχής του κράματος αλουμινίου 2198-T351 που είναι  $R_m = 380$  MPa.

Επιπλέον, στο 70 % του ορίου αντοχής του η εναπομένουσα ελαστικότητα του κράματος 2198-T351 είναι κατά 10 GPa μεγαλύτερη από αυτή του κράματος 2024-T3 για το ίδιο ποσοστό ορίου αντοχής, ενώ και για τα δυο κράματα η εναπομένουσα ελαστικότητα φαίνεται να μειώνεται σε μεγάλα ποσοστά βλάβης κόπωσης για το ίδιο ποσοστό ορίου αντοχής. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς ο λόγος ελαστικότητας βάρους για το κράμα 2198-T351 είναι μεγαλύτερος.



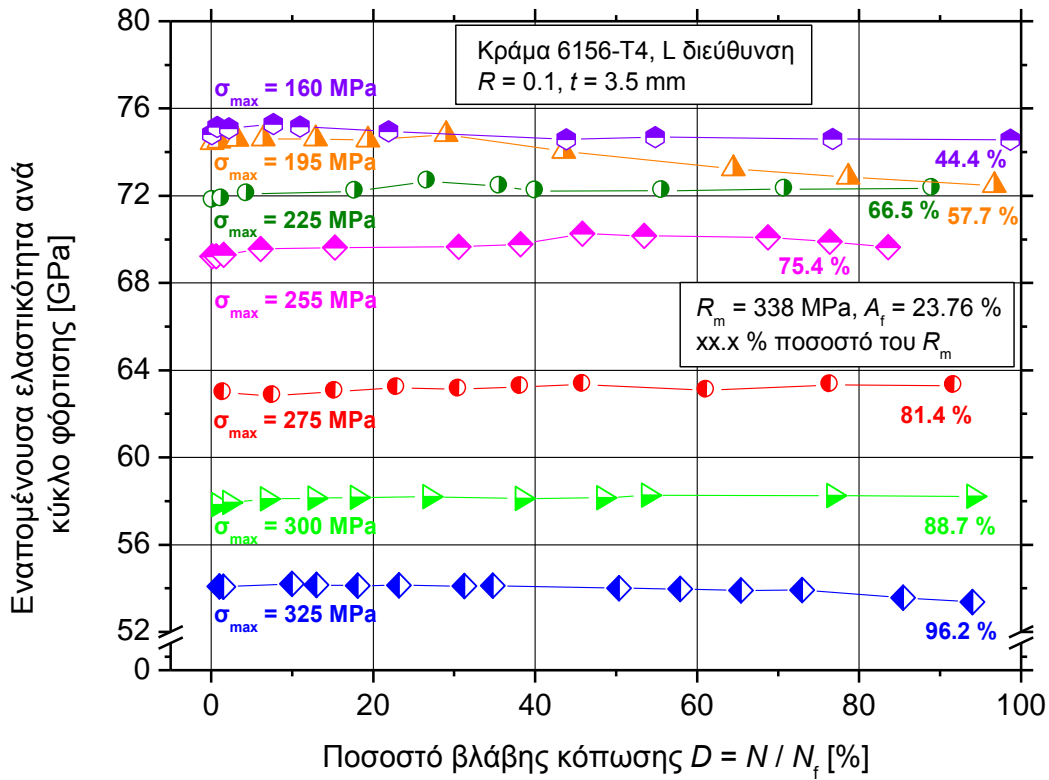
Σχήμα 21: Εναπομένουσα ελαστικότητα έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2198-T351.

### 4.1.3 Υλικό 6156

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για την εναπομένουσα ελαστικότητα στην αποφόρτιση του κράματος αλουμινίου 6156-T4 για διαφορετικά ποσοστά βλάβης – κόπωσης. Όπως φαίνεται στο γράφημα η εναπομένουσα ελαστικότητα αυξάνεται με τη μείωση του μέγιστου φορτίου τάσης του κράματος, όπως συμβαίνει και με τα κράματα αλουμινίου 2024-T3 και 2198-T351.

Συγκεκριμένα, σε αυτό το γράφημα το εύρος τιμών της εναπομένουσας ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο από τα δυο προηγούμενα καθώς παίρνει τιμές από 75 έως 53 GPa. Ακόμα στο γράφημα φαίνεται ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν μια ομαλή αύξηση έως το 70 % του ποσοστού βλάβης – κόπωσης. Η μεταβολή των καμπυλών στο γράφημα για διαφορετικά ποσοστά βλάβης – κόπωσης θεωρείται ομαλή. Επιπλέον, στο γράφημα φαίνεται μια μικρή μείωση της εναπομένουσας ελαστικότητας σε μεγάλα ποσοστά βλάβης – κόπωσης των 195, 255, 300 και 325 MPa. Το ποσοστό στα διαγράμματα του γραφήματος αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τάση κόπωσης με βάση το όριο αντοχής του κράματος αλουμινίου 6156-T4 που είναι  $R_m = 338$  MPa.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 22 παρατηρείται ότι στο 80 % του ορίου αντοχής του κράματος 6156-T4 η εναπομένουσα ελαστικότητα είναι υποβαθμισμένη κατά 14 GPa από αυτή του κράματος 2198-T351 για το ίδιο ποσοστό του ορίου αντοχής. Ακόμα στο 65 % του ορίου αντοχής η εναπομένουσα ελαστικότητα του κράματος 6156-T4 είναι ίδια με αυτή του κράματος 2024-T3 ενώ υπολείπεται κατά 9 GPa από αυτή του κράματος 2198-T351. Τέλος, σε μεγάλα ποσοστά βλάβης κόπωσης για το ίδιο ποσοστό του ορίου αντοχής η εναπομένουσα ελαστικότητα του κράματος 6156-T4 παραμένει σταθερή, αντίθετα με του κράματος 2024-T3 που μειώνεται και του κράματος 2198-T351 που αυξάνεται.



Σχήμα 22: Εναπομένουσα ελαστικότητα έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.

## 4.2 Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης

Η απορροφούμενη ενέργεια  $W$  ανά κύκλο κόπωσης (*absorbed energy per fatigue cycle*) είναι συνάρτηση των κύκλων καταπόνησης καθώς και της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης κόπωσης και μετράται σε  $\text{kJ/m}^3$ . Ο υπολογισμός της απορροφούμενης ενέργειας  $W$  ανά κύκλο κόπωσης επιτυγχάνεται ολοκληρώνοντας τον βρόγχο μέγιστης τάσης κόπωσης – παραμόρφωσης για κάθε κύκλο ζωής των υλικών. Από τα δεδομένα των δοκιμών κόπωσης είναι εφικτή η δημιουργία γραφημάτων όπως φαίνεται στα Σχήματα 23 και 25, όπου παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες απορροφούμενης ενέργειας – αριθμού κύκλων κόπωσης. Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετημημένων αντιπροσωπεύει τον αριθμό κύκλων κόπωσης  $N_f$  (λογαριθμική κλίμακα), ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει την απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης  $W$  (γραμμική κλίμακα).

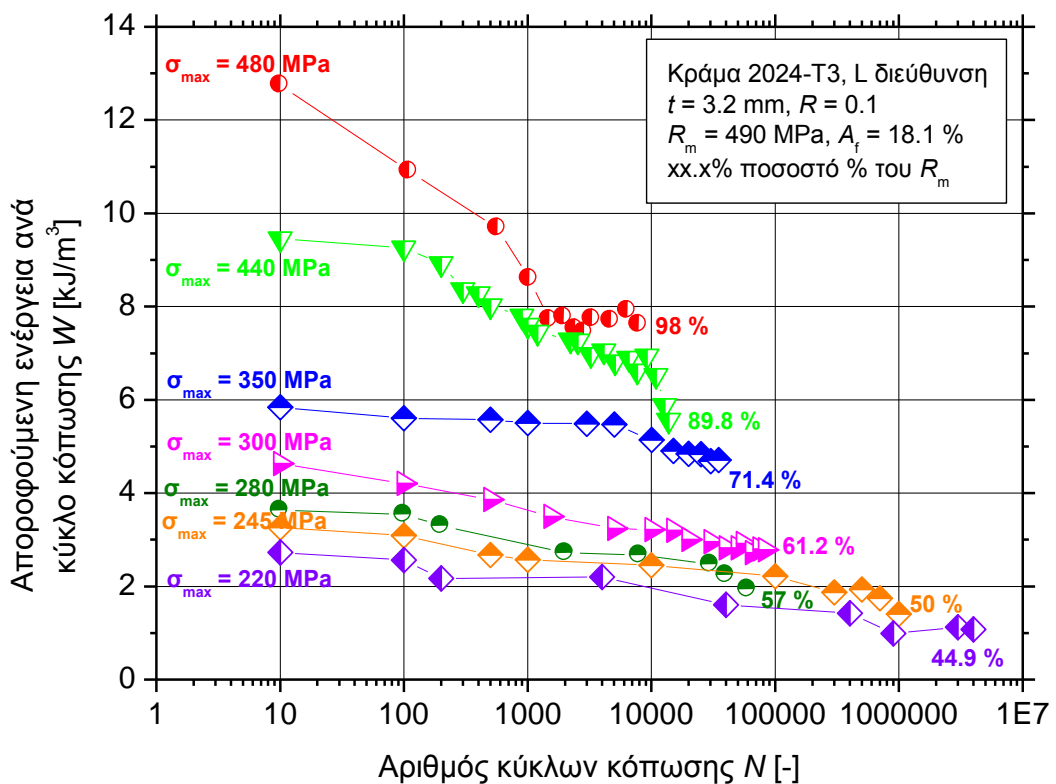
### 4.2.1 Υλικό 2024

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για την απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης για το κράμα αλουμινίου 2024-T3. Στο γράφημα διακρίνονται 2 διαφορετικές περιοχές. Η πρώτη είναι η περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης, όπου οι επιβαλλόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού το οποίο ισούται με  $R_p = 389 \text{ MPa}$ . Η δεύτερη είναι η περιοχή της

ολιγοκυκλικής κόπωσης, όπου η διάρκεια ζωής του μη ρηγματωμένου υλικού είναι σύντομη, και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει τους  $10^4$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού.

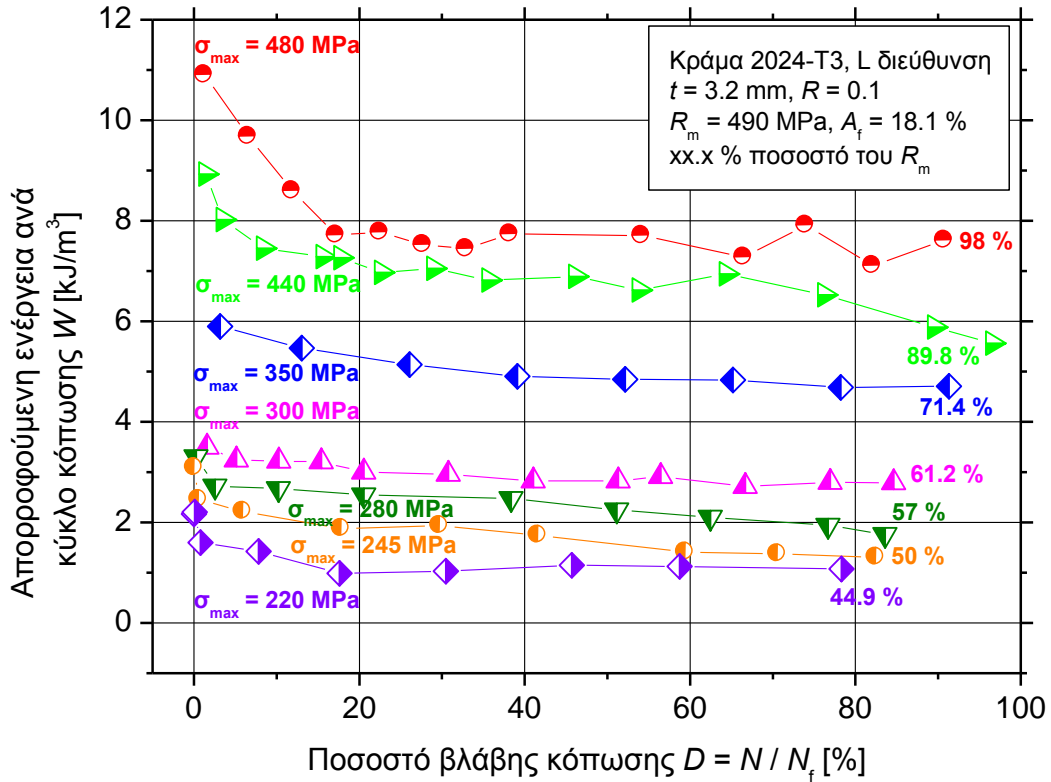
Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι η απορροφούμενη ενέργεια μειώνεται όσο μειώνεται η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση των πειραμάτων. Αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς για μικρότερες τάσεις μειώνεται η παραμόρφωση του υλικού, επομένως μειώνεται και το ζητούμενο εμβαδόν. Αρχικά η απορροφούμενη ενέργεια ξεκινάει από τα  $13 \text{ kJ/m}^3$  για τη μέγιστη τάση του κράματος αλουμινίου 2024-T3 που απεικονίζεται στο γράφημα, η οποία είναι  $480 \text{ MPa}$  και είναι πολύ κοντά στο όριο αντοχής. Στη συνέχεια παρατηρείται έντονη μείωση έως το όριο διαρροής το οποίο είναι  $R_p = 389 \text{ MPa}$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό βρίσκεται στην πλαστική περιοχή, όπου δέχεται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Πριν το όριο διαρροής η μείωση είναι πολύ μικρότερη αλλά και πάλι είναι ανάλογη της μείωσης της εφαρμοζόμενης τάσης.

Επίσης παρατηρείται η μείωση της απορροφούμενης ενέργειας όσο αυξάνονται οι κύκλοι κόπωσης για όλες τις χρησιμοποιούμενες τάσεις. Αρχικά και μετά το όριο διαρροής παρατηρείται μια μεγάλη μείωση περίπου ίση με  $5 \text{ kJ/m}^3$ . Ενώ πριν το όριο διαρροής όπως φαίνεται στο γράφημα παρατηρείται μια ομαλή μείωση, καθώς η απορροφούμενη ενέργεια δε μειώνεται περισσότερο από  $2 \text{ kJ/m}^3$  για όλες τις χρησιμοποιούμενες τάσεις.



Σχήμα 23: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι αριθμού κύκλων κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.

Επίσης είναι εύκολη η δημιουργία γραφήματος της απορροφούμενης ενέργειας έναντι του ποσοστού βλάβης – κόπωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 24. Στο γράφημα αυτό φαίνεται και πάλι ότι η απορροφούμενη ενέργεια μειώνεται όσο μειώνεται η μέγιστη χρησιμοποιούμενη τάση. Ακόμα παρατηρείται ότι πριν το όριο διαρροής και για ποσοστά βλάβης – κόπωσης μεγαλύτερα του 60 % η απορροφούμενη ενέργεια τείνει να σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 24: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.

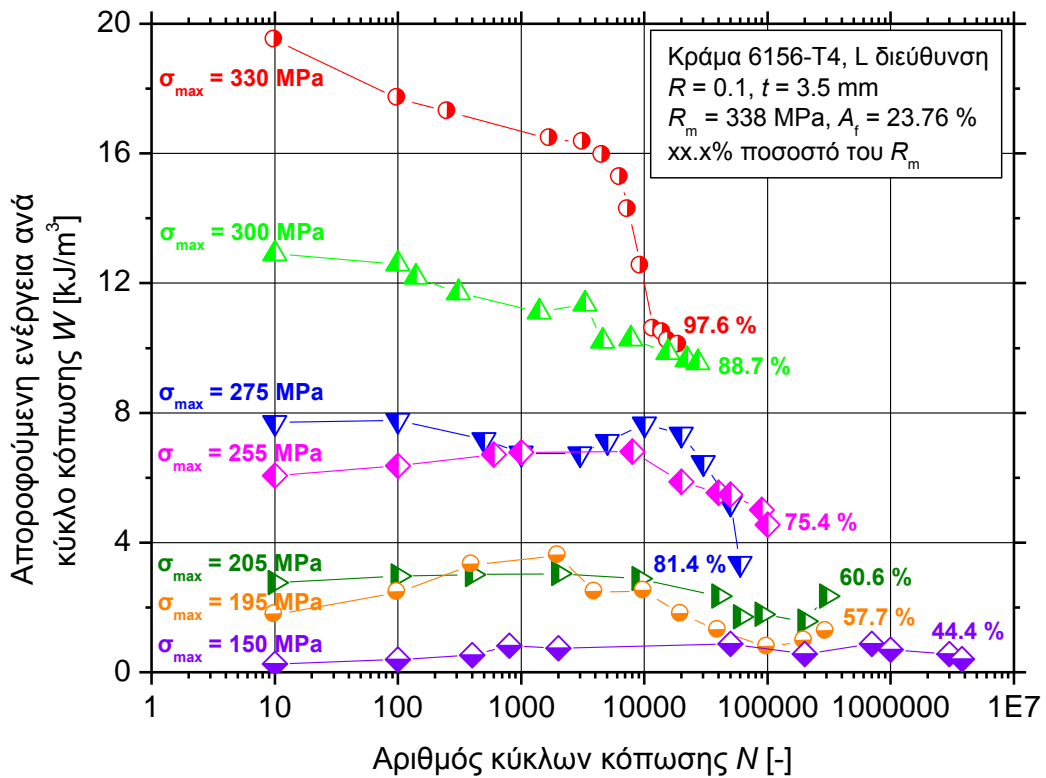
#### 4.2.2 Υλικό 6156

Οι αντίστοιχες μετρήσεις για την απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης του κράματος αλουμινίου 6156-T4 παρουσιάζονται στο Σχήμα 25. Όπως και για το κράμα 2024-T3 διακρίνονται 2 διαφορετικές περιοχές. Η περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης και η περιοχή της ολιγοκυκλικής κόπωσης.

Αναλυτικότερα, φαίνεται στο γράφημα ότι η απορροφούμενη ενέργεια μειώνεται όσο μειώνεται η μέγιστη τάση που εφαρμόστηκε στα πειράματα, όπως συμβαίνει και με το κράμα αλουμινίου 2024-T3. Αρχικά η απορροφούμενη ενέργεια φτάνει έως τα 19.5 kJ/m<sup>3</sup> για τη μέγιστη τάση του κράματος αλουμινίου 6156-T4 που απεικονίζεται στο γράφημα, η οποία είναι 330 MPa και είναι πολύ κοντά στο όριο αντοχής. Μετά το όριο διαρροής του υλικού το οποίο είναι 231 MPa, η απορροφούμενη ενέργεια δέχεται μεγαλύτερη μείωση. Πριν το όριο διαρροής η μείωση είναι πολύ μικρότερη αλλά και πάλι είναι ανάλογη της μείωσης της εφαρμοζόμενης τάσης.

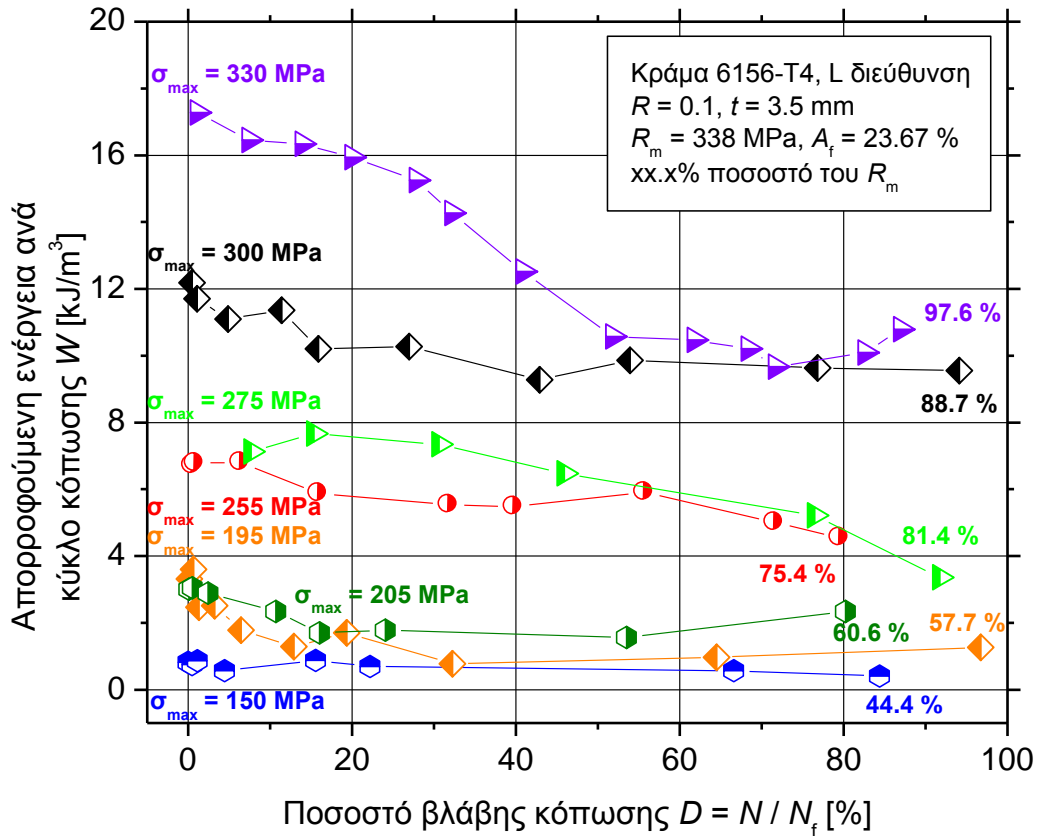
Επίσης παρατηρείται η μείωση της απορροφούμενης ενέργειας όσο αυξάνονται οι κύκλοι κόπωσης. Αρχικά και πριν το όριο διαρροής όπως φαίνεται στο γράφημα παρατηρείται μια ομαλή μείωση, η οποία δε ξεπερνάει τα  $2 \text{ kJ/m}^3$  για όλες τις χρησιμοποιούμενες τάσεις. Μετά το όριο διαρροής παρατηρείται μια μεγάλη μείωση που φτάνει έως και τα  $9 \text{ kJ/m}^3$  για τη μεγαλύτερη χρησιμοποιούμενη τάση.

Επιπρόσθετα, για το 98 % του ποσοστού του ορίου αντοχής το εύρος των τιμών της απορροφούμενης ενέργειας του κράματος 6156-T4 είναι το διπλάσιο από αυτό του κράματος 2024-T3, ενώ και τα δυο κράματα παρουσιάζουν έντονη μείωση της απορροφούμενης ενέργειας όσο αυξάνονται οι κύκλοι κόπωσης. Ακόμα στο 44 % του ποσοστού του ορίου αντοχής η απορροφούμενη ενέργεια του κράματος 6156-T4 παρουσιάζει μια μικρή μείωση κατά  $2 \text{ kJ/m}^3$  όσο αυξάνονται οι κύκλοι κόπωσης, αντιθέτως με το κράμα 2024-T3 για το οποίο παραμένει σταθερή.



Σχήμα 25: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι αριθμού κύκλων κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.

Ακόμα είναι εύκολη η δημιουργία γραφήματος της απορροφούμενης ενέργειας έναντι του ποσοστού βλάβης – κόπωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 26. Όπως παρατηρείται η απορροφούμενη ενέργεια μειώνεται όσο μειώνεται η μέγιστη χρησιμοποιούμενη τάση. Ακόμα στο γράφημα φαίνεται ότι πριν το όριο διαρροής και για ποσοστά βλάβης – κόπωσης μεγαλύτερα του 25 % η απορροφούμενη ενέργεια σχεδόν σταθεροποιείται.



Σχήμα 26: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.

### 4.3 Φαινομενολογική συμπεριφορά κόπωσης

Μετά από τη διεξαγωγή πάρα πολλών πειραματικών δοκιμών κόπωσης σε αρκετά τεχνολογικά μεταλλικά υλικά, διατυπώθηκαν ορισμένες εξισώσεις – συσχετίσεις, οι οποίες έγιναν αποδεκτές από την επιστημονική κοινότητα. Μια από αυτές τις εξισώσεις είναι και ο κανόνας του *Basquin*.

#### 4.3.1 Κανόνας του Basquin

Σύμφωνα με τον κανόνα του *Basquin* [39] στην περίπτωση που το υλικό φορτίζεται στην πολυκυκλική περιοχή της καμπύλης *Wöhler* και η μέγιστη τάση δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού, παρατηρήθηκε εμπειρικά ότι τα πειραματικά δεδομένα (πειραματικά ζεύγη τιμών εύρους τάσης και κύκλων αστοχίας  $N_f$ ) μπορούν να προσαρμοστούν στην εξίσωση της μορφής:

$$\Delta\sigma \cdot N_f^b = C \tag{4.3.1.1}$$

ή

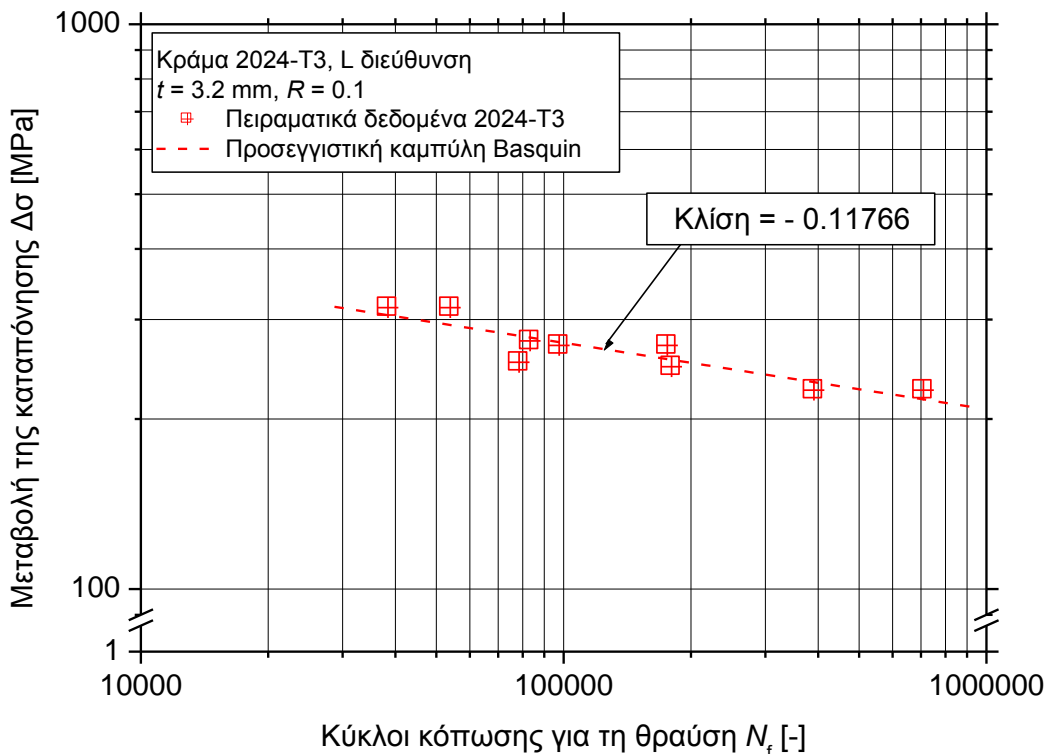
$$\log(\Delta\sigma) = -b \cdot \log N_f + \log C \tag{4.3.1.2}$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει μια ευθεία και καλείται ως κανόνας του *Basquin* (*Basquin's Law*). Οι σταθερές  $b$  και  $C$  είναι εμπειρικές σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό, με τη σταθερά  $b$  να λαμβάνει τιμές από  $1/8$  έως  $1/15$  για τα περισσότερα τεχνολογικά μεταλλικά υλικά.

Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει τους κύκλους κόπωσης για τη θραύση (λογαριθμική κλίμακα) ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της καταπόνησης (λογαριθμική κλίμακα). Στα δύο σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον κανόνα του *Basquin* για τα δυο υλικά.

#### 4.3.1.1 Υλικό 2024

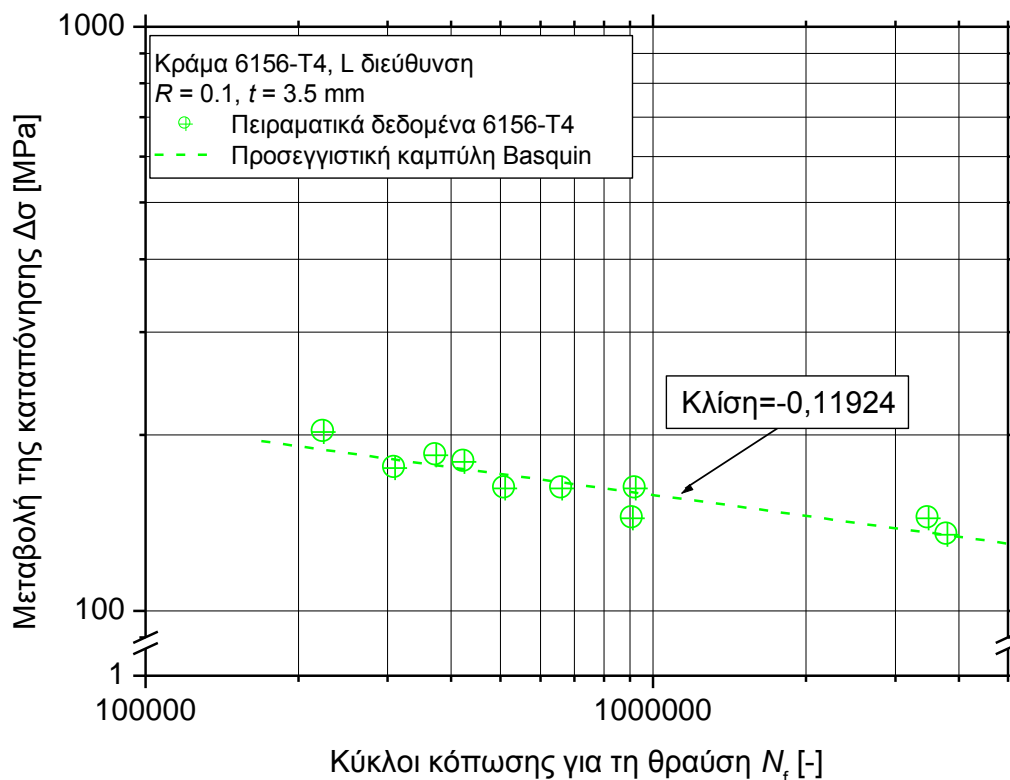
Οι αντίστοιχες μετρήσεις για τον κανόνα του *Basquin* του κράματος αλουμινίου 2024-T3 παρουσιάζονται στο Σχήμα 27. Από το γράφημα μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από την κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων όπου παρουσιάζεται η σταθερά  $C$ , η οποία ισούται με  $C = -0,11766$ . Στη συνέχεια σύμφωνα με την εξίσωση (4.3.1.2) υπολογίζεται η σταθερά  $b$ , που ισούται με  $-0.4$ . Στη βιβλιογραφία [15] για αντίστοιχο υλικό δίδεται ως μέση τιμή της σταθεράς  $C = -0,102$ . Η διαφορά των  $0,01566$  μονάδων μέτρησης ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, θεωρείται αποδεκτή καθώς υπεισέρχονται και οι τυπικές αποκλίσεις των πειραματικών μετρήσεων.



Σχήμα 27: Πειραματικός προσδιορισμός της σταθεράς  $C$  του κανόνα του *Basquin* για το κράμα αλουμινίου 2024-T3.

#### 4.3.1.2 Υλικό 6156

Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για τον κανόνα του *Basquin* του κράματος αλουμινίου 6156-T4. Από την κλίση της ευθείας μεταξύ των σημείων του σχήματος, υπολογίζεται η σταθερά  $C$  για το εν λόγω υλικό, η οποία ισούται με  $C = -0,11924$ . Επιπλέον, σύμφωνα με την εξίσωση (4.3.1.2) η σταθερά  $b$  υπολογίζεται ίση με  $-0.36$ . Επειδή το κράμα αλουμινίου 6156-T4 είναι καινούργιας γενιάς υλικό δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφία.



Σχήμα 28: Πειραματικός προσδιορισμός της σταθεράς  $C$  του κανόνα του *Basquin* για το κράμα αλουμινίου 6156-T4.

Ειδικότερα, ο Πίνακας 15 συνοψίζει τα αποτελέσματα των σταθερών για τον κανόνα του *Basquin* που διενεργήθηκαν σε δοκίμια κράματος 2024-T3 και 6156-T4, τα οποία κόπηκαν κατά τη διεύθυνση έλασης L.

Πίνακας 15: Σταθερές που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά σε κόπωση.

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας $E$ [GPa]	$C$	$b$
2024-T3	65.897	-0.11766	-0.40
6156-T4	67.746	-0.11924	-0.36

#### 4.4 Κυκλικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων

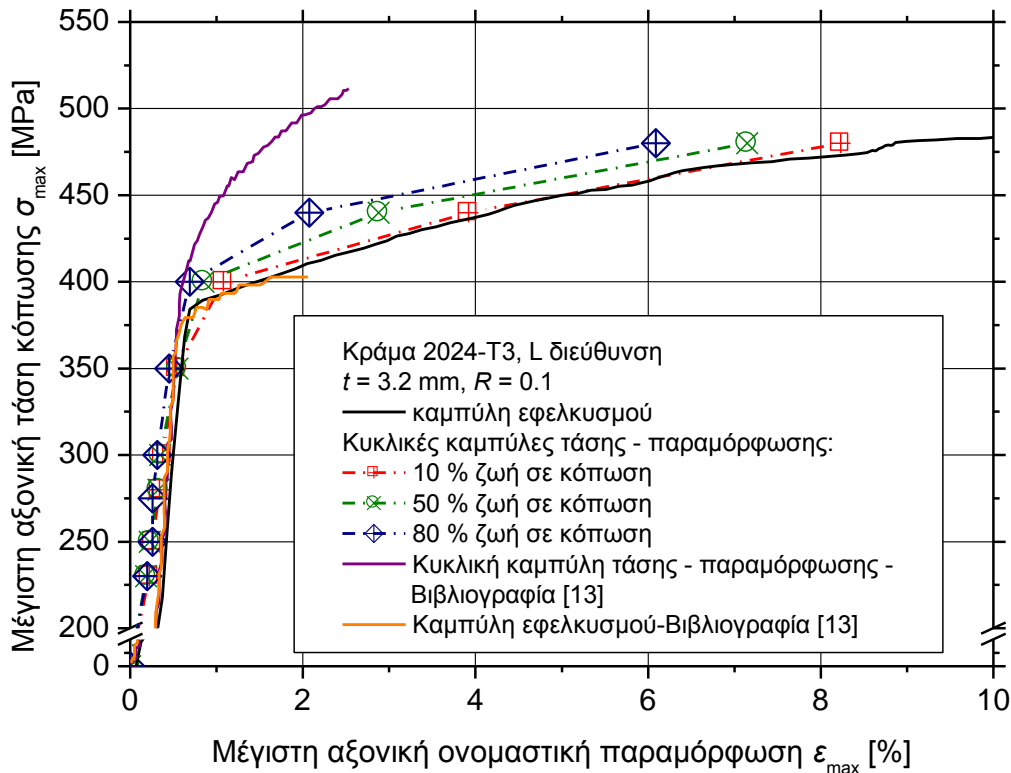
Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές κόπωσης που πραγματοποιήθηκαν για τα δύο υλικά σε δοκίμια κομμένα στη διεύθυνση της έλασης (L), είναι εφικτή η κατασκευή των κυκλικών καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων (*cyclic stress – strain curves*) [40, 41]. Αρχικά για την κατασκευή των καμπύλων χρησιμοποιήθηκαν συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέγιστης αξονικής ονομαστικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_{\max}$  και μέγιστης αξονικής τάσης κόπωσης  $\sigma_{\max}$  από τις δοκιμές τις οποίες πραγματοποιήθηκαν για το 10 % της ζωής σε κόπωσης του κάθε υλικού αντίστοιχα. Τα πειραματικά δεδομένα απεικονίστηκαν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αξονική ονομαστική παραμόρφωση  $\varepsilon_{\max}$  (γραμμική κλίμακα), ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αξονική τάση κόπωσης  $\sigma_{\max}$  κατά τη διάρκεια της δοκιμής (γραμμική κλίμακα). Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για το 50 % και το 80 % ζωής σε κόπωση αντίστοιχα. Στα διάγραμμα που ακολουθούν παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές καμπύλες που αντιπροσωπεύουν το 10 %, το 50 % και το 80 % της ζωής σε κόπωση των δύο υλικών.

##### 4.4.1 Υλικό 2024

Τα αποτελέσματα για τις κυκλικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για το κράμα αλουμινίου 2024-T3 παρουσιάζονται στο Σχήμα 29. Στο γράφημα παρατηρούνται 2 διαφορετικές περιοχές. Η περιοχή της ολιγοκυκλικής κόπωσης και η περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης. Στην περίπτωση της ολιγοκυκλικής κόπωσης, όπου η διάρκεια ζωής του μη ρηγματωμένου υλικού είναι σύντομη, και σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάει τους  $10^4$  κύκλους φορτίσεως για την αστοχία του υλικού η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων ξεφεύγει από τη γραμμική περιοχή. Στην περιοχή αυτή πραγματοποιείται η πλαστική διαρροή του υλικού. Δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις στο υλικό, οι οποίες δε μηδενίζονται με την απομάκρυνση του επιβαλλόμενου φορτίου. Επομένως οι πλαστικές παραμορφώσεις προκαλούν μόνιμες παραμορφώσεις που αλλάζουν το μέγεθος και το σχήμα των κατασκευαστικών στοιχείων.

Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι και οι τρεις καμπύλες μεταβάλλονται ομαλά μέχρι το όριο διαρροής του υλικού που είναι  $R_p = 389$  MPa όπως είναι αναμενόμενο εφόσον το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Μετά το όριο διαρροής παρατηρείται μια απότομη μεταβολή προς τα δεξιά καθώς το υλικό δέχεται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Ακόμα στο γράφημα φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό ζωής σε κόπωση του υλικού τόσο περισσότερο οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων μετατοπίζονται προς τα αριστερά. Αρχικά παρατηρείται μια μεγάλη μετατόπιση από το 10 % στο 50 % ζωής σε κόπωση, ενώ από το 50 % στο 80 % ζωής σε κόπωση η μετατόπιση είναι πιο μικρή. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενη ενότητα

η παραμόρφωση του υλικού μειώνεται σε μεγαλύτερα στάδια ζωής. Επιπλέον παρατηρείται ότι το υλικό εργοσκληρύνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, καθώς το όριο διαρροής των καμπύλων τάσης – παραμόρφωσης βρίσκεται πάνω από το όριο διαρροής της εφελκυστικής καμπύλης του υλικού. Η μηχανική αυτή συμπεριφορά του κράματος 2024-T3 είναι αποδεκτή σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [13].



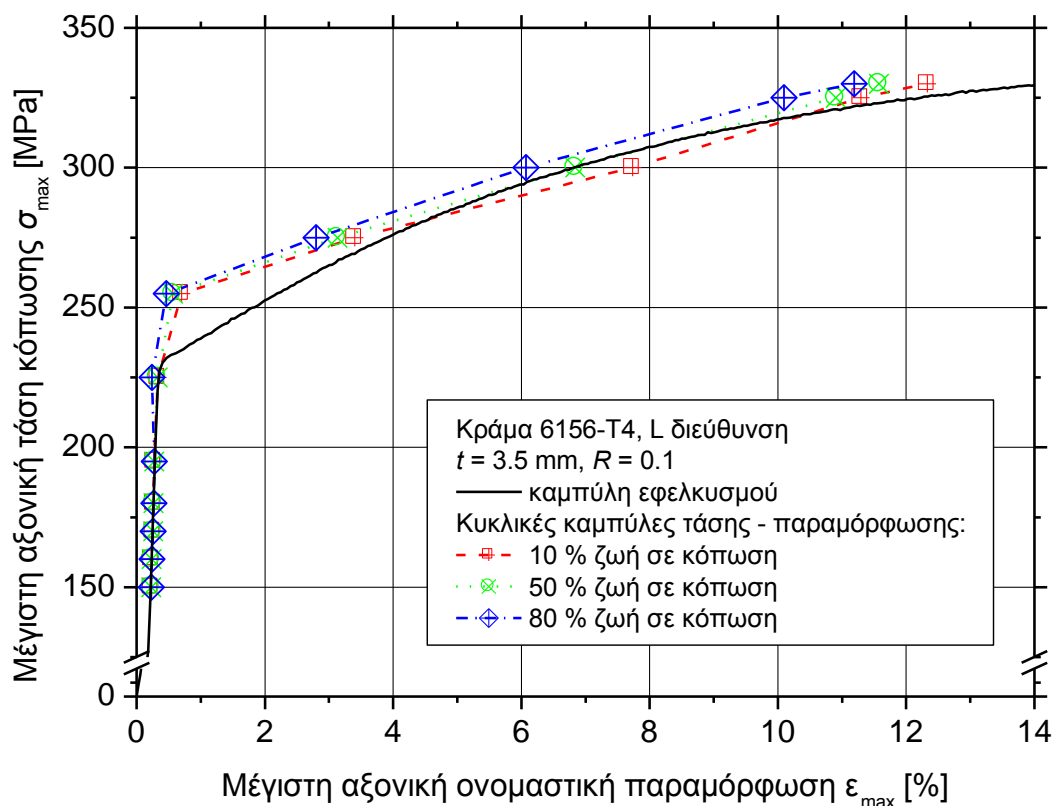
Σχήμα 29: Κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.

#### 4.4.2 Υλικό 6156

Στο Σχήμα 30 παρουσιάζονται οι κυκλικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για το κράμα αλουμινίου 6156-T4. Όπως και για το υλικό 2024-T3 διακρίνονται δυο περιοχές. Η περιοχή της ολιγοκυκλικής κόπωσης και η περιοχή της πολυκυκλικής κόπωσης. Στην περιοχή της ολιγοκυκλικής κόπωσης πραγματοποιείται η πλαστική διαρροή του υλικού.

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο γράφημα οι καμπύλες μεταβάλλονται ομαλά μέχρι τα 255 MPa, δηλαδή λίγο παραπάνω από το όριο διαρροής, το οποίο είναι 231 MPa. Το υλικό τότε βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Όταν το υλικό περάσει στην πλαστική περιοχή όπου δέχεται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις παρατηρείται μια έντονη μετάβαση προς τα δεξιά. Ακόμα παρατηρείται μια μικρή μετακίνηση των καμπυλών προς τα αριστερά για μεγαλύτερο ποσοστό ζωής σε κόπωση όπως ακριβώς συμβαίνει και με το κράμα αλουμινίου 2024-T3. Επιπλέον παρατηρείται ότι το υλικό εργοσκληρύνεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, καθώς το όριο

διαρροής των καμπύλων τάσης – παραμόρφωσης βρίσκεται πάνω από το όριο διαρροής της εφελκυστικής καμπύλης του υλικού. Η μετατόπιση των καμπύλων για τα διαφορετικά ποσοστά ζωής σε κόπωση είναι σχεδόν η ίδια.



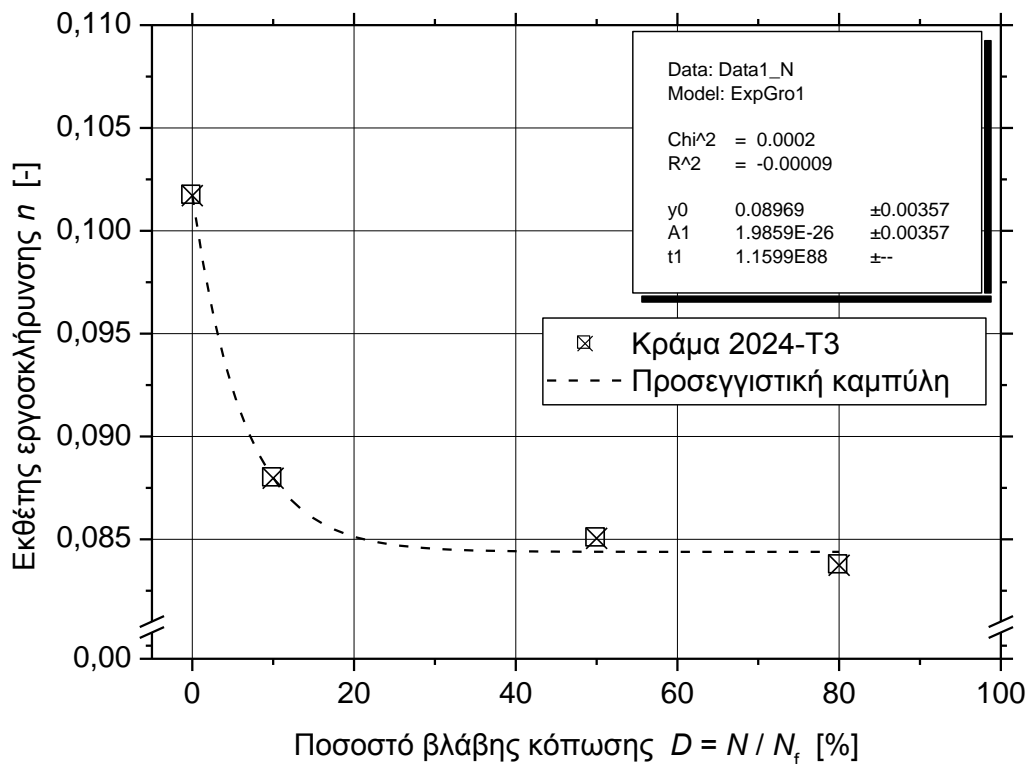
Σχήμα 30: Κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.

#### 4.5 Εκθέτης εργοσκλήρυνσης

Ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης  $n$  (*work hardening exponent*) είναι συνάρτηση της μέγιστης αξονικής ονομαστικής παραμόρφωσης και της μέγιστης αξονικής τάσης κόπωσης και υπολογίσθηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E646 [42]. Εάν τα πειραματικά δεδομένα από τις κυκλικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης των υλικών πάνω από το όριο διαρροής σχεδιαστούν σε διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των τετμημένων αντιπροσωπεύει τη μέγιστη αξονική ονομαστική παραμόρφωση (λογαριθμική κλίμακα) ενώ ο αντίστοιχος των τεταγμένων τη μέγιστη αξονική τάση κόπωσης (λογαριθμική κλίμακα), τότε από την κλίση της ευθείας υπολογίζεται ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης. Ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης αποτελεί μια ένδειξη του ρυθμού της πλαστικής σκλήρυνσης, δηλαδή το πόσο γρήγορα αυξάνεται η αντοχή του υλικού στην εφελκυστική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης μετά την πλαστική διαρροή [12].

#### 4.5.1 Υλικό 2024

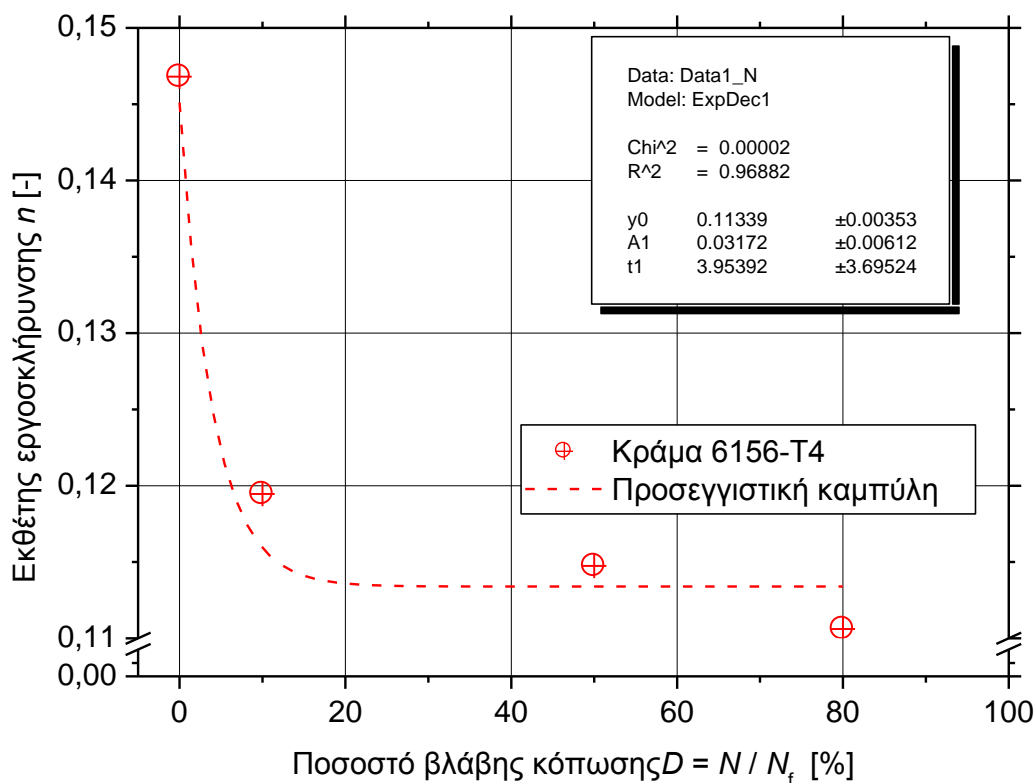
Στο Σχήμα 31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον εκθέτη εργοσκλήρυνσης του κράματος αλουμινίου 2024-T3. Όπως παρατηρείται στο γράφημα υπάρχει μια μεγάλη μείωση του εκθέτη εργοσκλήρυνσης του εν λόγω υλικού από το 0 % έως το 10 % του ποσοστού βλάβης κόπωσης. Από το 10 % έως το 50 % του ποσοστού βλάβης – κόπωσης παρατηρείται μια μικρή μείωση, ενώ από το 50 % έως το 80 % ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης είναι σχεδόν ο ίδιος. Η μείωση του εκθέτη εργοσκλήρυνσης με την αύξηση των κύκλων καταπόνησης σε κόπωση πιστώνεται στη σκλήρυνση του υλικού λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης. Με την κυκλική καταπόνηση το υλικό αυξάνει τη σκληρότητά του, με αποτέλεσμα η μηχανική αντίδρασή του σε φορτίσεις άνω του ορίου διαρροής να είναι σαφώς μειωμένη. Δηλαδή, μειώνεται η αντίδρασή του σε πλαστική διαρροή, που εκφράζεται με τον εκθέτη εργοσκλήρυνσης.



Σχήμα 31: Εκθέτης εργοσκλήρυνσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.

#### 4.5.2 Υλικό 6156

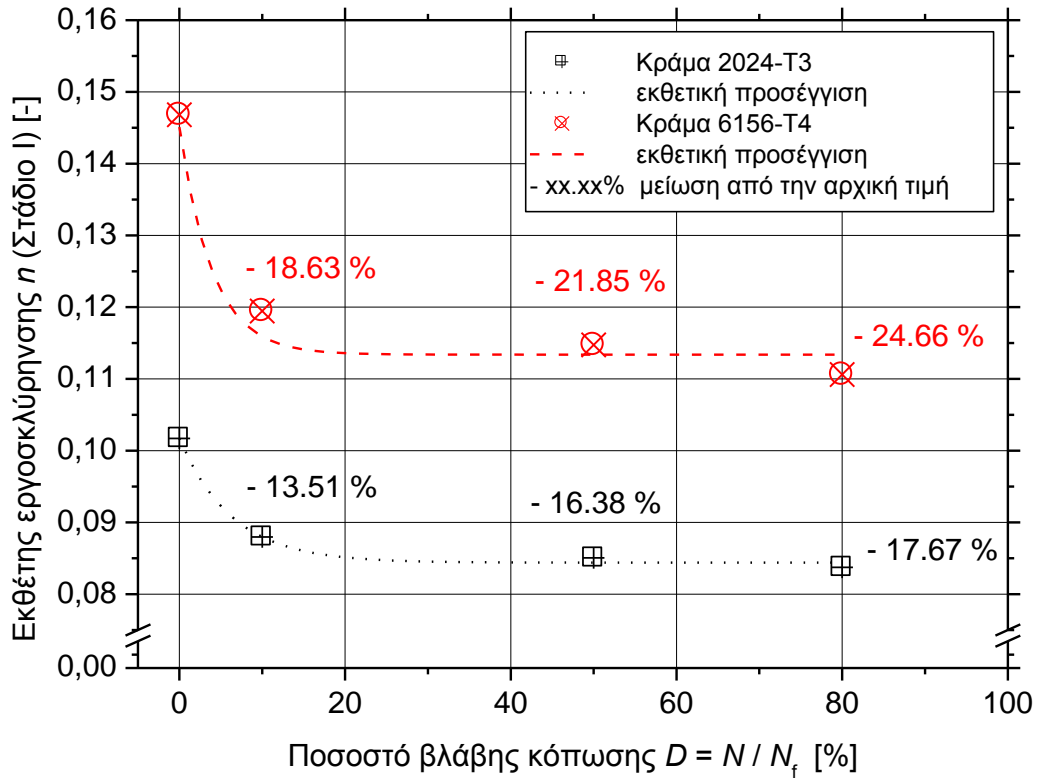
Τα αποτελέσματα για τον εκθέτη εργοσκλήρυνσης του κράματος αλουμινίου 6156-T4 παρουσιάζονται στο Σχήμα 32. Στο γράφημα φαίνεται ότι υπάρχει μια έντονη μείωση του εκθέτη εργοσκλήρυνσης για το κράμα αλουμινίου 6156-T4 από το 0 % έως το 10 % του ποσοστού βλάβης – κόπωσης. Ακόμα παρατηρείται μια μικρή μείωση για τα ποσοστά 50 % και 80 % της βλάβης – κόπωσης. Ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης μειώνεται με την αύξηση των κύκλων καταπόνησης σε κόπωση για τους λόγους που εξηγήθηκαν για το υλικό 2024-T3.



Σχήμα 32: Εκθέτης εργοσκλήρυνσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.

Στο Σχήμα 33 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τον εκθέτη εργοσκλήρυνσης των δυο υλικών. Και για τα δυο υλικά ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό βλάβης – κόπωσης.

Αναλυτικότερα, παρατηρείται για το κράμα αλουμινίου 2024-T3 ότι ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης μειώνεται κατά 18,63 % για ποσοστό βλάβης – κόπωσης από 0 % έως 10 %. Στη συνέχεια για ποσοστά βλάβης – κόπωσης από 10 % έως 50 % μειώνεται κατά 3,22 %, ενώ για ποσοστά από 50 % έως 80 % μειώνεται κατά 2,81 %. Αντίστοιχα για το κράμα αλουμινίου 6156-T4 ο εκθέτης εργοσκλήρυνσης μειώνεται κατά 13,51 % για ποσοστό βλάβης – κόπωσης από 0 % έως 10 %. Στη συνέχεια παρατηρείται μείωση κατά 2,87 % για ποσοστά βλάβης – κόπωσης από 50 % έως 80 %, ενώ για ποσοστά από 50 % έως 80 % μειώνεται κατά 1,29 %. Επιπρόσθετα, οι τιμές του εκθέτη εργοσκλήρυνσης τείνουν να σταθεροποιηθούν μετά το 20 % του ποσοστού βλάβης – κόπωσης και για τα δυο υλικά.



Σχήμα 33: Σύγκριση του εκθέτη εργοσκλήρυνσης για τα κράματα αλουμινίου 2024-T3 και 6156-T4.

## 5 Θραυστογραφικός έλεγχος

Μία αστοχία λόγω κόπωσης μπορεί να αναγνωρισθεί, αφότου εκδηλωθεί, από ορισμένα χαρακτηριστικά των επιφανειών θραύσης. Υπάρχουν τρεις βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κόπωση ενός υλικού:

1. μία αρκετά υψηλή μέγιστη εφελκυστική τάση
2. μία αρκετά μεγάλη και επαναλαμβανόμενη διακύμανση της τάσης κατά τη λειτουργία
3. ένας αρκετά μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης, δηλαδή επαναλήψεων της δυναμικής καταπόνησης.

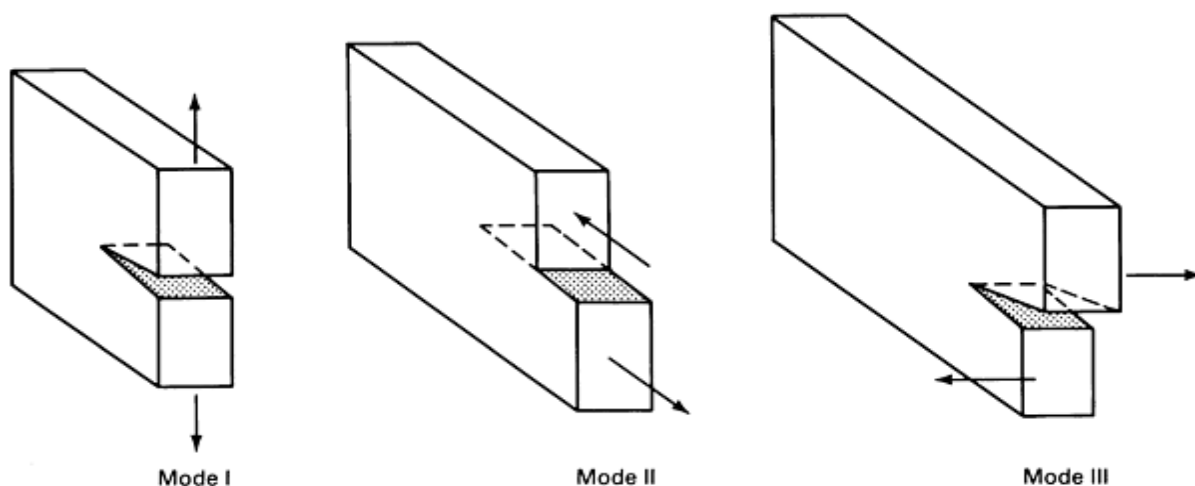
Εκτός από τους τρεις αυτούς βασικούς παράγοντες, η συμπεριφορά του αλουμινίου στη κόπωση μπορεί να επηρεαστεί και από κάποιες άλλες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η μικροδομή του υλικού, η παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος, κ.α.

Ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση που δέχεται το υλικό πριν την αστοχία του διακρίνονται δυο είδη θραύσης: η ψαθυρή και η όλκιμη. Στην περίπτωση της όλκιμης θραύσης, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που υπόκειται το υλικό, παρατηρείται μεγάλη μείωση της διατομής στην περιοχή της θραύσης. Αντίθετα στη ψαθυρή θραύση η μείωση της διατομής είναι πολύ μικρή ή μηδενική. Ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση κατά τη ψαθυρή θραύση διακρίνονται τρεις κατηγορίες στο Σχήμα 34 [43]: ο τύπος I, ο τύπος II και ο τύπος III.

Κατά τον τύπο I θραύσης οι πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος απομακρύνονται η μία από την άλλη και με αυτό τον τρόπο μεταδίδεται η ρωγμή κάτω από την επίδραση εφελκυστικής τάσης κάθετης στις επιφάνειες αυτές. Η ρωγμή μπορεί να μεταδοθεί είτε κατά μήκος των συνόρων των κόκκων (περικρυσταλλική θραύση), είτε μέσω των κόκκων (ενδοκρυσταλλική θραύση).

Κατά τον τύπο II θραύσης η προώθηση της ρωγμής γίνεται με την επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης στις πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος. Κατά τον τύπο II η εφαρμοζόμενη τάση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τον τύπο I.

Κατά τον τύπο III η προώθηση της ρωγμής γίνεται με την επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης στις πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος με φορά κάθετη σε σχέση με τον τύπο II.

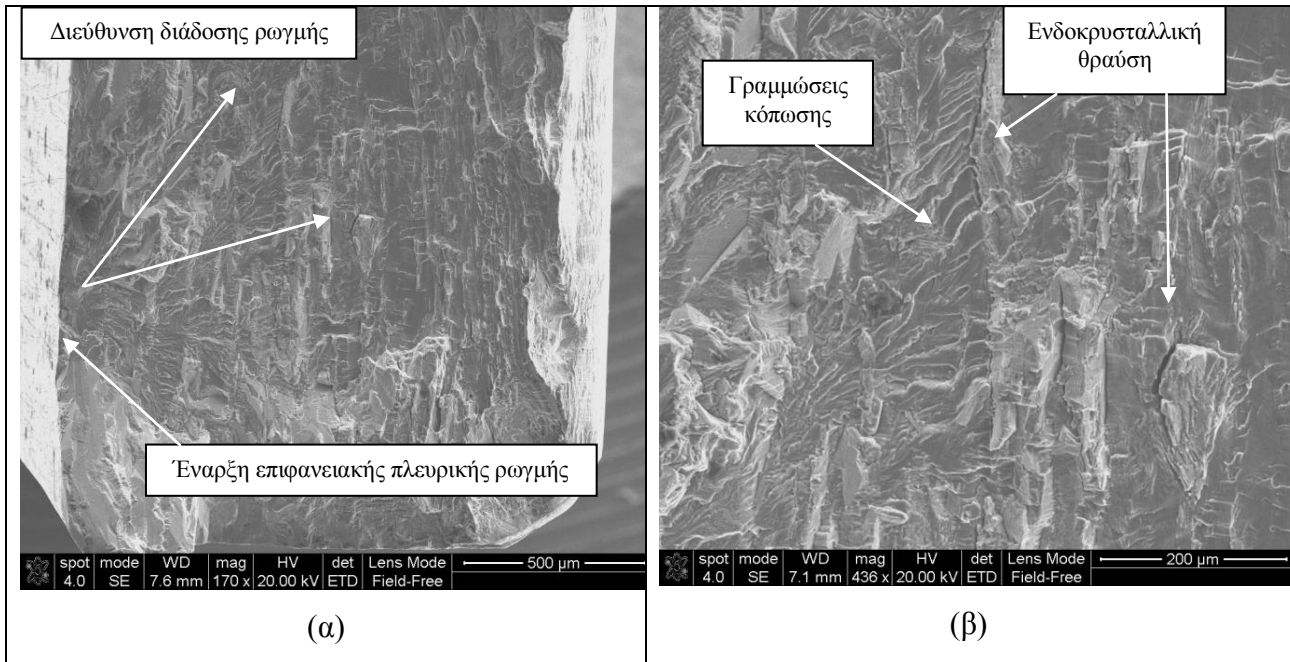


Σχήμα 34: Τύποι θραύσης ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση κατά τη ψαθυρή θραύση.

### 5.1 Υλικό 2198

Οι επιφάνειες θραύσης των επίπεδων λεπτών δοκιμίων κόπωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των καμπύλων  $S-N$ , μελετήθηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (*scanning electron microscope - SEM*). Στις εικόνες των Σχημάτων 35, 36 και 37 παρουσιάζονται οι επιφάνειες θραύσης δυο διαφορετικών δοκιμίων κόπωσης του κράματος αλουμινίου 2198-T351. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι επιφάνειες θραύσης δυο δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε δυο διαφορετικά επίπεδα τάσης, ονομαστικά στα 285 MPa και στα 250 MPa. Στο Σχήμα 36 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 2198-T351 το οποίο αστόχησε μετά από 135.555 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{\max} = 285$  MPa.

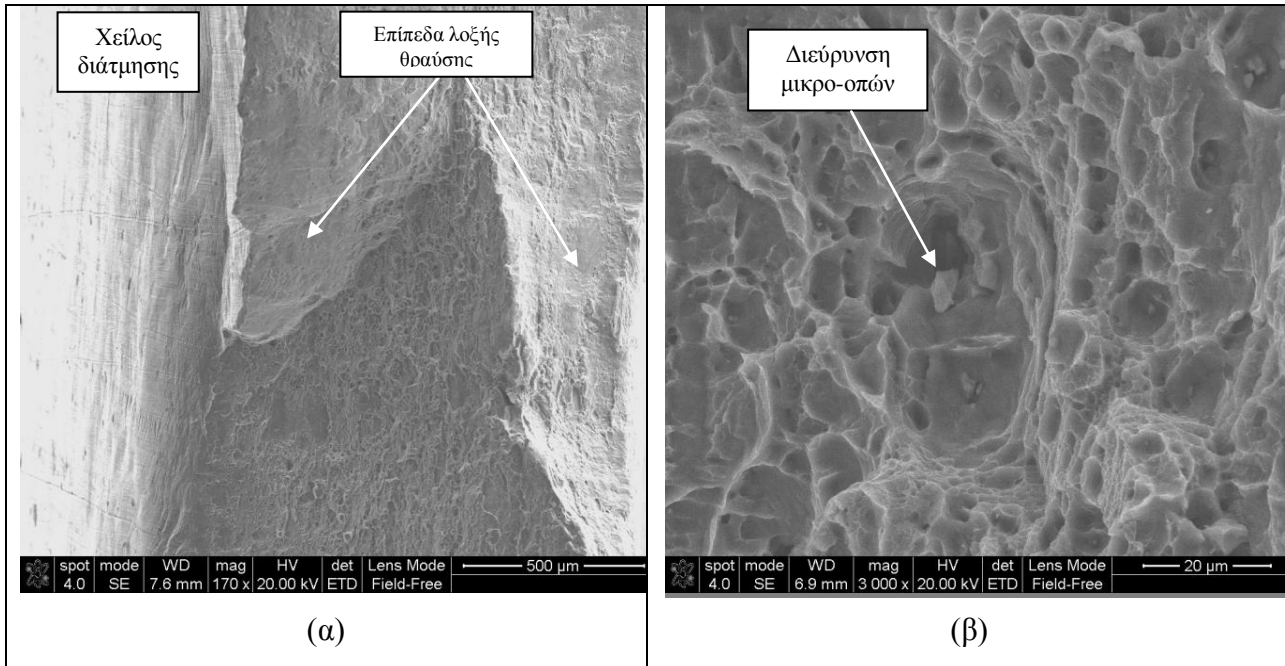
Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 35(α), ο θραυστογραφικός έλεγχος για το δοκίμιο Νο05 ανέδειξε ότι η πυρήνωση της ρωγμής πραγματοποιήθηκε στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου. Στο ίδιο Σχήμα επίσης μπορεί να παρατηρηθεί η διεύθυνση της διάδοσης της ρωγμής και η οποία επισημαίνεται με βέλη. Η επιφάνεια θραύσης παρουσιάζεται σχετικά επίπεδη και περιοχές ενδοκρυσταλλικής θραύσης αναγνωρίζονται στο Σχήμα 35(β). Αυτές εμφανίζονται με την μορφή πολλαπλών επιπέδων μακρο-γραμμώσεων που σχηματίζονται κατά μήκος της διεύθυνσης της διάδοσης ρωγμής. Το αυξανόμενο επίπεδο πλαστικής παραμόρφωσης επικουρεί στην εκκίνηση και διάδοση τοπικών ενδοκρυσταλλικών θραύσεων.



**Σχήμα 35:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 2198-T351 το οποίο αστόχησε μετά από 135.555 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{\max} = 285$  MPa: (α) σημείο πυρήνωσης της ρωγμής και (β) ενδοκρυσταλλική θραύση και σχηματισμένες γραμμώσεις κατά τη διάδοση ρωγμής κόπωσης.

Στο Σχήμα 36 παρουσιάζονται φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης του ίδιου δοκιμίου από το κέντρο του πάχους του. Στο Σχήμα 36(α) παρουσιάζονται διαφορετικά χαρακτηριστικά θραύσης, όπως η δημιουργία ενός χείλους διάτμησης (*shear lip*). Η παρουσία χείλους διάτμησης υπονοεί ότι η διάδοση ρωγμής κόπωσης πραγματοποιήθηκε σε μικτή φόρτιση, δηλαδή φόρτιση τύπου I και II [44]. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί μηχανικά καθώς η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται υπό φόρτιση επίπεδης εντατικής κατάστασης (EEK) στην περιοχή της επιφάνειας του δοκιμίου, ενώ στο κέντρο του δοκιμίου τοπικά η φόρτιση πραγματοποιείται υπό επίπεδη κατάσταση παραμόρφωσης (EKΠ). Το τελευταίο επιβάλλει μέγιστες διατμητικές τάσεις σε επικλινή επίπεδα  $45^\circ$  σε σύγκριση με την επιφάνεια του δοκιμίου. Η γεωμετρία, το πάχος και πλάτος του δοκιμίου έχει αναφερθεί να επηρεάζουν τη λοξή θραύση (*slanted fracture*) που παρατηρείται με τον σχηματισμό του χείλους διάτμησης [44]. Στην περιοχή της λοξής θραύσης παρατηρήθηκε μικτός τύπος θραύσης που αποτελείται από περιοχές με ενδοκρυσταλλική (*transgranular*) και περικρυσταλλική (*intergranular*) θραύση. Αυτές οι μεταβολές μπορεί να συσχετιστούν με την έναρξη της αύξησης του χείλους διάτμησης καθώς και τη μετάβαση από φόρτιση τύπου I σε II με την ολοκλήρωση του φαινομένου, δηλαδή σε όλο το πάχος. Οι λοξές επιφάνειες επιδεικνύουν ότι ο τοπικός συντελεστής έντασης τάσεων  $K_{\max}$  αυξήθηκε σημαντικά, όπου πραγματοποιήθηκε συνένωση μικρο-ρωγμών και σχηματίστηκε μια μακρο-ρωγμή υπό επίπεδη φόρτισης τύπου I και II. Στο Σχήμα 36(β) παρουσιάζεται μια επιφάνεια θραύσης με χαρακτηριστικά σημεία όλκιμης

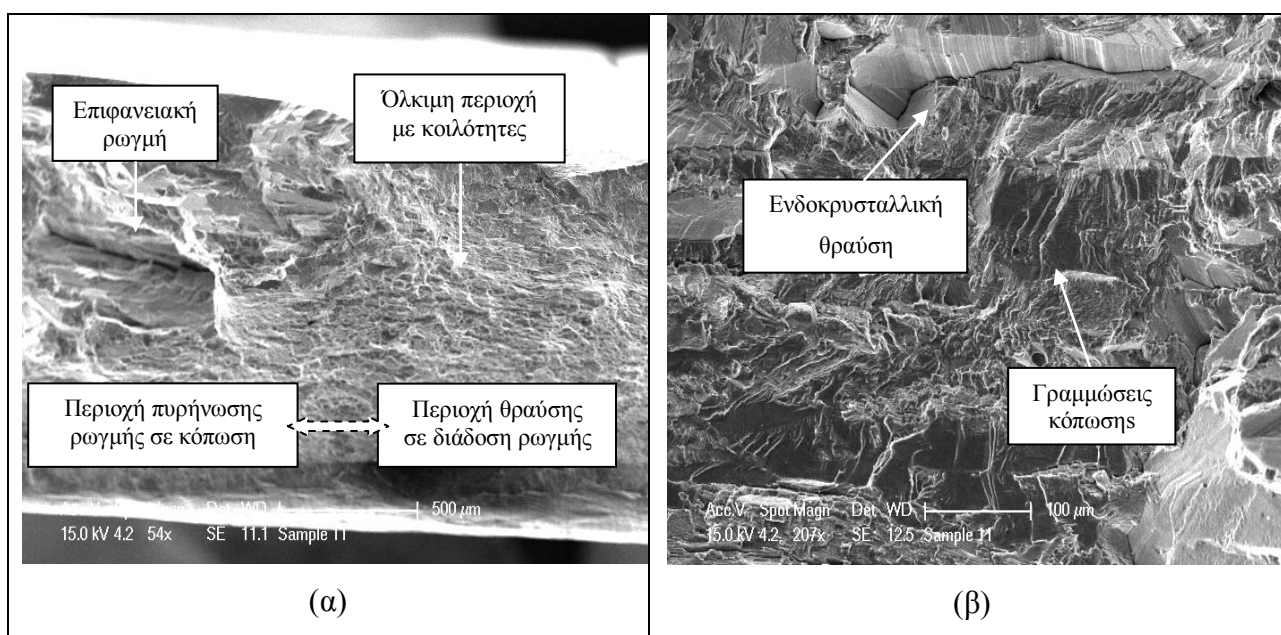
θραύσης, δηλαδή ο μηχανισμός θραύσης είναι η διεύρυνση οπών (*void growth*) και τελικώς η συνένωσή τους (*coalescence*). Μεγάλες κοιλότητες (*dimples*) μπορεί να παρατηρηθούν σε επίπεδο κόκκου καθώς ένας αριθμός μικρότερων κοιλοτήτων που βρίσκονται σε ευθυγράμμιση με τα επίπεδα περικρυσταλλικής θραύσης.



**Σχήμα 36:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό No05 από κράμα 2198-T351: (α) το σχηματισμένο χείλος διάτμησης στο κέντρο του δοκιμίου No05 και (β) περιοχή με μεγάλη πλαστική παραμόρφωση με διεύρυνση και συνένωση μικρο-οπών.

Στο Σχήμα 37 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό No11 από κράμα 2198-T351 το οποίο αστόχησε μετά από 1.609.940 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{\max} = 250$  MPa. Οι φωτογραφίες του θραυστογραφικού έλεγχου στο Σχήμα 37(α) ανέδειξαν τη μετάβαση από λείες σε τραχείες επιφάνειες. Μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις παρατηρούνται στην περιοχή τραχείας θραύσης μετά το στάδιο της διάδοσης ρωγμής σε κόπωση που συνοδεύονται από βαθιές μικρο-ρωγμές. Επιπρόσθετα, πολλές κοιλότητες μπορεί να παρατηρηθούν στην περιοχή της λείας επιφάνειας θραύσης. Στο Σχήμα 37(β), παρουσιάζεται η μετάβαση στο στάδιο II της διάδοσης της ρωγμής να καθυστερεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μεγαλύτερο ποσοστό τραχείας επιφάνειας σε σύγκριση με την αντίστοιχη του δοκιμίου No05 με  $\sigma_{\max} = 285$  MPa. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με τη μικρότερη εντατική κατάσταση του ρηγματωμένου δοκιμίου εξαιτίας του μικρότερου επιβαλλόμενου εξωτερικού φορτίου που έχει ως αποτέλεσμα τη χρονική επιμήκυνση του σταδίου διάδοσης της ρωγμής. Οι γραμμώσεις κόπωσης και οι παραμορφώσεις φαίνονται αρκετά σύνθετες και αυτό μπορεί να αποδοθεί όχι μόνο στους μηχανισμούς της κόπωσης αλλά και

στο μηχανισμό ισχυροποίησης με κατακρήμνιση του υλικού. Το κράμα αλουμινίου 2198-T351 είναι θερμικά κατεργάσιμο και ισχυροποιείται με την τεχνητή γήρανση. Ερευνητικές εργασίες [28, 45] αναφέρουν ότι σε αυτά τα υλικά, η κύρια πηγή εμφάνισης των οπών είναι η αστοχία των διεπιφανειών μεταξύ (α) των μεγάλων εγκλεισμάτων (*inclusions*) που περιέχουν Fe και Si, (β) μεσαίων διασπορών σωματιδίων  $Al_3Zr$  και (γ) εκλεπτυσμένων κατακρημνίσεων ως προϊόντα τεχνητής γήρανσης ( $Al_2CuLi$ ,  $Al_3Li$  και  $Al_2Cu$ ) με τη μήτρα του αλουμινίου. Κατά τη διάρκεια της μηχανικής φόρτισης, οι οπές πυρηνώνονται στα παραπάνω σημεία και διευρύνονται, ενώ νέες οπές δημιουργούνται από την περαιτέρω αστοχία διεπιφανειών των κατακρημνίσεων με τη μήτρα και από την αστοχία των ίδιων των κατακρημνίσεων ή των σωματιδίων δεύτερης φάσης στη μήτρα του υλικού. Πολλαπλές μικρο-ρωγμές εμφανίζονται να πυρηνώνονται στα όρια των κόκκων και επομένως κρίνεται δυσκολότερος ο σχηματισμός της μακρο-ρωγμής κατά το δεύτερο στάδιο του μηχανισμού θραύσης σε κόπωση.

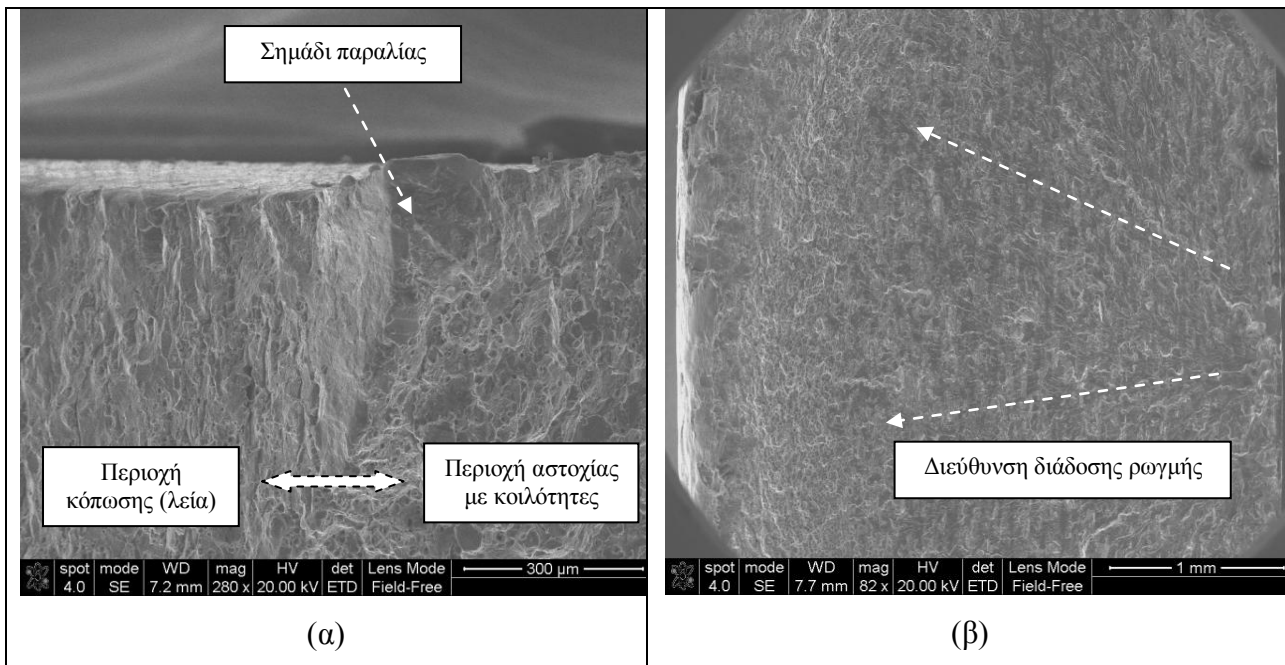


**Σχήμα 37:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό No11 από κράμα 2198-T351 το οποίο αστόχησε μετά από 1.609.940 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{max} = 250$  MPa: (α) περιοχή μετάβασης από τραχεία σε λεία επιφάνεια και (β) περιοχή θραύσης με έντονες πλαστικές παραμορφώσεις και παρουσία γραμμώσεων κόπωσης.

## 5.2 Υλικό 6156

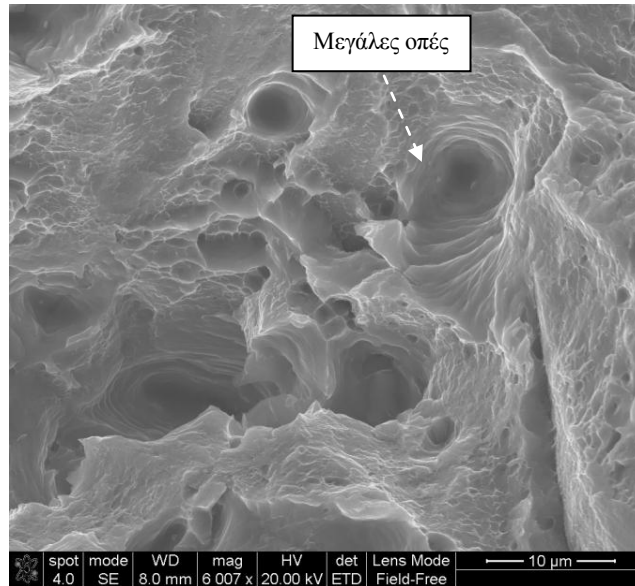
Για το κράμα αλουμινίου 6156-T4 μελετήθηκαν οι επιφάνειες θραύσης από δυο διαφορετικά δοκίμια κόπωσης: το πρώτο δοκίμιο με κωδικό No05 καταπονήθηκε με  $\sigma_{max} = 180$  MPa και αστόχησε μετά από περίπου 924.667 κύκλους καταπόνησης. Στο Σχήμα 38(α) παρουσιάζεται η μετάβαση μεταξύ της λείας περιοχής της διάδοσης ρωγμής σε κόπωση και την περιοχή αστοχίας με

τον κλασσικό τρόπο όλκιμης θραύσης με κοιλότητες. Ανάμεσά τους παρουσιάζεται ένα ‘σημάδι παραλίας’ (*beach mark*) που σχηματίστηκε από την πλευρά του δοκιμίου και διαχωρίζει τις δυο διαφορετικές περιοχές. Αυτά τα σημάδια είναι μακροσκοπικά σημάδια διάδοσης σε επιφάνεια από αστοχία σε κόπωση και υποδηλώνει τις επιτυχείς θέσεις της αιχμής του ρήγματος που προχωρά. Η κλασσική εμφάνιση των σημαδιών είναι ακανόνιστη ελλειπτική ή με μορφή ημι-ελλειπτικών δακτυλιδιών που έχουν εσωτερική ακτίνα από μία ή από περισσότερες προελεύσεις – εστίες μικρο-ρωγμών. Αυτά τα σημάδια εξαιτίας της μορφής τους έχουν ονομαστεί χαρακτηριστικά ‘σημάδια παραλίας’ (*beach marks*). Στο Σχήμα 38(β) παρατηρείται μια διαμπερή ρωγμή (σε όλο το πάχος) και η διάδοσή της από την άκρη του δοκιμίου προς το εσωτερικό του, όπως υποδηλώνεται από τα βέλη του Σχήματος.



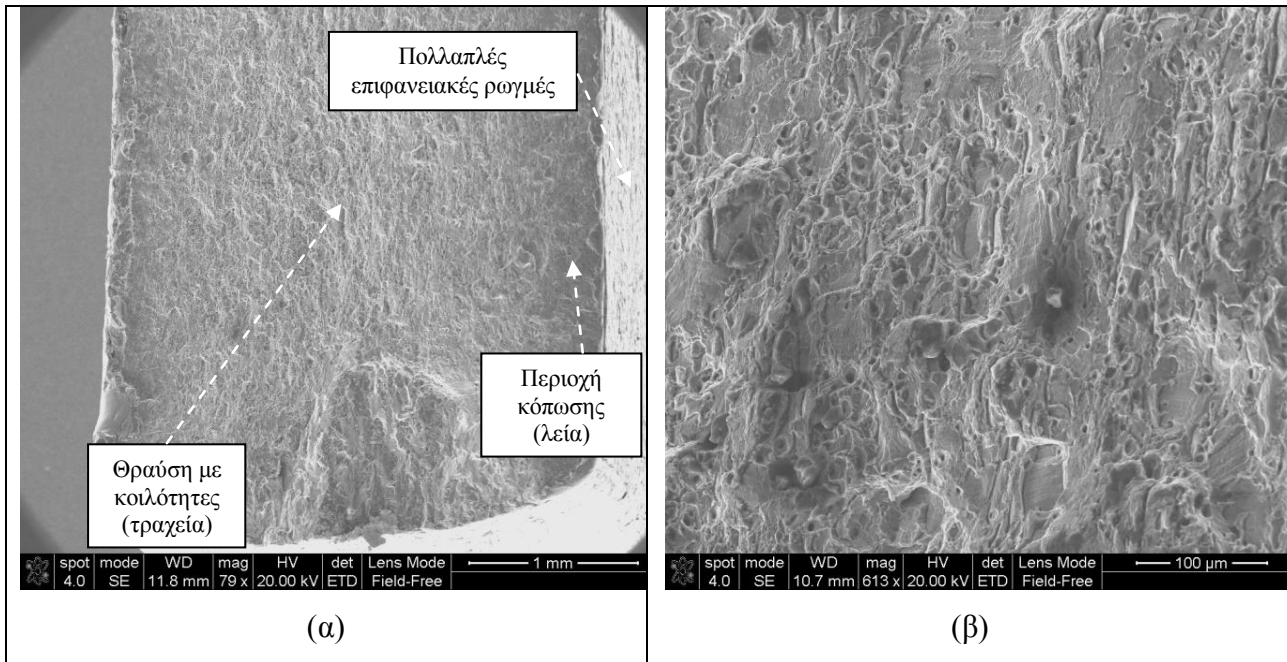
**Σχήμα 38:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό No05 από κράμα 6156-T4 το οποίο αστόχησε μετά από 924.667 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{max} = 180$  MPa: (α) μετάβαση από τη λεία στην τραχεία επιφάνεια και (β) διεύθυνση διάδοσης ρωγμής κατά το πάχος του δοκιμίου.

Επιπρόσθετα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 39, μεγάλες μικρο-οπές είναι το κύριο χαρακτηριστικό θραύσης αυτού του υλικού (μεγάλη διάμετρος οπής τάξης μεγέθους  $\sim 10$   $\mu\text{m}$ ). Οι μικρο-οπές συνδέονται ευθέως τόσο με τα σωματίδια δεύτερης φάσης μεγάλου μεγέθους καθώς και με σχετικά μικρότερο ποσοστό διεύρυνσης οπών από λεπτότερη διασπορά κατακρημνίσεων. Η μορφολογία αστοχίας του υλικού συνάδει με ενδοκρυσταλλική όλκιμη θραύση (*intergranular ductile failure*) και είναι κυρίαρχη μακροσκοπικά σε επιφάνειες θραύσης παραπλήσιων κραμάτων αλουμινίου [46, 47].



**Σχήμα 39:** Φωτογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 6156-T4 με  $\sigma_{\max} = 180$  MPa που δείχνει τις σχηματισμένες κοιλότητες από διεύρυνση μικρο-οπών που είναι χαρακτηριστική της όλκιμης θραύσης.

Το δεύτερο δοκίμιο κόπωσης που εξετάστηκε με μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης είχε κωδικό Fat06, καταπονήθηκε με  $\sigma_{\max} = 330$  MPa και αστόχησε μετά από 21.010 κύκλους καταπόνησης. Στο Σχήμα 40(α) παρουσιάζεται χαρακτηριστική φωτογραφία από την επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου, όπου φαίνεται μια περιοχή με πολλαπλές ρωγμές από την επιφάνεια του δοκιμίου και σημειώνεται με βέλος στο δεξί μέρος της εικόνας. Αυτή η περιοχή είναι χαρακτηριστική της εκτεταμένης βλάβης που προκλήθηκε στο υλικό από την υψηλή τάση στην οποία καταπονήθηκε. Η επιφάνεια θραύσης είναι μια μίξη από περιοχές με περικρυσταλλική και ενδοκρυσταλλική θραύση, όπου στην άκρη του δοκιμίου παρατηρούνται μικρορωγμές σταδίου I και ακολουθούνται από ρωγμές σταδίου II μεγαλύτερου μήκους προς το εσωτερικό (κέντρο) του δοκιμίου. Στο Σχήμα 40(β) οι τελευταίες θεωρήσεις επιβεβαιώνονται και παρατηρείται μια μικτή επιφάνεια θραύσης με ορισμένες κοιλότητες και ορισμένες περιοχές ενδοκρυσταλλικής θραύσης.



**Σχήμα 40:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Fat06 από κράμα 6156-T4 το οποίο αστόχησε μετά από 21.010 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma_{\max} = 330$  MPa: (α) λεία επιφάνεια κατά το πάχος του δοκιμίου και (β) επιφάνεια με μικτό τρόπο θραύσης με περικρυσταλλική και ενδοκρυσταλλική θραύση.

## 6 Συμπεράσματα

- Σύμφωνα με το διάγραμμα ειδικής εφαρμοζόμενης τάσης-κύκλων κόπωσης για τη θραύση παρατηρείται ότι η ειδική ελαστικότητα του κράματος 2198-T351 υπερτερεί αυτής του κράματος 2024-T3, καθώς η καμπύλη του κράματος 2198 στην περιοχή με μεσαίο εύρος τάσης βρίσκεται πάνω από την καμπύλη του 2024-T3.
- Στο 65 % του ποσοστού του ορίου αντοχής των τριών κραμάτων αλουμινίου παρατηρείται ότι εναπομένουσα ελαστικότητα του κράματος 2198-T351 υπερτερεί κατά 9 GPa από τις αντίστοιχες εναπομένουσες ελαστικότητες των κραμάτων 2024-T3 και 6156-T4.
- Στο 98 % του ποσοστού του ορίου αντοχής το εύρος των τιμών της απορροφούμενης ενέργειας του κράματος 6156-T4 είναι το διπλάσιο από αυτό του κράματος 2024-T3, ενώ και τα δυο κράματα παρουσιάζουν έντονη μείωση της απορροφούμενης ενέργειας όσο αυξάνονται οι κύκλοι κόπωσης.
- Ο εκθέτης εργοσκήρυνσης του κράματος 6156-T4 είναι μεγαλύτερος από του κράματος 2024-T3. Επιπλέον, το κράμα 6156-T4 αντιστέκεται περισσότερο στην πλαστική παραμόρφωση από το κράμα 2024-T3.

## Βιβλιογραφία

- [1] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996.
- [2] Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special-Purpose Materials, Volume 2, ASM Handbook, ASM International, 1990.
- [3] EA Starke Jr, *Heat-treatable aluminum alloys*. In: Vasudevan A K, Doherty R D (eds.) Aluminum Alloys: Contemporary Research and Applications, Treatise on Materials Science and Technology. Academic Press, Boston, MA, Vol. 31, 1989.
- [4] JE Hatch (ed.) *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. American Society for Metals, Metals Park, OH, 1984.
- [5] W.Z. Han, Y. Chen, A. Vinogradov and C.R. Hutchinson, *Dynamic precipitation during cyclic deformation of an underaged Al-Cu alloy*, *Materials Science and Engineering A*, 528, pp. 7410–7416, 2011.
- [6] W.G. Guo, X.Q. Zhang, J. Su, Y. Su, Z.Y. Zeng and X.J. Shao, The characteristics of plastic flow and a physically-based model for 3003 Al-Mn alloy upon a wide range of strain rates and temperatures, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 30, pp. 54-62, 2011.
- [7] G. Saad, S.A. Fayek, A. Fawzy, H.N. Soliman and Gh. Mohammed, Deformation characteristics of Al-4043 alloy, *Materials Science and Engineering A*, 527, pp. 904–910, 2010.
- [8] L. Kramer, M. Phillippi, W.T. Tack and C. Wong, Locally Reversing Sensitization in 5xxx Aluminum Plate, *ASM International*, pp. 1059-9495, 2010.
- [9] A. T. Kermanidis, A. D. Zervaki, G. N. Haidemenopoulos and Sp. G. Pantelakis, The influence of salt fog exposure on the fatigue performance of Alclad 6xxx aluminum alloys laser beam welded joints, *Springer Science and Business Media*, 45:4390–4400, 2010.
- [10] S. Rajakumar, C. Muralidharan and V. Balasubramanian, Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminium alloy joints, *Materials and Design*, 32, pp. 2878–2890, 2011.
- [11] M. Dixit, R.S. Mishra and K.K. Sankaran, Structure–property correlations in Al 7050 and Al 7055 high-strength aluminum alloys, *Materials Science and Engineering A*, 478, pp. 163–172, 2008.
- [12] Ν.Δ. Αλεξόπουλος, *Σημειώσεις Αντοχής Υλικών*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Χίος, 2009.
- [13] Fatigue and Fracture, Volume 19, ASM Handbook, ASM International, 1996.
- [14] J. Lemaitre, R. Desmorat, *Engineering Damage Mechanics*, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH and Co. KG, 2005.
- [15] N. Dowling. *Mechanical Behavior of Materials*. Prentice Hall, New Jersey, USA, 2<sup>nd</sup> edition, 1993.
- [16] A. Meyveci, I. Karacan, E. Hanifi Firat, U. Cahgulu and H. Durmus, A study of wear of aged aluminum alloys 2XXX and 6XXX within the manova statistical analysis, *Metal Science and Heat Treatment*, 53, 2011.
- [17] A. May, M.A Belouchrani, S. Taharboucht and A. Boudras, Influence of heat treatment on the fatigue behaviour of two aluminium alloys 2024 and 2024 plated, *Procedia Engineering*, 2, pp. 1795–1804, 2010.
- [18] Ali Merati, A study of nucleation and fatigue behavior of an aerospace aluminum alloy 2024-T3, *International Journal of Fatigue*, 27, pp. 33–44, 2005.
- [19] R. Jurcevic, D. L. DuQuesnay, T. H. Topper and M. A. Pompetzki, Fatigue damaged accumulation in 2024-T351 aluminium subjected to periodic reversed overloads, *International Journal of Fatigue*, 12, pp. 259-266, 1990.

- [20] S. Khan, A. Vyshnevskyy and J. Mosler, Low cycle lifetime assessment of Al2024 alloy, *International Journal of Fatigue*, 32, pp. 1270–1277, 2010.
- [21] T. Ludian and L. Wagner, Effect of age-hardening conditions on high-cycle fatigue performance of mechanically surface treated Al 2024, *Materials Science and Engineering A*, 468–470, pp. 210–213, 2007.
- [22] Al.Th. Kermanidis, P.V. Petroyiannis and Sp.G. Pantelakis, Fatigue and damage tolerance behaviour of corroded 2024 T351 aircraft aluminum alloy, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 43, pp. 121–132, 2005.
- [23] Craig Purry, Alan Fien and Krishnakumar Shankar, The effect of corrosion preventative compound on fatigue crack growth properties of 2024-T351 aluminium alloys, *International Journal of Fatigue*, 25, pp. 1175–1180, 2003.
- [24] C.A. Rodopoulos, J.-H. Choi, E.R. de los Rios and J.R. Yates, Stress ratio and the fatigue damage map—Part II: The 2024-T351 aluminium alloy, *International Journal of Fatigue*, 26, pp. 747–752, 2004.
- [25] J.R. Davis, editor. ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 1993.
- [26] Jianqiang Chen, Yazid Madi, Thilo F. Morgeneyer and Jacques Besson, Plastic flow and ductile rupture of a 2198 Al–Cu–Li aluminum alloy, *Computational Materials Science*, 50, pp. 1365–1371, 2011.
- [27] A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus and W.S. Miller, Recent development in aluminium alloys for aerospace applications, *Materials Science and Engineering A*, 280, pp. 102–107, 2000.
- [28] D. Steglich, H. Wafai and J. Besson, Interaction between anisotropic plastic deformation and damage evolution in Al 2198 sheet metal, *Engineering Fracture Mechanics*, 77, pp. 3501–3518, 2010.
- [29] Hongying Li, Yi Tang, Zaide Zeng, Ziqiao Zheng and Feng Zheng, Effect of ageing time on strength and microstructures of an Al–Cu–Li–Zn–Mg–Mn–Zr alloy, *Materials Science and Engineering A*, 498, pp. 314–320, 2008.
- [30] T.F. Morgeneyer, M.J. Starink, S.C. Wang and I. Sinclair, Quench sensitivity of toughness in an Al alloy: Direct observation and analysis of failure initiation at the precipitate-free zone, *Acta Materialia*, 56, pp. 2872–2884, 2008.
- [31] L.P. Borrego, L.M. Abreu, J.M. Costa and J.M. Ferreira, Analysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys, *Engineering Failure Analysis*, 11, pp. 715–725, 2004.
- [32] M.S. Song, Y.Y. Kong, M.W. Ran and Y.C. She, Cyclic stress–strain behavior and low cycle fatigue life of cast A356 alloys, *International Journal of Fatigue*, 33, pp. 1600–1607, 2011.
- [33] A.R. Emami, S. Begum, D.L. Chen, T. Skszek, X.P. Niu, Y. Zhang and F. Gabbianelli, Cyclic deformation behavior of a cast aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 516, pp. 31–41, 2009.
- [34] ASTM E8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [35] ASTM E466 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.
- [36] C. Ngiau and D. Kujawski, Sequence effects of small amplitude cycles on fatigue crack initiation and propagation in 2024-T351 aluminum, *International Journal of Fatigue*, 23, pp. 807-815, 2001.
- [37] P. Cavaliere, A. De Santis, F. Panella and A. Squillace, Effect of anisotropy on fatigue properties of 2198 Al–Li plates joined by friction stir welding, *Engineering Failure Analysis*, 16, pp. 1856–1865, 2009.
- [38] D. Jíša, P. Liškutín, T. Kruml and J. Polák, Small fatigue crack growth in aluminium alloy EN-AW 6082/T6, *International Journal of Fatigue*, 32, pp. 1913–1920, 2010.

- [39] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1, An Introduction to their Properties and Applications*, Department of Engineering, University of Cambridge, UK, 2<sup>nd</sup> edition, 1996.
- [40] A. May, M.A. Belouchrani, A. Manaa and Y. Bouteghrine, Influence of fatigue damage on the mechanical behaviour of 2024-T3 aluminum alloy, *Procedia Engineering*, 10, pp. 798–806, 2011.
- [41] Y. El-Madhoun, A. Mohamed and M.N. Bassim, Cyclic stress-strain response and dislocation structures in polycrystalline aluminum, *Materials and Engineering A*, 359, pp. 220-227, 2003.
- [42] ASTM E646 Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials
- [43] Fractography, Volume 12, ASM Handbook, ASM International, 1987.
- [44] J. Zuidema, F. Veer and C. Van Kranenburg, Shear lips on fatigue fracture surfaces of aluminum alloys, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Volume 28, Issue 1-2, pages 159–167, 2005.
- [45] J.D. Robson, P.B. Prangnell, Dispersoid precipitation and process modelling in zirconium containing commercial aluminium alloys, *Acta Mater.*, 49 (4), pp. 599–61, 2001.
- [46] Morgeneyer, T.F., Starink, M.J. and Sinclair, I., Experimental analysis of toughness in 6156 Al-alloy sheet for aerospace application, *Materials Science Forum*, 519-521, 1023-1028, 2006.
- [47] A.K. Vasudevan, R.D. Doherty, Grain boundary ductile fracture in precipitation hardened aluminum alloys, *Acta Metall.* Vol. 35, p. 1193-1219, 1987.

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας προσέγγισης. ....	17
Σχήμα 2: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E8. ....	21
Σχήμα 3: Γεωμετρία δοκιμίου κόπωσης σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E466.....	21
Σχήμα 4: Ονοματολογία περιοδικών φορτίσεων.....	22
Σχήμα 5: Καμπύλη ονομαστικών τάσεων - ονομαστικών παραμορφώσεων του δοκιμίου αναφοράς κράματος 2024-T3 στη διεύθυνση έλασης (L). ....	23
Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη λίγο πριν την έναρξη της δοκιμής κόπωσης. ....	25
Σχήμα 7:Τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 2024-T3. ....	27
Σχήμα 8: Τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 2198-T351.	28
Σχήμα 9: Τυπικές καμπύλες ονομαστικής τάσης – ονομαστικής παραμόρφωσης για το κράμα αλουμινίου 6156-T4.....	29
Σχήμα 10: Καμπύλες κόπωσης $S-N$ του κράματος αλουμινίου 2024. ....	31
Σχήμα 11: Καμπύλες κόπωσης $S-N$ του κράματος αλουμινίου 2198. ....	34
Σχήμα 12: Καμπύλες κόπωσης $S-N$ του κράματος αλουμινίου 6156. ....	36
Σχήμα 13: Μέγιστη ειδική εφαρμοζόμενη τάση έναντι των κύκλων κόπωσης για τη θραύση για τα κράματα αλουμινίου 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4. ....	37
Σχήμα 14: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 2024-T3 σε περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης. ....	38
Σχήμα 15: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 6156-T4 σε περιοχή με υψηλή τιμή εύρους τάσης. ....	39
Σχήμα 16: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 2024-T3 σε περιοχή με μεσαία τιμή εύρους τάσης.....	40
Σχήμα 17: Συμπεριφορά κράματος αλουμινίου 6156-T4 σε περιοχή με χαμηλή τιμή εύρους τάσης.....	41
Σχήμα 18: Μεθοδολογία αποτίμησης εναπομένουσας ελαστικότητας $E_{un}$ και απορροφούμενης ενέργειας $W$ ανά κύκλο κόπωσης. ....	43
Σχήμα 19: Βρόγχος υστέρησης ενός κύκλου κόπωσης και μεθοδολογία υπολογισμού της εναπομένουσας ελαστικότητας στον κλάδο αποφόρτισης.....	44
Σχήμα 20: Εναπομένουσα ελαστικότητα έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.....	45
Σχήμα 21: Εναπομένουσα ελαστικότητα έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2198-T351.....	46
Σχήμα 22: Εναπομένουσα ελαστικότητα έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.....	48
Σχήμα 23: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι αριθμού κύκλων κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.....	49
Σχήμα 24: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.....	50
Σχήμα 25: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι αριθμού κύκλων κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.....	51
Σχήμα 26: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο κόπωσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.....	52
Σχήμα 27: Πειραματικός προσδιορισμός της σταθεράς $C$ του κανόνα του <i>Basquin</i> για το κράμα αλουμινίου 2024-T3.	53
Σχήμα 28: Πειραματικός προσδιορισμός της σταθεράς $C$ του κανόνα του <i>Basquin</i> για το κράμα αλουμινίου 6156-T4.	54
Σχήμα 29: Κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3.....	56
Σχήμα 30: Κυκλική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4.....	57
Σχήμα 31: Εκθέτης εργοσκληρυνσης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3. ....	58

Σχήμα 32: Εκθέτης εργοσκήρυξης έναντι ποσοστού βλάβης – κόπωσης κράματος αλουμινίου 6156-T4. ....	59
Σχήμα 33: Σύγκριση του εκθέτη εργοσκήρυξης για τα κράματα αλουμινίου 2024-T3 και 6156-T4. ....	60
Σχήμα 34: Τύποι θραύσης ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση κατά τη ψαθυρή θραύση. ....	62
Σχήμα 35: Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 2198-T351 το οποίο αστόχησε μετά από 135.555 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση $\sigma_{\max} = 285$ MPa: (α) σημείο πυρήνωσης της ρωγμής και (β) ενδοκρυσταλλική θραύση και σχηματισμένες γραμμώσεις κατά τη διάδοση ρωγμής κόπωσης.....	63
Σχήμα 36: Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 2198-T351: (α) το σχηματισμένο χείλος διάτμησης στο κέντρο του δοκιμίου Νο05 και (β) περιοχή με μεγάλη πλαστική παραμόρφωση με διεύρυνση και συνένωση μικρο-οπών. ....	64
Σχήμα 37: Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο11 από κράμα 2198-T351 το οποίο αστόχησε μετά από 1.609.940 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση $\sigma_{\max} = 250$ MPa: (α) περιοχή μετάβασης από τραχεία σε λεία επιφάνεια και (β) περιοχή θραύσης με έντονες πλαστικές παραμορφώσεις και παρουσία γραμμώσεων κόπωσης. ....	65
Σχήμα 38: Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 6156-T4 το οποίο αστόχησε μετά από 924.667 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση $\sigma_{\max} = 180$ MPa: (α) μετάβαση από τη λεία στην τραχεία επιφάνεια και (β) διεύθυνση διάδοσης ρωγμής κατά το πάχος του δοκιμίου. ....	66
Σχήμα 39: Φωτογραφία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Νο05 από κράμα 6156-T4 με $\sigma_{\max} = 180$ MPa που δείχνει τις σχηματισμένες κοιλότητες από διεύρυνση μικρο-οπών που είναι χαρακτηριστική της όλκιμης θραύσης.....	67
Σχήμα 40: Φωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου με κωδικό Fat06 από κράμα 6156-T4 το οποίο αστόχησε μετά από 21.010 κύκλους καταπόνησης κάτω από σταθερού εύρους τάσης κυκλική κόπωση με μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση $\sigma_{\max} = 330$ MPa: (α) λεία επιφάνεια κατά το πάχος του δοκιμίου και (β) επιφάνεια με μικτό τρόπο θραύσης με περικρυσταλλική και ενδοκρυσταλλική θραύση.....	68

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κωδικοποίηση των ελατών κραμάτων του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης. ....	9
Πίνακας 2: Κωδικοποίηση των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου, ανάλογα με τα κύρια στοιχεία προσθήκης. ....	9
Πίνακας 3: Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με την Aluminum Association, ανάλογα με τις κατεργασίες που έχουν υποστεί. ....	10
Πίνακας 4: Χημική σύσταση του κράματος 2024. ....	18
Πίνακας 5: Θερμική κατεργασία του κράματος 2024-T3. ....	19
Πίνακας 6: Χημική σύσταση του κράματος 2198. ....	19
Πίνακας 7: Χημική σύσταση του κράματος 6156. ....	20
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2024-T3. ....	27
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2198-T351. ....	28
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 6156-T4. ....	29
Πίνακας 11: Δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια κράματος 2024-T3. ....	30
Πίνακας 12: Δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια κράματος 2198-T351. ....	33
Πίνακας 13: Δοκιμές κόπωσης σε δοκίμια κράματος 6156-T4. ....	35
Πίνακας 14: Ειδικές μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου 2024-T3, 2198-T351 και 6156-T4. ....	36
Πίνακας 15: Σταθερές που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά σε κόπωση. ....	54