

Επίδραση υπεργήρανσης στην κυκλική συμπεριφορά τάσης – παραμόρφωσης κράματος Αλουμινίου 2024-T3

Α. Τζαμτζής^{1,*}, Α.Θ. Κερμανίδης²

¹ Εργαστήριο Μηχανικής & Αντοχής Υλικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος, Ελλάδα

¹ atzam@uth.gr.

² akermanidis@mie.uth.gr.

Περίληψη

Η επίδραση υπεργήρανσης στη κυκλική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3 μελετήθηκε πειραματικά. Υπεργήρανση του υλικού επιτεύχθηκε με χρήση κατάλληλης θερμικής κατεργασίας χρησιμοποιώντας ως βάση την αρχική θερμική κατεργασία T3. Η κυκλική συμπεριφορά παραμόρφωσης του υλικού (βρόγχοι υστέρησης) προσδιορίστηκε πριν και μετά από την θερμική κατεργασία. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν κατασκευάστηκαν οι κυκλικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και αποτιμήθηκαν χαρακτηριστικές κυκλικές ιδιότητες του υλικού. Τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση της κυκλικής συμπεριφοράς του υλικού λόγω υπεργήρανσης στην ολιγοκυκλική περιοχή και υποβάθμιση της στην πολυκυκλική περιοχή.

Λέξεις-κλειδιά: κράμα αλουμινίου; θερμική κατεργασία; υπεργήρανση; κυκλική παραμόρφωση;

1. Εισαγωγή

Τα δομικά μέρη κατασκευών περιλαμβάνουν στοιχεία με γεωμετρικές ασυνέχειες όπως οπές, εγχοπές κτλ. που είναι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων κατά την καταπόνηση της κατασκευής. Κάτω από εναλλασσόμενα φορτία τέτοιες περιοχές υποβάλλονται τοπικά σε πλαστικά εύρη παραμορφώσεων με αποτέλεσμα την πρόωφη εκκίνηση ρωγμών κόπωσης.

Κατεργασίες τεχνητής γήρανσης που χρησιμοποιούνται με κύριο σκοπό την αύξηση της αντοχής θερμικά κατεργασίμων κραμάτων αλουμινίου [1], μπορούν να επηρεάσουν την κυκλική συμπεριφορά παραμόρφωσης του υλικού [2-5]. Στην εργασία [2] θερμική κατεργασία κράματος αλουμινίου 7030 σε κατάσταση πριν από τη μέγιστη σκληρότητα έδειξε βελτίωση της διάρκειας ζωής του κράματος του υλικού σε σχέση με το υλικό σε κατάσταση μέγιστης σκληρότητας (peak hardness). Αναφορές στην επίδραση υπεργήρανσης στην ολιγοκυκλική κόπωση του υλικού εστιάζουν κυρίως σε συνθήκες θερμικής κατεργασίας κοντά στη μέγιστη σκληρότητα του υλικού [3,5], όπου υπάρχει συνοχή των σωματιδίων ενίσχυσης με το κρυσταλλικό πλέγμα. Στην εργασία [5] παρατηρήθηκε ότι θερμική κατεργασία πριν την κατάσταση μέγιστης σκληρότητας (under-aged) οδηγεί σε διαφορετικό βαθμό κυκλικής εργοσκληρύνησης σε σχέση με κατεργασία υπεργήρανσης (over-aged) σε ίδια επίπεδα σκληρότητας. Αντιθέτως, δεν υπάρχει επαρκής πληροφορία για την επίδραση υπεργήρανσης σε υψηλές θερμοκρασίες στην κυκλική συμπεριφορά παραμόρφωσης του υλικού που τα σωματίδια ενίσχυσης είναι μη-διαπερατά και δεν εμφανίζουν συνοχή με τη μήτρα.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα κυκλικής συμπεριφοράς κράματος αλουμινίου 2024-T3 που έχει εκτεθεί σε υψηλή θερμοκρασία υπεργήρανσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν βελτίωση της ολιγοκυκλικής συμπεριφοράς του υλικού σε σχέση με το υλικό T3 και υποβάθμιση της συμπεριφοράς σε ελαστικές κυκλικές παραμορφώσεις.

2. Υλικό

Για την πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε αεροναυπηγικό κράμα Αλουμινίου 2024, σε μορφή λεπτού ελάσματος πάχους 3.2mm, με θερμική κατεργασία T3, η οποία περιλαμβάνει διαλυτοποίηση στους 495°C, εν ψυχρώ κατεργασία και φυσική γήρανση. Η ονομαστική χημική σύσταση του κράματος, σε (%) κ.β., είναι Al-4.3Cu1.5Mg-0.6Mn.

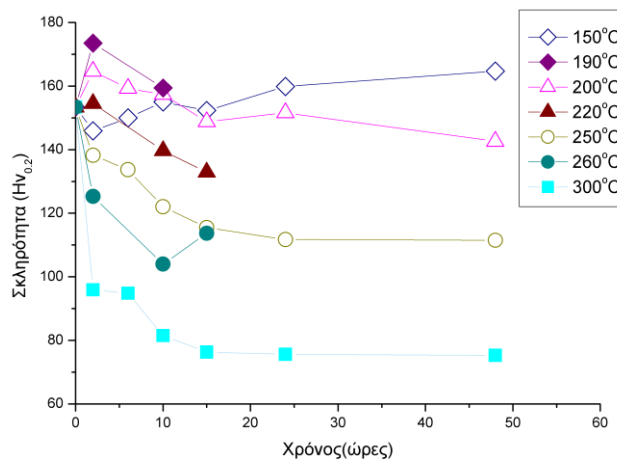
3. Θερμική Κατεργασία

3.1 Διάγραμμα υπερήρανσης

Για την επιλογή των παραμέτρων της θερμικής κατεργασίας υπερήρανσης (θερμοκρασία και χρόνος), αρχικά έγινε προσδιορισμός του διαγράμματος υπερήρανσης του υλικού. Ο προσδιορισμός του διαγράμματος, έγινε με χρήση δοκιμίων διαστάσεων $1 \times 1 \text{mm}^2$ τα οποία τοποθετήθηκαν σε ειδικό φούρνο υψηλών θερμοκρασιών και υπεβλήθησαν σε θερμική κατεργασία με θερμοκρασίες μεταξύ $150\text{-}300^\circ\text{C}$ και για χρόνους από 2 έως 48 ώρες. Μετά την θερμική κατεργασία, ακολούθησαν μετρήσεις σκληρότητας των δοκιμίων. Οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας έγιναν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E92, με την μέθοδο Vickers και φορτίο επιβολής 200gr ($\text{HV}_{0.2}$) για χρόνο 10 δευτερόλεπτα.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η μεταβολή της μικροσκληρότητας με τον χρόνο γήρανσης. Σε θερμοκρασίες μεταξύ $150\text{-}200^\circ\text{C}$ δεν παρουσιάζεται σημαντική μεταβολή της σκληρότητας. Σε υψηλές θερμοκρασίες (220 έως 300°C), παρουσιάζεται πτώση την μικροσκληρότητας η οποία φθάνει την τιμή των 75 Hv για θερμική κατεργασία 300°C ($10\text{-}15$ ώρες). Η πτώση αυτή αντιστοιχεί στο 50% της σκληρότητας στην αρχική κατάσταση T3.

Με βάση την μεταβολή της σκληρότητας, επιλέχθηκε η θερμοκρασία των 300°C για χρόνο κατεργασίας 15ωρών. Το υλικό που προέκυψε μετά την θερμική κατεργασία αναφέρεται παρακάτω ως A300.



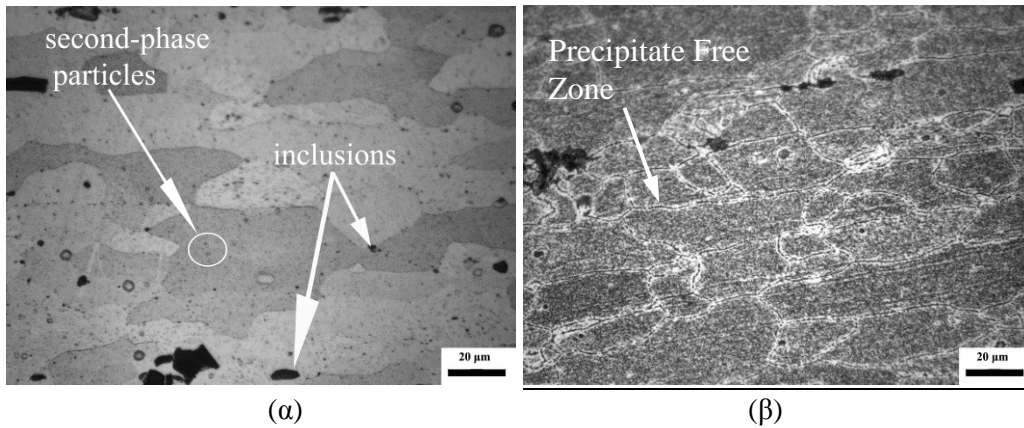
Σχ.1 Καμπύλες υπερήρανσης κράματος Al2024-T3

3.2 Μικροδομή

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μικροδομή του υλικού πριν και μετά από την θερμική κατεργασία. Η προετοιμασία δοκιμίων για τον έλεγχο της μικροδομής περιελάμβανε εγκιβωτισμό, λείανση και στίλβωση με διαμαντόπαστα και αλουμίνα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή με το αντιδραστήριο Keller's (2mL HF (48\%) , 3mL HCl , 5mL HNO_3 , $190\text{mL H}_2\text{O}$) για $5\text{-}10\text{sec}$.

Η μικροδομή του υλικού στην κατάσταση T3 (Σχήμα 2α) περιλαμβάνει εγκλείσματα (inclusions) (i) Al-Cu (ii) Al-Cu-Fe-Mn και (iii) Al-Cu-Fe-Si-Mn όπως παρατηρήθηκε από ανάλυση με μέθοδο SEM/EDS. Οι φάσεις ισχυροποίησης του κράματος 2024 (second-phase particles) είναι οι: Al_2Cu (θ' φάση) και Al_2CuMg (S φάση) [6].

Η μικροδομή του υλικού A300 (Σχήμα 2β), περιλαμβάνει φάσεις ισχυροποίησης που έχουν διαλυτοποιηθεί από τα όρια των κόκκων και έχουν καθιζάνει στο εσωτερικό τους. Παρατηρείται η χαρακτηριστική ζώνη PFZ (Precipitate Free Zone) στα όρια των κόκκων. Παράλληλα, στο εσωτερικό των κόκκων, παρατηρείται διεύρυνση των φάσεων ισχυροποίησης. Τα εγκλείσματα δείχνουν να μην έχουν μεταβληθεί.



Σχ.2 Μικροδομή υλικού α) σε κατάσταση T3 β) μετά από υπεργήρανση στους 300°C για 15 ώρες

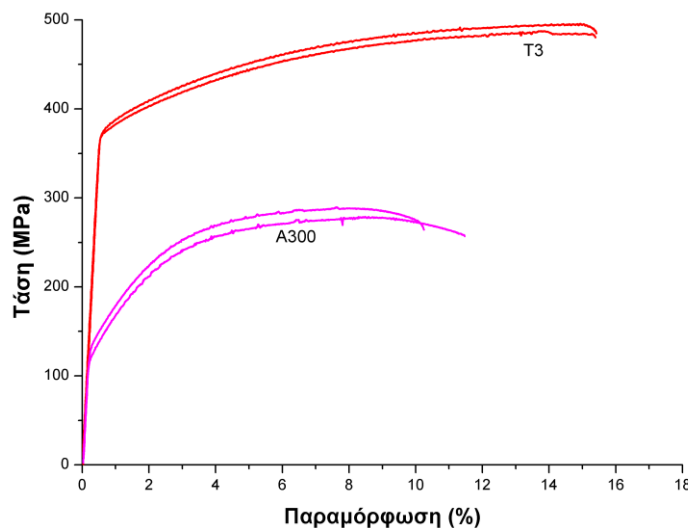
4. Μηχανικές δοκιμές

4.1 Δοκιμές εφελκυσμού

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού πριν και μετά από θερμική κατεργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 8M-01. Οι δοκιμές έγιναν με σταθερό ρυθμό μετατόπισης 0,5mm/min. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (τιμές μηχανικών ιδιοτήτων) και στο Σχήμα 3 (ονομαστικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης σ - ϵ) δείχνουν σημαντική πτώση του ορίου διαρροής του υλικού μετά την θερμική κατεργασία. Η νέα τιμή του ορίου διαρροής φτάνει το 60% της τιμής στην αρχική κατάσταση T3. Η τιμή της παραμόρφωσης θραύσης μετά την υπεργήρανση ανέρχεται επίσης στο 60% της αρχικής τιμής. Επιπλέον, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, μετά την θερμική κατεργασία παρατηρείται σημαντική αύξηση του συντελεστή εργοσκλήρυνσης που σχετίζεται με την δημιουργία βρόγχων γραμμοαταξιών για την υπέρβαση των μη διαπερατών σωματιδίων ενίσχυσης, δηλαδή με αλλαγή της συμπεριφοράς εργοσκλήρυνσης του υλικού [7].

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

	Όριο διαρροής $R_{0,2}$ (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης A_{25} (%)	Όριο Θραύσης R_m (MPa)	Συντελεστής εργοσκλήρυνσης n	Συντελεστής αντοχής H (MPa)
T3	375	15	490	0,100	380
A300	135	11	285	0,285	175

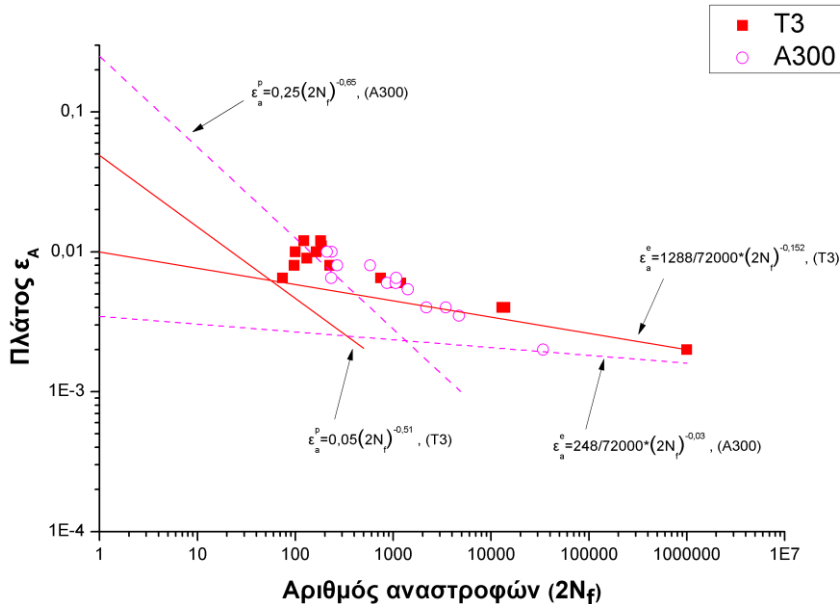


Σχ.3 Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών εφελκυσμού

4.2 Δοκιμές κόπωσης (σταθερό εύρος παραμόρφωσης)

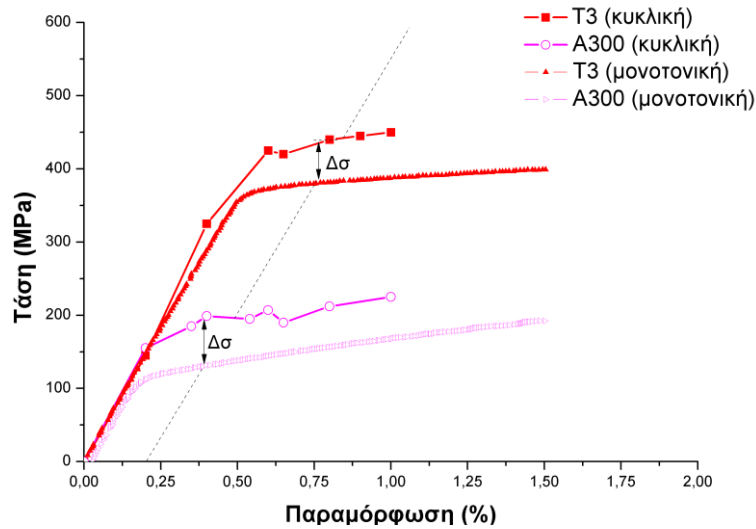
Πριν και μετά την θερμική κατεργασία, πραγματοποιήθηκαν πειράματα κόπωσης σύμφωνα με την οδηγία SEP 140 [8]. Τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου, με σταθερό εύρος παραμόρφωσης και λόγο $R=-1$. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι καμπύλες του πλάτους παραμόρφωσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των αναστροφών του φορτίου. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι σε υψηλές τιμές πλάτους παραμόρφωσης ($\geq 0,6\%$), αντιστοιχεί στην ολιγοκυκλική περιοχή κόπωσης, το υλικό A300 παρουσιάζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με το υλικό σε κατάσταση T3. Αντιθέτως, με μείωση της τιμής του πλάτους παραμόρφωσης κάτω από $0,6\%$ η συμπεριφορά καθορίζεται από ελαστικές παραμορφώσεις και εδώ το υλικό T3 παρουσιάζει υψηλότερη διάρκεια ζωής σε σχέση με το A300.

Η συμπεριφορά παραμόρφωσης-διάρκειας ζωής των δύο υλικών προσεγγίστηκε με τις καμπύλες Manson-Coffin: $\Delta\epsilon_p/2=\epsilon_f(N_f)^c$ (ολιγοκυκλική συμπεριφορά) και Basquin: $\epsilon_{el}=(\sigma_f/E)(N_f)^b$ (πολυκυκλική συμπεριφορά), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Εξετάζοντας την συμπεριφορά των υλικών στην ολιγοκυκλική και πολυκυκλική περιοχή μέσω των προσεγγιστικών συναρτήσεων καταλήγει κανείς στα ίδια συμπεράσματα που αναλύθηκαν παραπάνω. Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ϵ_f που περιγράφει την συμπεριφορά στην ολιγοκυκλική περιοχή για το υλικό T3 βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα από τις τιμές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία ($\epsilon_f \approx 0,2$). Η απόκλιση αυτή δεν επηρεάζει την γενική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα υλικά στην περιοχή ολιγοκυκλικής κόπωσης και οφείλεται σε αυξημένη πειραματική διασπορά σημείων στην περιοχή υψηλών παραμορφώσεων.

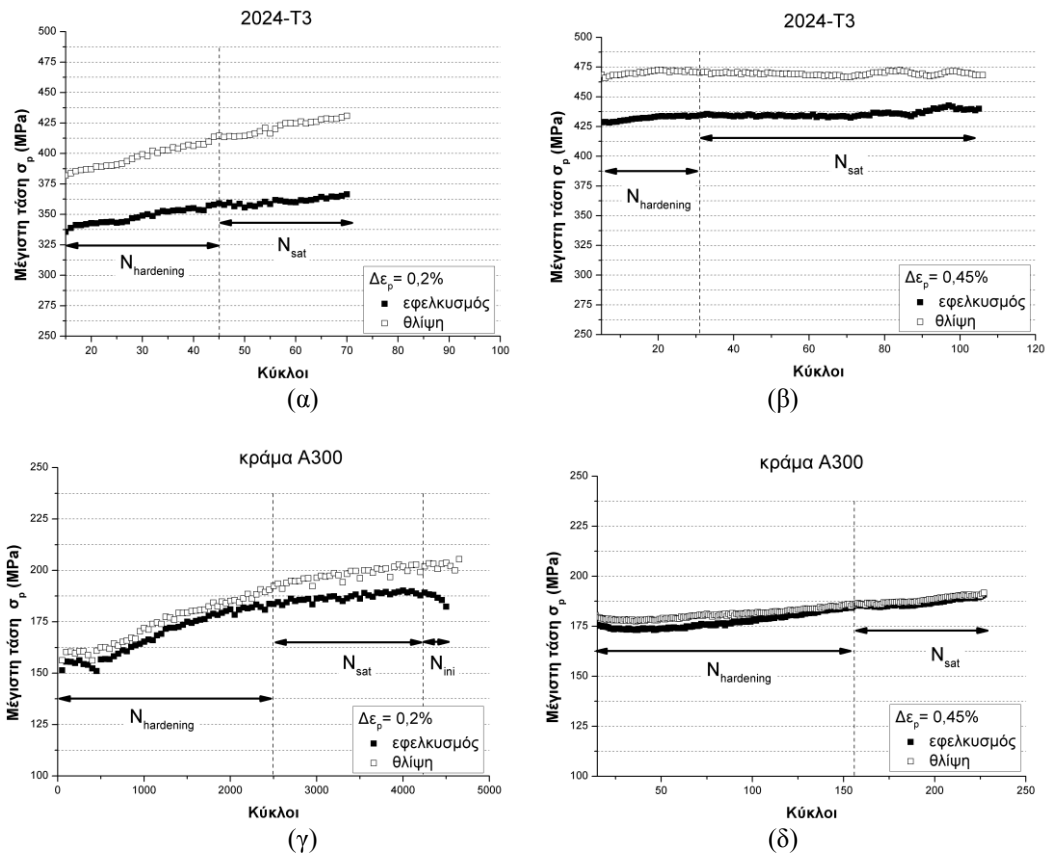


Σχ.4 Καμπύλες πλάτους παραμορφώσεως σε συνάρτηση με τον αριθμό των αναστροφών του φορτίου για το υλικό πριν και μετά τη θερμική κατεργασία

Από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, προσδιορίστηκε η μέγιστη τάση που αντιστοιχεί στον σταθεροποιημένο βρόγχο υστέρησης του υλικού. Στην συνέχεια, κατασκευάστηκαν οι καμπύλες κυκλικής τάσεως-παραμόρφωσης των 2 κραμάτων. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης μονοτονικής και κυκλικής συμπεριφοράς. Από τις καμπύλες παρατηρείται ότι και τα 2 κράματα υφίσταται κυκλική εργοσκλήρυνση. Η αύξηση της τιμής του ορίου διαρροής των υλικών λόγω κυκλικής εργοσκλήρυνσης αντιστοιχεί σε $17,5\%$ για την κατάσταση T3 (440 MPa έναντι 375 MPa στον μονοτονικό εφελκυσμό) και 48% για το υλικό A300 (200 MPa έναντι 135 MPa στον μονοτονικό εφελκυσμό).



Σχ.5 Σύγκριση μονοτονικής και κυκλικής συμπεριφοράς κράματος 2024-T3 & A300



Σχ.6 Καμπύλες μέγιστης τάσης – κύκλων φόρτισης κάτω από σταθερό πλάτος πλαστικής παραμόρφωσης (α) 2024-T3 ($\Delta\epsilon_p=0,2\%$) (β) 2024-T3 ($\Delta\epsilon_p=0,45\%$) (γ) A300 ($\Delta\epsilon_p=0,2\%$) (δ) A300 ($\Delta\epsilon_p=0,45\%$)

Η κυκλική εργοσκήρυνση του υλικού λαμβάνεται από την αύξηση του πλάτους τάσης σε δεδομένο εύρος επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το εύρος πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να γίνει καλύτερα αντιληπτή η διαφορετική συμπεριφορά εργοσκήρυνσης των υλικών σε κυκλικά φορτία. Στα Σχήματα 6(α-δ) παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης τάσης με τους κύκλους καταπόνησης για πλάτος πλαστικής παραμόρφωσης 0,2% και 0,45%. Κατά την αρχικό στάδιο κυκλικής καταπόνησης ($N_{hardening}$) το υλικό υφίσταται κυκλική εργοσκήρυνση, η οποία οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης τάσης σ_p . Στην συνέχεια ακολουθεί η φάση (N_{sat}) κατά την οποία η τιμή της

μέγιστης τάσης μπορεί να θεωρηθεί σταθεροποιημένη για μεταβολή τάσης <2,5%. Για πλάτος πλαστικής παραμόρφωσης 0.2%, στο υλικό T3 παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τάσης κατά 9% που αντιστοιχεί στον σταθεροποιημένο βρόγχο, ενώ για το υλικό A300 η αντίστοιχη αύξηση είναι 26%. Για πλάτος πλαστικής παραμόρφωσης 0,45%, στο υλικό T3 αυξάνεται το πλάτος τάσης κατά 2%, ενώ στο υλικό A300 η αύξηση φτάνει στο 8% της αρχικής τιμής.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι για σταθερό εύρος πλαστικής παραμόρφωσης η (%) μεταβολή της μέγιστης τάσης σ_{max} , που αντιστοιχεί στο ποσοστό εργοσκλήρυνσης, είναι μεγαλύτερη στο υλικό A300 από ότι στο υλικό 2024-T3. Αυτό μπορεί να εξηγήσει την μεγαλύτερη αντίσταση σε θραύση που παρουσιάζει το υλικό A300 στην ολιγοκυκλική περιοχή κόπωσης, σε σχέση με το T3, παρόλο που το T3 παρουσιάζει σχετικά μεγαλύτερη ολκιμότητα (15% έναντι 11% του A300). Αντίθετα, στην περιοχή πολυκυκλικής κόπωσης η υψηλότερη αντοχή του κράματος T3 οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής όταν οι παραμορφώσεις παραμένουν ελαστικές.

5. Συμπεράσματα

Η επίδραση της υπεργήρανσης στη κυκλική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης κράματος αλουμινίου 2024-T3 μελετήθηκε πειραματικά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Το υλικό μετά την υπεργήρανση παρουσιάζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με το υλικό σε κατάσταση T3 για υψηλές τιμές του πλάτους παραμόρφωσης. Αντιθέτως, καθώς μειώνεται η τιμή του πλάτους παραμόρφωσης παρατηρείται αλλαγή συμπεριφοράς με το υλικό T3 να παρουσιάζει υψηλότερη διάρκεια ζωής.
- Το υλικό μετά την υπεργήρανση παρουσιάζει υψηλότερα επίπεδα κυκλικής εργοσκλήρυνσης σε σχέση με το υλικό T3.

Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Gilbert Kaufman J (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, Ohio.
2. Hornqvist M, Karlsson B (2008). Influence of heat treatment on the cyclic deformation properties of aluminium alloy AA7030. *Mat. Science and Engineering A*, 479, 345-355.
3. Hidayetoglu T K, Pica P, Haworth L (1985). Aging Dependence of the Bauschinger Effect in Aluminum Alloy 2024. *Mat. Science and Engineering*, 73, 65-76.
4. Hopperstad O S, Langseth M, Remseth S (1995). Cyclic Stress-Strain Behavior of alloy AA606, Part I: uniaxial experiment and modeling. *International Journal of Plasticity*, 11, 725-739.
5. Mohamed A, El-Madhoun Y, Bassin M N (2005). The effect of tempering on low cycle fatigue behavior of Al-2024, *Journal of Materials Processing Technology* 162-163, 362-366.
6. Huda Z, Taid N I, Zaharinie T (2009). Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy, *Materials Chemistry and Physics* 113, 515-517.
7. ASM Handbook Volume 4 (1991): *Heat Treating*, ASM International, Ohio.
8. SEP 1240 (2006), *Testing and Documentation Guideline for the Experimental Determination of Mechanical Properties of Steel for CAE Calculations*, Institute VDEh, 1st edition, German.