

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΜΗ ΜΟΛΥΒΔΟΥΧΟΥΣ ΟΡΕΙΧΑΛΚΟΥΣ

Οικονόμου Βασιλική

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων Καθηγητής: Γ. Φούρλαρης



Απρίλιος 2014 ΑΘΗΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	viii
ПЕРІЛНҰН	xii
1.0. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2.0. ΣΤΟΧΟΙ – ΣΚΟΠΟΙ	2
3.0. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	3
3.1. Γενικά στοιχεία ορείχαλκων	3
3.1.1. Ονοματολογία ορείχαλκων	7
3.2. Ταξινόμηση ορείχαλκων	8
3.2.1. Ταζινόμηση με βάση την κρυσταλλική δομή	9
<u>3.2.1.1 α-ορείχαλκος</u>	10
<u>3.2.1.2 α-β-ορείχαλκος</u>	11
<u>3.2.1.3 β-οείχαλκος</u>	12
<u>3.2.2. Ταζινόμηση με βάση τις ιδιότητων του ορείχαλκου</u>	12
<u>3.2.2.1 Ορείχαλκος ελεύθερης κατεργασιμότητας</u>	13
<u>3.2.2.2 Ορείχαλκος υψηλής αντοχής</u>	14
<u>3.2.3. Είδη Ορείχαλκων</u>	15
3.3. Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ορείχαλκους	17
<u>3.3.1. Μόλυβδος</u>	17
<u>3.3.2. Κασσίτερος</u>	18
<u>3.3.3. Πυρίτιο</u>	18
<u>3.3.4. Αρσενικό</u>	18
<u>3.3.5. Νικέλιο</u>	19
<u>3.3.6. Σίδηρος και Μαγγάνιο</u>	19
<u>3.3.7. Αλουμίνιο</u>	19
3.4. Ιδιότητες Ορείχαλκων	20
3.4.1. Κατεργασιμότητα	20
<u>3.4.2. Αντοχή</u>	21

ſ

21
22
22
22
23
23
24
24
25
28
29
29
30
30
30
31
31
32
32
32
32
33
34
35
35
36
37
37
38
38
38
39

-

4.0.

4.3.4.Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS,	
<u>XRayMicroanalysis)</u>	40
4.4. Μέθοδοι Μέτρησης των Μηχανικών Ιδιοτήτων	40
<u>4.4.1. Δοκιμές Σκληρότητας</u>	40
5.0. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
5.1. Εξέταση της Μικροδομής	42
<u>5.1.1. Δοκίμιο αναφοράς μετά από θερμική κατεργασία και βαφή</u>	2
5.1.2. Ψυχρά Παραμορφωμένα Δοκίμια 46	
5.1.2.1. Δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 5%	47
<u>5.1.2.2. Δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 20%</u>	58
<u>5.1.2.3. Δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 40%</u>	71
5.2. Μηχανικές Ιδιότητες	78
<u>5.2.1. Θερμικές κατεργασίες στους 540°C</u>	78
<u>5.2.2.Θερμικές κατεργασίες στους 600°C</u>	81
6.0. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά των επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Φούρλαρη, ο οποίος με βοήθησε καθοριστικά με τις συμβουλές και τις υποδείξεις του και αφοσιώθηκε σημαντικά στην επίβλεψη της προόδου της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ για τον χρόνο που διέθεσε και την προθυμία του για την απάντηση των αποριών μου.

Ευχαριστώ την κ. Η. Χαλικιά και τον κ. Χ. Παναγόπουλο για την τιμή που μου έκαναν με την αποδοχή τους να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους διδακτορικούς φοιτητές Σύλβια Ζορμαλιά για τον χειρισμό του SEM και της μηχανής ψυχρής έλασης και το ενδιαφέρον της για όποιο άλλο πρόβλημα ανέκυψε κατά καιρούς, καθώς και τη Μαρία Γεωργίου για την προθυμία και τον ενθουσιασμό που έδειξε για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διπλωματική μου.

Ευχαριστώ τον κ. Τσακιρίδη για τη βοήθειά του στον χειρισμό του SEM και στον χειρισμό της μηχανής ψυχρής έλασης και για την γενικότερη βοήθεια που μου προσέφερε απλόχερα όποτε την χρειάστηκα.

Ευχαριστώ τον κο Γ. Χαραλαμπίτα για την αδιάκοπη προθυμία του να βοηθήσει σε θέματα λειτουργίας του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Ευχαριστώ όλους τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας για την κατά καιρούς βοήθειά τους και για την συνδρομή τους στην αρμονική λειτουργία του εργαστηρίου.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους παραπάνω για την ανιδιοτελή τους προσφορά που υπερέβη τις τυπικές τους αρμοδιότητές, καθώς και την οικογένειά μου και όλα τα φιλικά μου πρόσωπα για την ηθική τους υποστήριξη.

V

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.:Κραματικά στοιχεία μπορούν να προστεθούν στον ορείχαλκο για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του.

Πίνακας 2.: Οι φυσικές ιδιότητες του ειδικού ορείχαλκου Ecobrass.

Πίνακας 3.:Η χημική σύσταση του κράματος Ecobrass.

Πίνακας 4.:Τα τελικά πάχη που ελήφθησαν σε ορισμένους βαθμούς πλαστικής παραμόρφωσης.

Πίνακας 5.: Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της ενδομεταλλικής ένωσης με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 21, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Πίνακας 6.: Σημειακή στοιχειακή ανάλυση των φάσεων α και κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 21, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Πίνακας 7.:Σημειακή στοιχειακή ανάλυση των φάσεων α και κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 39, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Πίνακας 8.: Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της ενδομεταλλικής ένωσης με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 42, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

Πίνακας 9.:Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της ενδομεταλλικής ένωσης με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 47, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.

Πίνακας 10.:Σημειακή στοιχειακή ανάλυση των φάσεων α και κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 50, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h.

Πίνακας 11.: Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της φάσης κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 55, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.

Πίνακας 12.: Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της φάσης α με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 55, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.

Πίνακας 13.: Αποτελέσματα δοκιμών σκληρότητας στον ορείχαλκο Ecobrass με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες στους 540°C.

Πίνακας 14.: Αποτελέσματα δοκιμών σκληρότητας στον ορείχαλκο Ecobrassμε βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ορειχάλκινος αστρολάβος του 16^{ου} αιώνα.

Εικόνα 2.: Ο α-β ορείχαλκος.

Εικόνα 3.: Χρώματα που παρουσιάζουν τα διαφορετικά κράματα του ορείχαλκου.

Εικόνα 4.: Δοκιμές σε πόμολα και σε προστατευτικά ελάσματα έχουν δείξει ότι εκείνα που κατασκευάζονται από καθαρό ορείχαλκο είναι πιο υγιεινά.

Εικόνα 5.: Ψευδοδιμερές διάγραμμα Cu-Si-Zn με 4%κ.β. Si, στο τμήμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε Si [10]

Εικόνα 6.: Τριμερές διάγραμμα ισορροπίας Cu-Zn-Si.[11]

Εικόνα 7.: Το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu–Zn. **Εικόνα 8.:** Μορφές ορείχαλκου Ecobrass.

Εικόνα 9.: Οι τιμές αντιστοιχούν σε ποσοστό κατά βάρος (Wieland SW1 – Ecobrass).

Εικόνα 10.: Γεωμετρία του ίχνους του διεισδυτή της μεθόδου Vickers.

Εικόνα 11.: Διεισδυτής Vickers και αποτύπωμα.

Εικόνα 12.: Διάγραμμα XRD του δοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Ταυτοποιήθηκαν κορυφές των φάσεων κ και α.

Εικόνα 13.: Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.

Εικόνα 14.:Ηλεκτρονική μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.

Εικόνα 15.:Ηλεκτρονική μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.

Εικόνα 16.: Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.

Εικόνα 17.:Ελάσματα ορείχαλκου Ecobrass. Το δεύτερο έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 540°C (οξείδωση).

Εικόνα 18.:Δοκίμιο ορείχαλκου που έχει υποστεί ψυχρή παραμόρφωση μεγαλύτερη από 40% και έχει «σπάσει».

Εικόνα 19.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Εικόνα 20.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Εικόνα 21.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 22.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 23.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 24.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 24.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 25.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

Εικόνα 26.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30 min.

Εικόνα 27.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 28.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 29.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 30.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 30.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 31.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 32.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 33.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.

ix

Εικόνα 34.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Εικόνα 35.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Εικόνα 36.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Εικόνα 37.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 38.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 39.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 40.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 40.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 41.:Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 42.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 43.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 43.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 43.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

Εικόνα 44.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30min.

Εικόνα 45.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 46.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 47.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 48.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h. Εικόνα 49.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h. Εικόνα 50.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h. Εικόνα 50.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h. Εικόνα 51.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Εικόνα 52.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h. Εικόνα 53.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Εικόνα 54.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30 min.

Εικόνα 55.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 56.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 57.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 57.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h. Εικόνα 58.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 59.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 59.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 59.: Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h. Εικόνα 60.: Διάγραμμα σκληρότητας (HV) συναρτήσει του χρόνου (h) για τον ορείχαλκο Ecobrass με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40%, σε θερμοκρασία 540°C.

Εικόνα 61.: Διάγραμμα σκληρότητας (HVN) συναρτήσει του χρόνου (h) για τα δοκίμια ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωση 5%, 20% και 40%, σε θερμοκρασία 600°C.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη αναφορικά με την επίδραση του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης εν ψυχρώ στην εξέλιξη της σκληρότητας και στη συνέχεια την συσχέτιση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους, στον ειδικό ορείχαλκο, Ecobrass, ο οποίος δεν περιέχει μόλυβδο.

Τα δοκίμια αρχικά υπέστησαν ψυχρή έλαση με διαφορετικούς βαθμούς πλαστικής παραμόρφωσης εώς 40% ελάττωση διατομής πάχους, έπειτα υποβλήθηκαν σε θερμικές κατεργασίες στους 540°C και 600°C για χρονικά διαστήματα 30min, 6h και 24h και στη συνέχεια εξετάσθηκαν ως προς τη σκληρότητα και τη μικροδομή τους και σε συσχέτιση μεταξύ τους. Κριτήριο σύγκρισης της μελετηθήσας μικροδομής και σκληρότητας αποτέλεσε ο βαθμός πλαστικής εν ψυχρώ παραμόρφωσης. Οι επιλεχθείσες πειραματικές συνθήκες είχαν ως αποτέλεσμα την αλλαγή της μικροδομής αλλά και των μηχανικών ιδιοτήτων οι οποίες μετρήθηκαν με δοκιμές σκληρότητας

Η μελέτη της μικροδομής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου (LOM) και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) σε συνδυασμό με την τεχνική μικροανάλυσης EDS. Οι μετρήσεις της σκληρότητας εκτελεστήκαν σε σκληρόμετρο τύπου Vickers, υπό σταθερό φορτίο και χρόνο, σε όλα τα δοκίμια.

Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας των δοκιμίων του ορείχαλκου.

Η μελέτη αυτή, που διεξήχθη για πρώτη φορά στην Ελλάδα, οδήγησε στην καλύτερη κατανόηση και αξιολόγηση των επιπτώσεων στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ειδικού ορείχαλκου, χωρίς μόλυβδο.

1.0. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ορείχαλκος **Ecobrass** είναι ένας ειδικός τύπος ορείχαλκου, χωρίς μόλυβδο, ο οποίος αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια, με σκοπό τη χρήση του ορείχαλκου αυτού σε σωληνώσεις πόσιμου νερού, αφού ο μόλυβδος αποτελεί τοξική ουσία. Ο ορείχαλκος Ecobrass, εμφανίζει εξαιρετική συμπεριφορά στην επεξεργασία με σφυρηλάτηση εν ψυχρώ και στη μηχανική κατεργασία. Έχει χαρακτηριστικά αυξημένης μηχανικής αντοχής, τα οποία αντιστοιχούν πλήρως σε ορισμένες κατηγορίες χάλυβα και η αντοχή το στη διάβρωση είναι ανώτερη από εκείνη των συμβατικών ορείχαλκων ελεύθερης κατεργασιμότητας. Αυτό το κράμα είναι κατάλληλο για την παραγωγή μηχανικά κατεργασμένων και σφυρήλατων τμημάτων. [13]

Γενικά, οι ορείχαλκοι περιέχουν συνήθως διάφορες κραματικές προσθήκες. Ο συγκεκριμένος τύπος ορείχαλκου περιέχει μόνο πυρίτιο (-3%) και ίσως να περιέχει μικρά ποσοστά σε φώσφορο (-0,01%) και καθόλου μόλυβδο. Αυτό αποτελεί μια πρόκληση, καθώς ο μόλυβδος βελτιώνει τη μηχανική κατεργασιμότηταν των ορείχαλκων. Όμως, η προσθήκη πυριτίου μονο, αποτελεί εξαιρετική λύση, καθώς η μηχανική κατεργασιμότητα του ορείχαλκου Ecobrass παραμένει σε υψηλά επίπεδα.[13]

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μια ράβδος ορείχαλκου Ecobrass, ο οποίος είχε υποστεί διέλαση για παραγωγή ράβδων. Η μελέτη αυτή ασχολείται με την εξέλιξη της μεταβολής των μικροδομών μετά από επιλεγμένες θερμικές κατεργασίες και την συνακόλουθη εξέλιξη της σκληρότητας, σε δοκίμια Eco brass, που έχουν υποστει πλαστική εν ψυχρώ παραμόρφωση.

1

2.0. ΣΤΟΧΟΙ – ΣΚΟΠΟΙ

Οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι οι εξής:

- i. Η μελέτη της επίδρασης του βαθμού πλαστικής εν ψυχρώ παραμόρφωσης, στην εξέλιξη των μετασχηματισμών φάσεων κατά τη θερμική κατεργασία δοκιμίων Eco brass. Χρησιμοποιούμε την τεχνική της ψυχρής έλασης και παρατηρούμε την εξέλιξη της μικροδομής και την σκληρότητα για δοκίμια ορείχαλκου Eco brass, που υπέστει θερμικές κατεργασίες στο θερμοκρασιακό εύρος των 540 έως 600°C για χρόνους 30min-24h.
- Η αξιολόγηση των λαμβανόμενων μηχανικών ιδιοτήτων (σκληρότητας) των θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων με επιλογή κατάλληλων χρόνων και θερμοκρασιών.
- iii. Ο πλήρης χαρακτηρισμός των λαμβανόμενων μικροδομών κατά τις θερμικές κατεργασίες που υπέστησαν τα εν ψυχρώ ελασμένα δοκίμια Eco brass, με τεχνικές οπτικής μικροσκοπίας, ηλεκτρονικής μικροσκοπίας με μικροανάλαση EDS, περίθλαση ακτίνων X (XRD) και σκληρομέτρηση Vickers.

3.0. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. Γενικά στοιχεία ορείχαλκων

Ο ορείχαλκος είναι ένα μέταλλο που αποτελείται κυρίως από χαλκό και ψευδάργυρο. Ο χαλκός είναι το κύριο συστατικό και έτσι ο ορείχαλκος συνήθως κατατάσσεται ως κράμα χαλκού. Το χρώμα του ορείχαλκου κυμαίνεται από σκούρο κοκκινωπό καφέ εώς ένα ελαφρύ κίτρινο, ανάλογα με την ποσότητα του υπάρχοντος ψευδαργύρου. Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό του ψευδάργυρου, τόσο πιο ανοιχτό το χρώμα του ορείχαλκου. Είναι εύκολο να μορφοποιειθεί σε διάφορα σχήματα, είναι καλός αγωγός της θερμότητας, και γενικά είναι ανθεκτικός στη διάβρωση από το αλμυρό νερό. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, ο ορείχαλκος χρησιμοποιείται στη δημιουργία σωλήνων, ταινίες απογύμνωσης, βίδες, καλοριφέρ, μουσικά όργανα και περιβλήματα για τα πυροβόλα όπλα.[1]

Μετά την Εποχή του Χαλκού (Χαλκολιθική) ήρθε η Εποχή του Μπρούτζου και ακολούθησε αργότερα η Εποχή του Σιδήρου. Δεν υπήρχε η Εποχή του Ορείχαλου, επειδή, για πολλά χρόνια, δεν ήταν εύκολο να παραχθεί ορείχαλκος. Πριν από τον 18ο αιώνα, ο ψευδάργυρος δεν μπορούσε να παραχθεί, δεδομένου ότι τήκεται στους 420°C και βράζει στους 950°C. Έτσι, για να παραχθεί ορείχαλκος ήταν απαραίτητη η σμισθονίτη (ZnCO3-καλαμίνα) με γαλκό, ανάμειξη με μια διαδικασία τσιμεντοποίησης, εξαιτίας της απουσίας του«φυσικού ψευδάργυρου», και θέρμανση του μίγματος σε ένα χωνευτήριο. Η ονομασία «καλαμίνα» προέκυψε από την αραβική λέξη "kalmeia", η οποία χαρακτήριζε τα μεταλλεύματα του ψευδαργύρου.Η θερμότητα ήταν αρκετή για να μετατρέψει το μετάλλευμα σε μεταλλική κατάσταση, αλλά όχι για την τήξη του χαλκού. Δηλαδή, σε υψηλές θερμοκρασίες, ο ψευδάργυρος εξατμιζόταν και διαπερνούσε το χαλκό, παράγοντας έτσι ένα σχετικά καθαρό ορείχαλκο με 15%-30% περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο.[2]

Κράματα χαλκού - ψευδαργύρου παράγονται ήδη από την 5η χιλιετία π.Χ. στην Κίνα και χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανατολική και την κεντρική Ασία από το 20 και 30 αιώνα π.Χ. Αυτά τα αντικείμενα, ωστόσο, μπορεί να είναι καλύτερο να αναφέρονται ως «φυσικά κράματα», καθώς δεν υπάρχει καμία απόδειξη ότι οι παραγωγοί τους έφτιαχναν συνειδητά κράματα χαλκού και ψευδαργύρου. Αντ'αυτού, είναι πιθανό ότι τα κράματα είχαν αναχθεί από πλούσια σε ψευδάργυρο μεταλλεύματα χαλκού, παράγοντας ακατέργαστο ορείχαλκο, όπως τα μέταλλα.

Περίπου το 20 π.Χ.-20 μ.Χ., μεταλλεργάτες γύρω από τη Μεσόγειο Θάλασσα ήταν σε θέση να διακρίνουν τα μεταλλεύματα ψευδαργύρου από εκείνα που περιέχουν κασσίτερο και έτσι άρχισε η ανάμειξη του ψευδαργύρου με χαλκό, για να φτιάξουν νομίσματα από ορείχαλκο και άλλα αντικείμενα. Το μεγαλύτερο μέρος του ψευδαργύρου προήλθε με θέρμανση ενός ορυκτού, γνωστό ως καλαμίνα, το οποίο περιέχει διάφορες ενώσεις ψευδαργύρου. Αν και οι πρώτοι μεταλλεργάτες μπορούσαν να αναγνωρίσουν τη διαφορά μεταξύ του μεταλλεύματος ψευδαργύρου και του μεταλλεύματος κασσίτερου, δεν είχαν καταλάβει ακόμα ότι ο ψευδάργυρος ήταν μέταλλο.[2]

Μόνο κατά την τελευταία χιλιετία ο ορείχαλκος έχει εκτιμηθεί ως κράμα μηχανικής. Αρχικά, ο μπρούτζος ήταν πιο εύκολο να σχηματιστεί χρησιμοποιώντας χαλκό και κασσίτερο και ήταν ιδανικό για την κατασκευή των σκευών. Οι Αιγύπτιοι γνώριζαν πολύ καλά το χαλκό και στα ιερογλυφικά, ο χαλκός αντιπροσωπεύεται από το σύμβολο «C», το οποίο χρησιμοποιείται επίσης για να υποδηλώσει αιώνια ζωή, μια πρώιμη εκτίμηση της διάρκειας ζωής του κόστους και της αποτελεσματικότητας του χαλκού και των κραμάτων του. Ενώ ο κασσίτερος ήταν άμεσα διαθέσιμος για την κατασκευή μπρούντζου, ο ορείχαλκος χρησιμοποιήθηκε ελάχιστα, εκτός εάν το χρυσό του χρώμα απαιτούνταν. Οι Έλληνες γνώριζαν τον ορείχαλκο ως ένα λαμπρό και λευκό χαλκό.[3]

Ελληνικά και Ρωμαϊκά έγγραφα δείχνουν ότι η εκ προθέσεως παραγωγή κραμάτων παρόμοια με τον σύγχρονο ορείχαλκο, με τη χρήση του χαλκού και οξείδιο του ψευδαργύρου, γνωστό ως καλαμίνα, άρχισε γύρω στον 1ο αιώνα π.Χ..

Ο ορείχαλκος χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των σεστέρσιων (ρωμαϊκό νόμισμα) και πολλοί Ρωμαίοι, επίσης, προτιμούσαν τον ορείχαλκο ιδιαίτερα για να κατασκευάσουν χρυσόχρωμα κράνη. Χρησιμοποιούσαν στον ορείχαλκο προσθήκη 11-28% του ψευδαργύρου για την απόκτηση διακοσμητικών χρωμάτων για όλα τα είδη διακοσμητικών κοσμημάτων. Για το πιο περίτεχνο έργο, το μέταλλο έπρεπε να είναι πολύ όλκιμο και η προτιμώμενη σύνθεση ήταν 18% ψευδάργυρο. Κέρματα ορείχαλκου σύντομα εξαπλώθηκαν σε όλη τη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία και υπάρχουν ενδείξεις ότι η παραγωγή καλαμίνας μετακόμισε στη βόρεια Ευρώπη υπό την εξουσία της Ρώμης. Μετά την πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, η παραγωγή συνεχίστηκε στην Ευρώπη, αλλά όχι στον ίδιο βαθμό.[3]

Η παραγωγή ορείχαλκου στην Ινδία παρατηρείται επίσης από τον 1ο αιώνα π.Χ., και εδώ είναι όπου η διαδικασία «speltering» (κραμάτωση) πιστεύεται ότι αναπτύχθηκε

4

για πρώτη φορά. Σε αντίθεση με τη διαδικασία τσιμέντωσης που παρήγαγαν καλαμίνα, η κραμάτωση (speltering) είναι μια διαδικασία που κράματα μεταλλικού ψευδαργύρου αναμειγνύονται άμεσα με χαλκό.

Η διαδικασία κραμάτωσης βοηθάει στο να έχουμε μεγαλύτερο έλεγχο της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο και, ως εκ τούτου, των ιδιοτήτων του κράματος ορείχαλκου που παράγεται. Η διαδικασία αυτή, ωστόσο, εξαρτιόταν από τη διαθεσιμότητα του μεταλλικού ψευδαργύρου, ο οποίος ήταν διαθέσιμος στην Ασία αιώνες πριν βρεθεί στην Ευρώπη. Μέχρι σήμερα, η αρχαιότερη απόδειξη ενός προϊόντος ορείχαλκου «speltered» είναι ένας αστρολάβος, ο οποίος φτιάχτηκε στη Λαχόρη γύρω στο 1600.[1]



Εικόνα 1. Ορειχάλκινος αστρολάβος του 16^{ου} αιώνα.

Επιπλέον, στην Ευρώπη, πριν από την άφιξη του αργύρου και του χρυσού από το Νέο Κόσμο, ο ορείχαλκος χρησιμοποιείται ως πολύτιμο μέταλλο για να στολίζουν τα μνημεία και τους τάφους της εκκλησίας. Η αυξανόμενη ζήτηση οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής στη Γερμανία και το Βέλγιο κατά τη διάρκεια του 15ου και 16ου αιώνα. Από το 1559 η πόλη του Άαχεν στη Γερμανία παράγει περισσότερους από 13.000 μετρικούς τόνους ορείχαλκου ετησίως. Εν τω μεταξύ, τα κείμενα από την ίδια περίοδο δείχνουν ότι μεγάλες ποσότητες από ορειχάλκινα σκεύη είχαν αποσταλεί στη Δυτική Αφρική, γεγονός που υποδηλώνει την ανάπτυξη της διεθνούς ζήτησης για ορείχαλκο.

Έγιναν πολλές προσπάθειες για να αυξηθεί η παραγωγή ορείχαλκου στο Ηνωμένο Βασίλειο από την πρώτη παραγωγή του στη συρματοποιία Tintern Abbey το 1568 μέχρι την κατάργηση των Μεταλλείων Royal Company το 1689. Όμως, μετά από βελτιώσεις στην καθαρότητα του χαλκού που έγιναν στις αρχές του 18ου αιώνα, ο ορείχαλκος άρχισε να εξαπλώνεται στις περιοχές γύρω από το Bristol, Swansea και Birmingham.[3]

Πριν από τη βιομηχανική επανάσταση (1760-1860) υπήρχαν περιορισμένες εφαρμογές ειδικά κατάλληλες για τον ορείχαλκο. Μία τέτοια χρήση ήταν οι καρφίτσες για τη βιομηχανία του μαλλιού. Το ορειχάλκινο έλαστρο στο Esher, στην Αγγλία, που χρονολογείται από το 1697, ειδικεύεται στην παραγωγή τέτοιων καρφιτσών.

Αργότερα, το εμπόριο καρφιτσών έγινε πολύ σημαντικό, με περίπου 15-20% ψευδάργυρο και χαμηλή περιεκτικότητα σε μόλυβδο και κασσίτερο. Λόγω της ευκολίας της παρασκευής, της κατεργασίας και της αντοχής στη διάβρωση, ο ορείχαλκος έγινε το πρότυπο κράμα από το οποίο έγιναν όλα τα ακριβή εργαλεία, όπως επιτραπέζια ρολόγια, ρολόγια και βοηθήματα πλοήγησης.

Με την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης, η παραγωγή ορείχαλκου έγινε ακόμα πιο σημαντική. Το 1738, ο William Champion κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μία μέθοδο για τη βιομηχανική απόσταξη του μεταλλικού ψευδαργύρου, ο οποίος παράγεται σε μεγάλες ποσότητες. Αυτό έδωσε μεγάλη ώθηση στην παραγωγή ορείχαλκου στο Μπρίστολ.[1]

Το 1746, ένας Γερμανός επιστήμονας που ονομάζεται AndreasSigismund Marggraf (1709-1782) προσδιόρισε τον ψευδάργυρο και προσδιόρισε τις ιδιότητές του. Η διαδικασία για τον συνδυασμό μεταλλικού χαλκού και ψευδαργύρου με σκοπό να φτιάξει ορείχαλκο κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στην Αγγλία το 1781.

Η εφεύρεση του χρονόμετρου από τον Harrison το 1761, εξαρτήθηκε από την χρήση του ορειχάλκου για την κατασκευή ενός ακριβούς χρονομέτρη και κέρδισε ένα βραβείο £20.000, για την εφεύρεσή του.

Η παραγωγή ορείχαλκου στην Αμερική ξεκίνησε μετά την ανεξαρτησία και ειδικεύτηκε στα κουμπιά από ορείχαλκο για στρατιωτικές στολές. Κατά τη διάρκεια του 1800, στο Waterbury, στο Connecticut αναπτύχθηκε μια μεγάλη βιομηχανία ορειχάλκου που παράγει ρολόγια, κουμπιά, εργαλεία πλοήγησης και λαμπτήρες.

6

Στα μέσα του 19ου αιώνα, με την εφεύρεση του 60/40 (60%Cu – 40% Zn) ορείχαλκου από τον Muntz το 1832, έγινε δυνατόν να παραχθούν φθηνές, εν θερμώ κατεργάσιμες πλάκες ορείχαλκου. Οι μεταλλικές πλάκες τουMuntz χρησιμοποιήθηκαν για την επικάλυψη του ξύλινουσκελετού του πλοίου Cutty Sark, που φτιάχτηκε το 1869 και βρίσκεται σήμερα στην αποβάθρα στο Greenwich, στο Νότιο Λονδίνο από το 1954.

Μια άλλη σημαντική χρήση για τον ορείχαλκο εφαρμόστηκε με την ανάπτυξη του μεταλλικού φυσιγγίου στη Γαλλία περίπου το 1846. Έτσι, τα πρώτα περιβλήματα φυσιγγιών από μέταλλο για τα πυροβόλα όπλα εισήχθησαν το 1852. Αν και αρκετά διαφορετικά μέταλλα δοκιμάστηκαν, ο ορείχαλκος ήταν ο πιο επιτυχής λόγω της ικανότητά του να επεκτείνει και να σφραγίσει το κλείστρο υπό πίεση. Αυτή η ιδιότητα οδήγησε στην ανάπτυξη των πολυβόλων όπλων.

Τέλος, το 1894 ο Αλέξανδρος Dick εφηύρε το πιεστήριο διέλασης που ανέτρεψε την παραγωγή καλής ποιότητας ράβδων χαμηλού κόστους. Οι μεταγενέστερες εξελίξεις στην τεχνολογία παραγωγής συμβάδισαν με τις απαιτήσεις των πελατών για καλύτερη, σταθερή ποιότητα των προϊόντων που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες. [3]

3.1.1. Ονοματολογία Ορείχαλκων

Οι ορείχαλκοι ταυτοποιούνται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- με αριθμούς σύμφωνα με το Unified Numbering System (UNS), που αναπτύχθηκαν από την American Society for Testingand Materials (ASTM).
- με ονόματα που στηρίζονται σε συντομογραφίες συστάσεων, σε ονομασίες με ιδιοκτησιακά δικαιώματα και σε εμπορικά σήματα.

Οι αριθμοί κατά το UNS περιλαμβάνουν έξι σύμβολα, δηλ. ένα γράμμα ακολουθούμενο από πέντε αριθμούς (π.χ. C38500). Τροποποιήσεις σε βασικές συνθέσεις συχνά προσδιορίζονται από τα δύο τελευταία ψηφία. Ο σφυρήλατος ορείχαλκος χαλκού - ψευδαργύρου αναφέρεται στους αριθμούς UNS C21000 - C28000, ο μολυβδούχος ορείχαλκος μεταξύ C312000 και C38500, ο ορείχαλκος κασσίτερου μεταξύ C40400 και C48600, και ο ορείχαλκος υψηλής αντοχής μεταξύ

C66400 και C69710.Οι χυτοί ορείχαλκοι φέρουν στο UNS ονομασίες ανάμεσα στους C83300 και C89900.

3.2. Ταξινόμηση Ορείχαλκων

Οι ακριβείς ιδιότητες των διάφορων ορείχαλκων εξαρτώνται από τη σύνθεση του κράματος ορείχαλκου, ιδίως από την αναλογία χαλκού-ψευδαργύρου.

Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, όλοι οι ορείχαλκοιείναι γνωστοί για την κατεργασιμότητα τους ή την ευκολία με την οποία το μέταλλο μπορεί να διαμορφώνεται σε επιθυμητά σχήματα και μορφές, διατηρώντας υψηλή αντοχή.

Αν και υπάρχουν διαφορές μεταξύ ορείχαλκων με υψηλή και χαμηλή περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο, όλοι οι ορείχαλκοι θεωρούνται ελατοί και όλκιμοι (οι ορείχαλκοι με χαμηλή περιεκτικότητα ψευδαργύρου περισσότερο). Λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του (900-940° C), ο ορείχαλκος μπορεί να χυτευτεί σχετικά εύκολα, ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση, μία υψηλή περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο συνήθως προτιμάται.

Ορείχαλκοι με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα εν ψυχρω και να συγκολληθούν. Μια υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό επιτρέπει επίσης στο μέταλλο να σχηματίσει ένα προστατευτικό στρώμα οξειδίου (πατίνα) επί της επιφανείας του, το οποίο το προστατεύει από περαιτέρω διάβρωση, μια πολύτιμη ιδιότητα σε εφαρμογές που εκθέτουν το μέταλλο στην υγρασία και τις καιρικές συνθήκες. Το μέταλλο έχει καλή, τόσο θερμική όσο και ηλεκτρική αγωγιμότητα (ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να είναι από 23% έως 44% αυτού του καθαρού χαλκού). Ο ορείχαλκος θεωρείται χαμηλής τριβής και μη μαγνητικό κράμα, ενώ οι ακουστικές του ιδιότητες έχουν οδηγήσει στη δημιουργία πολλών μουσικών οργάνων. Καλλιτέχνες και αρχιτέκτονες εκτιμούν τις αισθητικές ιδιότητες του μετάλλου, καθώς μπορεί να παραχθεί σε μια ποικιλία χρωμάτων, από βαθύ κόκκινο έως χρυσοκίτρινο.[4]

3.2.1. Ταξινόμηση με βάση την κρυσταλλική δομή

Ο «Ορείχαλκος» είναι ένας γενικός όρος που αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα των κραμάτων χαλκού-ψευδαργύρου. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πάνω από 60 διαφορετικές κατηγορίες ορείχαλκου που καθορίζονται από το ΕΝ (Ευρωπαϊκό Πρότυπο). Αυτά τα κράματα μπορούν να έχουν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών χημικών συστάσεων ανάλογα με τις ιδιότητες που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Οι ορείχαλκοιμπορούν επίσης να ταξινομηθούν με μία ποικιλία κριτηρίων, από τις μηχανικές τους ιδιότητες, την κρυσταλλική δομή, την περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο και το χρώμα.

Η πιο βασική διάκριση, ωστόσο, γίνεται ανάλογα με τις κρυσταλλικές δομές τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνδυασμός του χαλκού και του ψευδαργύρου χαρακτηρίζεται από περιτηκτική στερεοποίηση, δηλαδή τα δύο στοιχεία έχουν παρόμοιες ατομικές δομές και συνδυάζονται με μοναδικό τρόπο.

Ο ορείχαλκος, ανάλογα με την κρυσταλλική δομή της μήτρας της μικροδομής, μπορεί να διαχωριστεί σε:

 α-ορείχαλκοι: Οι α-ορείχαλκοι περιέχουν λιγότερο από 37% ψευδάργυρο, ο οποίος τήκεται με το χαλκό και ονομάζονται έτσι για το σχηματισμό τους από μία ομοιογενή (α) κρυσταλλική δομή. Τέτοιοι ορείχαλκοι είναι πιο εύκολοι στην εν ψυχρώ κατεργασιμότητα και στην συγκόλληση.

2. α-β ορείχαλκοι: Οι α-β ορείχαλκοι ("duplexbrasses") περιέχουν 37-45% ψευδάργυρο και η μικροδομή τους χαρακτηρίζεται τόσο από α κόκκους, καθώς και από μια δομή β κόκκου που μοιάζει με εκείνη του καθαρού ψευδαργύρου. Η α φάση κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC). Σε αντίθεση με τα κράματα των άλλων ομάδων, η ικανότητά τους να παραμορφώνονται σε θερμοκρασία δωματίου είναι πιο περιορισμένη. Έτσι, έχουν εύρος εφαρμογών σε αντίθεση με τους α ορείχαλκους σε αυξημένες θερμοκρασίες. Οι α-β ορείχαλκοι έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και είναι σκληρότεροι σε σχέση με τους α-ορείχαλκους, με συνέπεια να υφίστανται συνήθως εν θερμώ κατεργασία μέσω διέλασης ή σφυρηλασίας και χύτευσης με τη μήτρα.

9

3. β-ορείχαλκοι: Αν και χρησιμοποιούνται πολύ πιο σπάνια από τους αορείχαλκους ή τους α-β-ορείχαλκους, οι β-ορείχαλκοι αποτελούν μια τρίτη ομάδα που περιέχει περισσότερο από 45% κ.β. περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο. Τέτοιοι ορείχαλκοι σχηματίζουν μια κρυσταλλική δομή, η οποία είναι πιο δύσκολη και ισχυρότερη από ό, τι οι δύο προηγούμενες. Ως εκ τούτου, μπορεί να κατεργαστεί μόνο εν θερμώ ή σε μέσο χύτευσης.

Αναλυτικότερα:

<u>3.2.1.1 α-ορείχαλκος</u>

Η αντοχή τους αυξάνει με την αύξηση του ψευδαργύρου στο κράμα και μπορούν να σκληρυνθούν με ψυχρή κατεργασία.

Τα κράματα που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη ναυπηγική είναι δυο :

- 70 Cu 29 Zn 1 Sn : Ορείχαλκος ναυπηγείου
- 76 Cu 22 Zn 2 Al : Ορείχαλκος αλουμινίου

Όλοι οι α-ορείχαλκοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε καθαρό θαλασσινό νερό, όμως λόγω της αποψευδαργυροποίησης του μετάλλου που πραγματοποιείται, είναι απαραίτητη η προσθήκη μικρού ποσοστού αρσενικού της τάξης του 0,02%-0,05% κ.β., ώστε να εμποδιστεί αυτό το φαινόμενο.

Στις περιπτώσεις που υπάρχει ροή θαλασσινού νερού και επομένως κίνδυνος σπηλαιώδους διάβρωσης, ενδείκνυται η χρήση του ορείχαλκου αλουμινίου.

- Ο ορείχαλκος ναυπηγείου έχει πλέον αντικατασταθεί με πιο σύγχρονα υλικά που χρησιμοποιούνται για τους σύγχρονους ναυτικούς συμπυκνωτές. Όμως χρησιμοποιείται ακόμη σε συμπυκνωτές γλυκού νερού, δεδομένου ότι περιέχει αρσενικό ώστε να εμποδιστεί η αποψευδαργυροποίηση.
- Ο ορείχαλκος αλουμινίου αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αστοχίας από εργοδιάβρωση που παρουσίασε ο ορείχαλκος ναυαρχείου όταν ρευστό με μεγάλη ταχύτητα έπεφτε στην επιφάνεια του. Η προσθήκη αλουμινίου έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος του σχηματιζόμενου διαβρωτικού στρώματος να αποτελείται από οξείδιο του αλουμινίου, Al₂O₃, το οποίο αυξάνει σημαντικά την αντοχή του κράματος σε σπηλαιώδη μηχανική διάβρωση στοθαλασσινό νερό. Για την αποφυγή της

αποψευδαργυροποίησης του μετάλλου προστίθεται αρσενικό σε ποσοστό 0,02%-0.1% κ.β. [5]

Ο ορείχαλκος αλουμινίου έχει την καλύτερη αντοχή σε διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον από όλους τους α-ορείχαλκους , ενώ μπορεί να ανταπεξέλθει σε ταχύτητες ροής θαλασσινού νερού έως και 3m/sec. Πάντως η χρήση του σε ρυπασμένο θαλάσσιο περιβάλλον, για μεγάλο χρονικό διάστημα, δεν συνίσταται.

Ο ορείχαλκος αλουμινίου χρησιμοποιείται συνήθως σε ναυτικούς συμπυκνωτές, εναλλάκτες θερμότητας και σε εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.

<u>3.2.1.2 α-β-ορείχαλκος</u>



Εικόνα 2. Ο α-β ορείχαλκος.

Οι α-β-ορείχαλκοι είναι κυρίως κράματα εν θερμώ διαμορφωμένα. Συχνά εκτός από τον ψευδάργυρο, που βρίσκεται σε αναλογία τουλάχιστον στο 37% του κράματος, προστίθενται και άλλα στοιχεία όπως αλουμίνιο, μαγγάνιο και σίδηρος με σκοπό την αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Έτσι παράγονται ορείχαλκοι υψηλής εφελκυστικής αντοχής (high tensile brasses), οι οποίοι μπορούν να κατεργαστούν εν θερμώ ή με χύτευση.

Το πιο σημαντικό πρόβλημα στους α-β-ορείχαλκους είναι η αποψευδαργυροποίηση.

Γενικά, κράματα όπως το Muntzmetal (60% Cu - 40% Zn) και ο ναυπηγικός ορείχαλκος, (navalbrass), που είναι στην ουσία Muntzmetal, με την προσθήκη 0.75% κασσίτερου (Sn), θεωρούνται ακατάλληλα για χρήση σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Ο ναυπηγικός ορείχαλκος χρησιμοποιείται στις σωληνώσεις συμπυκνωτών, ενώ το πρόβλημα της αποψευδαργυροποίησης αντιμετωπίζεται με κατάλληλη αύξηση του πάχους.

Ο μαγγανιούχος ορείχαλκος είναι και αυτός υψηλής αντοχής με βασική σύνθεση 60% Cu - 40% Zn , με την αναλογία αυτή να εξαρτάται από τις προσθήκες σε μικρές ποσότητες άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνοντας έτσι τις μηχανικές του ιδιότητες, χωρίς όμως απαραίτητα να βελτιώνουν και την αντοχή του σε διάβρωση. Τέτοια στοιχεία είναι το μαγγάνιο, το νικέλιο, ο κασσίτερος, ο σίδηρος και το αλουμίνιο.

Για χρήση σε θαλασσινό νερό είναι σκόπιμο να επιλεχθούν τέτοιες χηικές συνθέσεις κραμάτων ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο της αποψευδαργυροποίησης.

Αν και οι ορείχαλκοι υψηλής αντοχής παρουσιάζουν το πρόβλημα της αποψευδαργυροποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κατασκευαστικό υλικό ελίκων, γιατί οι υψηλές ταχύτητες ροής που παρουσιάζονται γύρω από την έλικα δεν βοηθούν στην επέκταση του φαινομένου.[5]

<u>3.2.1.3 β-οείχαλκος</u>

Στα κράματα αυτά ο χαλκός και ο ψευδάργυρος βρίσκονται στην ίδια αναλογία (50% Cu - 50% Zn). Σε θαλάσσιο περιβάλλον εμφανίζουν ταχεία αποψευδαργυροποίηση και θεωρούνται ακατάλληλα για ναυπηγική χρήση.[5]

3.2.2. Ταξινόμηση με βάση τις ιδιότητες του ορείχαλκου

Σε αντίθεση με την κατηγοροποίηση των ορείχαλκων σύμφωνα με την κρυσταλλική δομή της μητρικής φάσης, διαχωρίζουμε τα κράματα ορείχαλκου και σύμφωνα με τις ιδιότητές τους, το οποίο μας επιτρέπει να εξετάσουμε την επίδραση των διάφορων κραματικών προσθηκών στον ορείχαλκο. Έτσι, διαχωρίζουμε τον ορείχαλκο σε:

Ορείχαλκος ελεύθερης κατεργασιμότητας (3% μόλυβδο)

- Ορείχαλκος υψηλής αντοχής (εγκλείσματα αλουμινίου, μαγγάνιου, σιδήρου)
- Ναυπηγικός ορείχαλκος (~1% κασσίτερο)
- Ορείχαλκος με αντίσταση στην αποψευδαργύρωση(ενσωμάτωση του αρσενικού)
- Ορείχαλκος για εν ψυχρώ κατεργασία (70/30 ορείχαλκο)
- Χυτός ορείχαλκος(60/40 ορείχαλκο)

Οι όροι «κίτρινος ορείχαλκος» και «κόκκινος ορείχαλκος» - που ακούγεται συχνά στις ΗΠΑ - χρησιμοποιούνται επίσης για την αναγνώριση ορισμένων τύπων ορείχαλκου. Ο κόκκινος ορείχαλκος αναφέρεται σε κράμα με ένα υψηλό ποσοστό χαλκού (85%) που περιέχει και κασσίτερο (Cu-Zn-Sn), το οποίο είναι επίσης γνωστό ως gunmetal (C23000- μέταλλο για κανόνια), ενώ ο κίτρινος ορείχαλκοςαναφέρεται σε ένα κράμα ορείχαλκου με υψηλότερη περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο (33%), και έτσι ο ορείχαλκος έχει ένα χρυσοκίτρινο χρώμα.

Οι πιο σημαντικοί από τους παραπάνω είναι ο ορείχαλκος ελεύθερης κατεργασιμότητας και ο ορείχαλκος υψηλής αντοχής.

Αναλυτικότερα:

3.2.2.1 Ορείχαλκος ελεύθερης κατεργασιμότητας

Τα υλικά αυτής της κατηγορίας χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με την ευκολία της μηχανικής κατεργασίας:

- Η ομάδα Ι περιλαμβάνει τους παραδοσιακούς ορείχαλκους ελεύθερης κατεργασιμότητας.
- Η Ομάδα ΙΙ καλύπτει κυρίως τα κράματα που δεν έχουν προσθήκη μολύβδου.
- Κανένας από τους παραπάνω ορείχαλκους δεν ανήκει στην Ομάδα ΙΙΙ, η οποία περιλαμβάνει και άλλα κράματα χαλκού, τα οποία δεν είναι τόσο εύκολα στην κατεργασία όσο τα κράματα του ορείχαλκου.

Ο ορείχαλκος ελεύθερης κατεργασιμότητας, π.χ το κράμα C36000 σύμφωνα με το UNS, οφείλει την ανώτερη μηχανική επεξεργασία του σε μια μικρή περιεκτικότητα σε μόλυβδο. Ο μόλυβδος εξυπηρετεί δύο λειτουργίες:

 Προκαλεί ρινίσματα (απόβλητα) κατά τη διάρκεια κοπής, που καθιστά εύκολο τον καθαρισμό από τη λειτουργία κοπής, και

2. Δρα ως "εσωτερικό λιπαντικό", καθώς αλείφεται σε όλη την επιφάνεια του εργαλείου κοπής.

Ο ορείχαλκος ελεύθερης κατεργασιμότητας είναι το πρότυπο βάσει του οποίου η κατεργασιμότητα όλων των άλλων μετάλλων αξιολογείται. Σε μια σειρά από δοκιμές που έγιναν σύμφωνα με τη δημοσιευμένη διαδικασία κατά ASTM, διαπιστώθηκε ότι ο ελεύθερης κατεργασιμότηταςορείχαλκος μπορεί θεωρητικά να παραχθεί πέντε φορές πιο γρήγορα από ό,τι ένα κράμα που περιέχει μόλυβδο. Πιο συγκεκριμένα, επειδή ο μόλυβδος διασπείρεται υπό μορφή σφαιρικών σωματιδίων μέσα στη δομή του υλικού, βοηθά στη μείωση της τριβής και φθοράς του εργαλείου κοπής και στον κατατεμαχισμό των αποβλήτων της κοπής (δημιουργεί δηλ. ασυνεχές γρέζι). Επιπλέον, η φθορά των εργαλείων είναι ελάχιστη για αυτά τα υλικά και έτσι το κόστος των εργαλείων μειώνεται κατά 20%. [5]

3.2.2.2 Ορείχαλκος υψηλής αντοχής

Το όνομα " ορείχαλκος υψηλής αντοχής " που έχει δωθεί στα σφυρήλατα και χυτά κράματα δείχνει το πλεονεκτημά τους στην υψηλή αντοχή τους η οποία επιτυγχάνεται με προσθήκες αλουμινίου, σιδήρου, μαγγανίου και κασσίτερου. Αυτά τα κράματα ήταν παλαιότερα γνωστάως " manganese bronzes " (μπρούτζος = bronze).

- Ο σίδηρος και το μαγγάνιο είναι οι πιο κοινές προσθήκες. Συνδυάζονται για να προσδώσουν αυξημένη σκληρότητα, τάση διαρροής και αντοχή στον εφελκυσμό, με ελαφρώς μόνο μειωμένη ολκιμότητα.
- Το αλουμίνιο έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αύξηση της σκληρότητας, στην τάση διαρροής και στην αντοχή σε εφελκυσμό. Λόγω της αρνητικής επίδρασης της σκληρότητας στην ολκιμότητα και στη μικροδομή, στενός έλεγχος είναι απαραίτητος για να ληφθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των ιδιοτήτων. Επιπλέον, επιτυγχάνεται καλύτερη αντοχή στη διάβρωση.
- Ο κασσίτερος μπορεί να προστεθεί για να ενισχύσει την αντίσταση στη διάβρωση σε θαλάσσια περιβάλλοντα και στην εξόρυξη. Δίνει μια μικρή αύξηση στην σκληρότητα και στην αντοχή σε εφελκυσμό.

- Το πυρίτιοσε συνδυασμό με το μαγγάνιο ως προσθήκες στο κράμα, δημιουργούν μια πολύ σκληρή ενδομεταλλική ένωση στη βασική μήτρα, η οποία προσδίδει εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής στη φθορά σε αυτά τα κράματα.
- Ο μόλυβδος δεν έχει επίδραση στην σκληρότητα ή στην αντοχή σε εφελκυσμό. Παρ'όλ'αυτά κάποια μείωση της ολκιμότητας παρουσιάζεται, αλλά σημαντική είναι η βελτίωση των αποτελεσμάτων κατεργασιμότητας.
- Το νικέλιο βελτιώνει την σκληρότητα και την αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά χωρίς να παρατηρείται σημαντική επίδραση στην ολκιμότητα, και προσδίδει βελτιωμένες ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες.[5]

<u>3.2.3. Είδη Ορείχαλκων</u>

Τα κράματα ορείχαλκου είναι τα σπουδαιότερα κράματα χαλκού και αποτελούνται ουσιαστικά από χαλκό και ψευδάργυρο. Ορείχαλκοι που περιέχουν μέχρι 36% ψευδάργυρο και χαρακτηρίζονται ως ορείχαλκοι *Άλφα* ή κράματα μεμονωμένης φάσης έχουν εξαίρετες ιδιότητες επεξεργασίας εν ψυχρώ. Με πέρα από 37% ψευδάργυρο σχηματίζεται μια άλλη ομάδα κραμάτων δύο φάσεων, που χαρακτηρίζονται ως ορείχαλκοι *Βήτα* και παρουσιάζουν εξαίρετες ιδιότητες επεξεργασίας εν θερμώ.

Στην ομάδα ορείχαλκων χαμηλής περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο (που περιέχουν 5 έως 20% ψευδάργυρο) ανήκουν κράματα προσφερόμενα ιδιαίτερα για την κοσμηματοποιϊα και την παραγωγή σωλήνων χωρίς ραφή. Το μέταλλο gilding (95% χαλκός και 5% ψευδάργυρος) έχει χρυσό χρώμα και χρησιμοποιείται για ψευτοκοσμήματα. εμβλήματα και είδη νεωτερισμού που προορίζονται για επιχρύσωση. Το κράμα αυτό είναι πολύ ελατό, αντέχει στην διάβρωση και δουλεύεται εύκολα. Το μέταλλο pinchbeck (88% χαλκός και 12% ψευδάργυρος) χρησιμοποιήθηκε από τους τεχνίτες της Βικτωριανής εποχής στην Αγγλία ως υποκατάστατο του χρυσού, μια και μοιάζει πολύ με αυτόν. Ο κόκκινος ορείχαλκος (χαλκός 85%, ψευδάργυρος 15%) είναι το σύγχρονο κράμα που πλησιάζει περισσότερο προς το Βικτωριανό pinchbeck, και χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή ψευτοκοσμημάτων. Ο κίτρινος ορείχαλκος (χαλκός 65% και ψευδάργυρος 35% με σημείο τήξης 1660° C και θερμοκρασία ανόπτησης 800-1300° C) προσφέρεται ιδιαίτερα για το τράβηγμα συρμάτων, για την κατασκευή χοντρών αλυσίδων και πριτσινιών καθώς επίσης και για την κατασκευή διακοσμητικών αρχιτεκτονικών στοιχείων, για σταμπωτά είδη και για φυγοκεντρική χύτευση. Ο *ορείχαλκος Muntz* (χαλκός 60%, ψευδάργυρος 40%, σημείο τήξης 1660°C και θερμοκρασία ανόπτησης 800-1100° C) χρησιμοποιείται για την κατασκευή ράβδων συγκόλλησης, για σφυρηλάτηση εν θερμώ και για ναυτιλιακές αρχιτεκτονικές εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή στην διάβρωση. Οι μολυβδούχοι ορείχαλκοι περιέχουν 0,5 μέχρι 3% μόλυβδο, ο οποίος, προστιθέμενος στα κράματα χαλκού - ψευδάργυρου τα κάνει πρόσφορα για μηχανουργική επεξεργασία καθώς τα σωματίδια μολύβδου σχηματίζουν μικρά συσσωματώματα όταν αφαιρούνται από την μάζα και έτσι δεν στομώνουν τα εργαλεία. Ο ναυπηγικός ορείχαλκος (χαλκός 60%, ψευδάργυρος 39,25% και κασσίτερος 0,75%, σημείο τήξης Ι630° C) χρησιμοποιείται, ανάμεσα σε άλλες εφαρμογές, για την κατασκευή ραβδιών συγκόλλησης. [6]



Εικόνα 3. Χρώματα που παρουσιάζουν τα διαφορετικά κράματα του ορείχαλκου.

Τα κράματα του χαλκού παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία χρωμάτων.

- C11000: Χαλκός Cu 99,9%.
- C22000: Εμπορικός μπρούντζος, 90% (Cu 90%, Zn 10%).
- C23000: Ερυθρός ορείχαλκος, 85% (Cu 85%, Zn 15%).
- C26000: Ορείχαλκος καλύκων, 70% (Cu 70%, Zn 30%).
- C28000: Μέταλλο Muntz, 60% (Cu 60%, Zn 40%).
- C38500: Αρχιτεκτονικός μπρούντζος (Cu 57%, Pb 3%, Zn 40%).
- C65500 Μπρούντζος υψηλού πυριτίου A (Cu 97%, Si 3%).
- C74500: «Άργυρος» νικελίου 65-10 (Cu 65%, Ni 10%, Zn 25%).
- C70600: Χαλκονικέλιο (Cu 90%, Ni 10%).

3.3. Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ορείχαλκους

Οι κραματικές προσθήκες στους ορείχαλκους πραγματοποιούνται για διάφορους λόγους :

- Για την βελτίωση της κατεργασιμότητας
- Για να βελτιώσουν την σκληρότητα και την αντοχή
- Για βελτίωση της αντοχής στη διάβρωση
- Για άλλους λόγους

Η μεγάλη ποικιλία των διάφορων τύπων ορειχάλκων που είναι διαθέσιμοι, αντικατοπτρίζει τους πολλούς τρόπους με τους οποίους ένας βέλτιστος συνδυασμός ιδιοτήτων μπορεί να συνδυαστεί για να προσαρμοστεί στην επιθυμητή εφαρμογή.

3.3.1. <u>Μόλυβδος(lead)</u>

Το πιο συχνά προστιθέμενο στοιχείο στους ορείχαλκους για την τροποποίηση των ιδιοτήτων τους είναι ο μόλυβδος ο οποίος σε ποσοστό μεγαλύτερο του 3% προστίθεται σε διφασικούς α+β ορείχαλκους για να βελτιώσει την κατεργασιμότητα τους (machinability). Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο διφασικό κράμα είναι το κράμα του MUNTZ, το οποίο περιέχει 40%Zn, είναι σκληρό και μη όλκιμο, λόγω της ύπαρξης της φάσης β΄. Το κράμα αυτό μορφοποιείται εύκολα σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ η κατεργασιμότητά του βελτιώνεται με την προσθήκη Pb, σε ποσοστό 0,4-3%. Ο μόλυβδος δεν σχηματίζει στερεό διάλυμα με το χαλκό, αλλά βρίσκεται διασκορπισμένος, σε σφαιρική μορφή, στη μάζα του ορείχαλκου, γεγονός που διευκολύνει τον τεμαχισμό των αποβλήτων της κοπής, μειώνοντας έτσι τη φθορά τόσο του κοπτικού εργαλείου όσο και του αντικειμένου.

Επίσης ο μόλυβδος δεν έχει καμία επίδραση στην αντίσταση στη διάβρωση και δεν προστίθεται σε σκληρούς α ορείχαλκους καθώς, λόγω της απουσίας της β φάσης, ευνοεί την δημιουργία ρωγμών σε θερμή κατεργασία.

To EcoBrass (C87850 και C69300) είναι ένα νέο προιόν ορείχαλκου. Αποτελεί μια εναλλακτική λύση που χρησιμοποιεί πυρίτιο σε αντικατάσταση του μολύβδου για την αύξηση τηςς μηχανικής κατεργασιμότητας. Το EcoBrass δεν έχει μόλυβδο (≈0,01 Pb).

3.3.2. <u>Κασσίτερος(tin)</u>

Ο κασσίτερος μπορεί να προστεθεί για να προσδώσει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπλέον δίνει και μικρή αύξηση στην σκληρότητα και στην εφελκυστική αντοχή.

3.3.3. <u>Πυρίτιο(silicon)</u>

Το πυρίτιο αυξάνει την σκληρότητα και την αντοχή των ορείχαλκων και σε συνδυασμό με το μαγγάνιο δημιουργούν μια πολύ σκληρή ενδομεταλλική ένωση εντός της βασικής μήτρας η οποία προσδίδει εξαιρετική αντίσταση στη φθορά.

3.3.4. <u>Αρσενικό(arsenic)</u>

Το αρσενικό προστίθενται συχνά σε μικρές ποσότητες σε α φάσης κράματα και τα προστατεύει ενάντια στην απομάκρυνση του Zn(dezincification corrosion). Μικρές ποσότητες αρσενικού αναστέλλουν τη διάβρωση του ορείχαλκου. Το αντιμόνιο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το κασσίτερο.

3.3.5. <u>Νικέλιο (nickel)</u>

Το νικέλιο βελτιώνει την σκληρότητα και την εφελκυστική αντοχή χωρίς σημαντική επίπτωση στην ολκιμότητα προσδίδοντας βελτιωμένες ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες.

3.3.6. Σίδηρος και Μαγγάνιο(iron and manganese)

Ο σίδηρος και το μαγγάνιο είναι οι πιο κοινές προσθήκες που συνδυάζονται για να προσδώσουν αυξημένη σκληρότητα, όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή με μικρή μείωση της ολκιμότητας.

3.3.7. <u>Αλουμίνιο(aluminium)</u>

Το αλουμίνιο έχει την καλύτερη επίδραση στην αύξηση της σκληρότητας, όριο διαρροής και εφελκυστικής αντοχής στους διφασικούς ή α+β φάσης ορείχαλκους. Λόγω της επίδρασης τους στην ολκιμότητα και στην μικροδομή, στενός έλεγχος είναι απαραίτητος για την απόκτηση του βέλτιστου συνδυασμού ιδιοτήτων.

Γενικά οι ορείχαλκοι παρουσιάζουν αντοχή στη διάβρωση, σε διάφορα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η αντοχή σε διάβρωση των ορειχάλκων βελτιώνεται με την προσθήκη 1% Sn ή Al(π.χ. το κράμα Cu 22% Zn 2%-2% Al). Επιπλέον αντιδιαβρωτική προστασία τους επιτυγχάνεται με την δημιουργία προστατευτικών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων από Ni, Cr ή Au. [7]

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις κραματικές προσθήκες στον ορείχαλκο και τις ιδιότητες που ωφελούν.

Στοιχείο	Ποσότητα	Ενισχυμένη Ιδιότητα
Μόλυβδος	1-3%	Κατεργασιμότητα
Μαγγάνιο		
Αλουμίνιο		
Πυρίτιο	0.75-2.5%	Όριο Διαρροής (μέχρι 500MN/m ²)
Νικέλιο		
Σίδηρος		
Αλουμίνιο		
Αρσενικό	0.4-1.5%	Αντίσταση στη Διάβρωση, ειδικά στο θαλασσινό νερό
Κασσίτερος		

Πίνακας 1.Κραματικά στοιχεία μπορούν να προστεθούν στον ορείχαλκο για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του. [8]

3.4. Ιδιότητες Ορείχαλκων

Ο ορείχαλκος είναι ένα κράμα χαλκού και ψευδαργύρου, στο οποίο η ποσότητα του ψευδαργύρου κυμαίνεται από πέντε έως 45 τοις εκατό για να δημιουργηθεί μια σειρά από ορείχαλκους, ο καθένας με μοναδικές ιδιότητες. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι ορείχαλκου. Εκείνοι με λιγότερο από 35 τοις εκατό ψευδάργυρου είναι γνωστοί ως α-ορείχαλκοι, διότι μόνο ένα στερεό διάλυμα (alpha) είναι παρών. Αυτά τα κράματα είναι όλκιμα σε θερμοκρασία δωματίου και είναι ιδανικό για εν ψυχρώ κατεργασία. Οι ορείχαλκο με περισσότερα από 35 τοις εκατό ονομάζονται α-β-ορείχαλκοι ή κράματα duplex και είναι ιδανικά για εν θερμώ κατεργασία.

Μικρές ποσότητες άλλων στοιχείων μπορούν να προστεθούν σε ορείχαλκο για τη βελτίωση πρωτογενών ιδιοτήτων.

3.4.1. Κατεργασιμότητα

Ενώ όλοι οι ορείχαλκοι είναι εύκολο να επεξεργαστούν με μηχανή, η προσθήκη μικρών ποσοτήτων μολύβδου στον ορείχαλκο βελτιώνει περαιτέρω αυτή την

ιδιότητα. Με την προσθήκη εώς και 3% μόλυβδο προκύπτουν οι ελεύθερης κατεργασιμότητας ορείχαλκοι. Υψηλότερες ταχύτητες κατεργασίας και χαμηλότερα ποσοστά φθοράς των εργαλείων σημαίνει ότι το συνολικό κόστος παραγωγής ελαχιστοποιείται.

<u>3.4.2. Αντοχή</u>

Ο ορείχαλκος είναι μέτριας αντοχής υλικό. Στην κατάστασητης ανόπτησηςείναι όλκιμος, αλλά ,όταν σκληρύνει από την εν ψυχρώ κατεργασία, η αντοχή του αυξάνεται. Η προσθήκη μικρών ποσοτήτων μαγγανίου, αργιλίου, κασσιτέρου, πυριτίου, σιδήρου και νικελίου στον ορείχαλκο Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη αντοχή, οι «ορείχαλκοι υψηλής αντοχής" είναι διαθέσιμοι. Αυτοί περιέχουν πρόσθετα κραματικά στοιχεία, όπως μαγγάνιο, αργίλιο, κασσίτερο, πυρίτιο, σίδηρο και νικέλιο τα οποία βελτιώνουν περαιτέρω τις ιδιότητες του ορείχαλκου και αυξάνουν την αντοχή στον εφελκυσμό, η οποία μπορεί να φτάνει και πάνω από 500MN/m². Ράβδοι και λαμαρίνες μπορούν να κατασκευαστούν σε δοχεία που λειτουργούν υπό πίεση . Η αντοχή των ορείχαλκων ουσιαστικά διατηρείται σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 200 °C (3900F) και μειώνεται μόνο κατά περίπου 30% στους 300 °C (5700F).

Οι ορείχαλκοι έχουν καλή αντοχή στην κρούση (impactresistance) και δεν θρυμματίζονται ή σπάνε, όταν υπόκεινται σε ισχυρή σύγκρουση με φορτίο.

3.4.3. Ολκιμότητα και Διαμορφωσιμότητα

Ορείχαλκοι με περιεκτικότητα σε χαλκό μεγαλύτερη από 63% μπορούν να παραμορφωθούν εκτενώς σε θερμοκρασία δωματίου, και χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρασκευή σύνθετων συστατικών με διάφορες διαδικασίες ψυχρής παραμόρφωσης. Αν η περιεκτικότητα σε χαλκό είναι κάτω από το 63% και δεν έχει άλλες κραματικές προσθήκες, η ολκιμότητα στη θερμοκρασία δωματίου είναι μικρότερη, και διαμορφώνονται με εν θερμώ κατεργασίες, όπως με έλαση, με διέλαση. Η αντοχή, η ολκιμότητα και η διαμορφωσιμότητα εξασφαλίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας τα κράματα ιδανικά για κρυογονικές εφαρμογές.

3.4.4. Αντοχή στη Διάβρωση

Γενικά, η αντίσταση στη διάβρωση των ορείχαλκων ελεύθερης κατεργασιμότητας είναι εξαιρετική. Η προσθήκη του κασσίτερου στο ναυτικό ορείχαλκο (που αναπτύχθηκε αρχικά για τη χρήση στο θαλασσινό νερό) βελτιώνει περαιτέρω την αντοχή στη διάβρωση. Η προσθήκη μιας μικρής ποσότητας αρσενικού σε κράματα αανθεκτικό ορείγαλκο ορείχαλκου δημιουργεί ένα uε αντίσταση στην αποψευδαργύρωση (dezincification), που χρησιμοποιείται συχνά για θαλάσσια εξαρτήματα.Η ατμοσφαιρική έκθεση των ορείχαλκων έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας επιφανειακής μαύρης μεμβράνης. Η υπαίθρια έκθεση θα οδηγήσει τελικά στο σχηματισμό μιας λεπτής προστατευτικής "πατίνα" (σκουριά χαλκού) που συχνά θεωρείται ως ένα οπτικά ελκυστικό χαρακτηριστικό στα κτίρια, αλλά οι ορείχαλκοι θα μείνουν ουσιαστικά ανεπηρέαστοι για απεριόριστο χρονικό διάστημα. Οι ορείχαλκοι υψηλής αντοχής που περιέχουν μαγγάνιο έχουν εξαιρετική αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση.

<u>3.4.5. Αγωγιμότητα</u>

Οι ορείχαλκοι έχουν καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητακαι είναι εμφανώς ανώτερη σε σχέση με τα σιδηρούχα κράματα, τα κράματα με βάση νικέλιο και το τιτάνιο. Η σχετικά υψηλή αγωγιμότητα τους, σε συνδυασμό με την αντίσταση στη διάβρωση, καθιστούν τους ορείχαλκους ιδανική επιλογή για την κατασκευή του ηλεκτρικού εξοπλισμού, όπως πυκνωτές και εναλλάκτες θερμότητας. Επίσης, είναι κατάλληλοι για χρήση σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου (-196°C). Η παρουσία μολύβδου στον ορείχαλκο έχει λιπαντική δράση, παρέχοντας χαμηλή τριβή και αντοχή στη φθορά που χρειάζονται κατά τη χρησιμοποίηση των ορείχαλκων σε γρανάζια.

<u>3.4.6. Αντοχή στη φθορά</u>

Η παρουσία μολύβδου σε ορείχαλκο έχει λιπαντική δράση και προσφέρει χαμηλή τριβή και χαμηλή φθορά, ιδιότητες που χρησιμοποιούνται στις πλάκες, στους τροχούς και σταγρανάζια που χρησιμοποιούνται σε όργανα και ρολόγια. Ειδικοί ορείχαλκοι

είναι διαθέσιμοι με κραματικές προσθήκες πυριτίου που κάνει το υλικό ιδανικό για χρήση σε ρουλεμάν, που είναι ανθεκτικά σε μεγάλη καταπόνηση.

3.4.7. Μαγνητική Διαπερατότητα

Οι ορείχαλκοι είναι ουσιαστικά μη-μαγνητικοί, μια ιδιότητα που προσφέρει εκτεταμένη χρήση στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, καθώς επίσης και όργανα όπως οι γεωλογικά όργανα.

<u>3.4.8. Υγιεινή</u>

Ο χαλκός είναι βακτηριοστατικός και η αναλογίατου στον ορείχαλκο έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της ανάπτυξης μικροοργανισμών στην επιφάνεια του ορείχαλκου. Δοκιμές σε πόμολα και σεπροστατευτικά ελάσματα έχουν δείξει ότι αυτά που κατασκευάζονται από καθαρό ορείχαλκο είναι λιγότερο πιθανό, από ό,τι άλλα υλικά,να συντελέσουν στην ανάπτυξη μικροοργανισμών που προκαλούν νοσοκομιακές λοιμώξεις.



Εικόνα 4.Δοκιμές σε πόμολα και σε προστατευτικά ελάσματα έχουν δείξει ότι εκείνα που κατασκευάζονται από καθαρό ορείχαλκο είναι πιο υγιεινά.

<u>3.4.9. Αισθητική</u>

Οι ορείχαλκοι χρησιμοποιούνται εκτενώς για διακοσμητικές εφαρμογές και για την κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων, όπου απαιτείται αισθητική. Ο ορείχαλκος αλουμινίου έχει μια διακριτική ασημένια γυαλάδα και η προσθήκη μαγγανίου σε ορισμένους ορείχαλκους τους δίνει έναχάλκινο χρώμα.Οι υψηλής αντοχής ορείχαλκοι, μερικοί από τους οποίους είναι γνωστοί ως ορείχαλκοι μαγγανίου, είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για αρχιτεκτονικές εφαρμογές. [9]

3.5. Γενικές θερμοδυναμικές αρχές-Διαγράμματα φάσεων ισορροπίας

Τα διαγράμματα φάσεων ισορροπίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή των μετασχηματισμών φάσεων και των σταθερών φάσεων στους ορείχαλκους. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν απεικονίσεις, στο πεδίο θερμοκρασίας-συστάσεως, της δομής που επικρατεί σε θερμοδυναμική ισορροπία. Με την βοήθεια των διαγραμμάτων αυτών μπορούμε κάτω από συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας:

- να προσδιορίζουμε τις φάσεις και τις συστάσεις των φάσεων από τις οποίες αποτελείται ένα κράμα
- να προβλέπουμε σε κάθε θερμοκρασιακή μεταβολή τις αντίστοιχες μεταβολές
 της δομής του κράματος
- να προσδιορίζουμε χρήσιμες συνθήκες κατεργασίας του κράματος, όπως θερμοκρασίες solidus και liquidus, το εύρος στερεοποιήσεως, θερμοκρασίες για την διαλυτοποίηση ή καθίζηση φάσεων, ευτηκτικές και ευτηκτοειδείς θερμοκρασίες, όρια στερεάς διαλυτότητας κ.λ.π.


Εικόνα 5. Ψευδοδιμερές διάγραμμα Cu-Si-Zn με 4%κ.β. Si, στο τμήμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε Si [10]



Εικόνα 6.Τριμερές διάγραμμα ισορροπίας Cu-Zn-Si.[11]



Εικόνα 7.Το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Zn.

Για ποσοστά ψευδαργύρου μέχρι 39% κ.β. (μέγιστη διαλυτότητα στους 454°C), σχηματίζεται στερεό διάλυμα φάσης α. Η φάση α κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα (F.C.C.) και ο μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α παρουσιάζει καλή ολκιμότητα εν ψυχρώ.

Για ποσοστά ψευδαργύρου 46-51% κ.β. και θερμοκρασία υψηλότερη των 454°C, σχηματίζεται η φάση β που βασίζεται στον σχηματισμό του CuZn. Η φάση β κρυσταλλώνεται στο κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (B.C.C.) και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μετασχηματίζεται σε φάση β΄. Η φάση β έχει καλή ολκιμότητα εν θερμώ, ενώ η β΄ είναι σκληρή και εύθραυστη.

Όταν το ποσοστό του ψευδαργύρου κυμαίνεται μεταξύ 56% και 68%, σχηματίζεται η φάση γ, η οποία βασίζεται στον σχηματισμό του Cu₅Zn₈ και κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα. Η θερμοκρασία διάταξης αυτής της φάσης είναι 270 °C και είναι εξαιρετικά εύθραυστη.

Η ε-φάση βασίζεται στον σχηματισμό του $CuZn_3$ και κρυσταλλώνεται στο εξαγωνικό σύστημα (H.C.P).

Η δ-φάση βασίζεται στον σχηματισμό μιας ένωσης που δεν έχει προσδιοριστεί απόλυτα και τέλος μπορεί να εμφανιστεί η η-φάση για πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε Zn.

Η κ-φάση δημιουργείται όταν στον ορείχαλκο προστεθεί πυρίτιο. Οι ορείχαλκοι με πυρίτιο εναι πλούσιοι σε κ-φάση, η οποία αυξάνει την μηχανική αντοχή των ορείχαλκων, χωρίς μείωση στην ολκιμότητα.

Πρακτική χρησιμότητα έχουν δυο είδη ορείχαλκου: μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α (με 5-39% Zn) και διφασικός α+β' (με 40-45% Zn). Ορείχαλκοι αμιγούς φάσης β και διφασικοί β+γ δεν βρίσκουν εφαρμογές, λόγω της ευθραυστότητας τους.

Γενικά οι ιδιότητες των ορειχάλκων μεταβάλλονται κατά συνεχή τρόπο με την αύξηση της περιεκτικότητας του Zn.

Αυξανόμενου του ποσοστού σε Zn, το χρώμα των ορειχάλκων μεταβάλλεται από κόκκινο σε κίτρινο, ενώ η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα ελαττώνεται, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για ηλεκτρικές εφαρμογές.

Επίσης, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Zn αυξάνεται η σκληρότητα και η ολκιμότητα (για ορείχαλκο με περιεκτικότητα σε Zn 30% εμφανίζεται η μέγιστη σκληρότητα). Με περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε Zn, η σκληρότητα ελαττώνεται, ενώ η ολκιμότητα συνεχίζεται αυξανόμενη.

Οι μέγιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων εμφανίζονται στον ορείχαλκο που περιέχει 30% Zn. Το κράμα αυτό εμφανίζει άριστη συμπεριφορά κατά την κοίλανση.

Οι ορείχαλκοι που περιέχουν Zn σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10%, εμφανίζουν το φαινόμενο της εργοδιάβρωσης. Όταν ο ορείχαλκος βρίσκεται υπό καθεστώς τάσεων, διαβρώνονται τα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική διάβρωση) από την υγρασία της ατμόσφαιρας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι τάσεις αυτές μπορεί να προέρχονται είτε από εξωτερική καταπόνηση, είτε από την ενδοτράχυνση του κράματος. Η διάβρωση είναι ταχύτατη στην περίπτωση της αμμωνιακής ατμόσφαιρας ή ατμόσφαιρας αλάτων υδραργύρου. Ονομάζεται και εποχιακή ρωγμάτωση, διότι παρατηρείται σε εποχές μεγάλης υγρασίας. Η εργοδιάβρωση αντιμετωπίζεται εάν ο ορείχαλκος μετά την διαμόρφωση του ανοπτηθεί σε θερμοκρασία 275°C, για μισή ώρα, ώστε να ελαττωθούν οι εσωτερικές τάσεις από ενδοτράχυνση, χωρίς ταυτόχρονη μείωση της σκληρότητας του κράματος.

Οι α-ορείχαλκοι διαμορφώνονται εύκολα εν ψυχρώ και δυσκολότερα εν θερμώ. Οι ορείχαλκοι α+β, διαμορφώνονται εύκολα εν θερμώ(700-750°C), διότι σε υψηλές θερμοκρασίες η εύθραυστη φάση β΄, μετασχηματίζεται στην όλκιμη φάση β. Γενικά η

μορφοποίηση των μονοφασικών ορείχαλκων γίνεται εν ψυχρώ, με ενδιάμεσες ανοπτήσεις, ενώ των διφασικών γίνεται εν θερμώ.

Στην περίπτωση που ένα έλασμα ορείχαλκου πρόκειται να υποστεί βαθειά κοίλανση, θα πρέπει να ελεγχθεί το μέγεθος των κόκκων του. Πολύ λεπτόκοκκο κράμα διαμορφώνεται δύσκολα, ενώ χονδρόκοκκο κράμα, μετά από βαθειά κοίλανση, αποκτά ανώμαλη εξωτερική επιφάνεια, η οποία καλείται «δέρμα πορτοκαλιού». Η ρύθμιση του μεγέθους των κόκκων, μετά από την εν ψυχρώ έλαση, γίνεται με ανακρυστάλλωση του κράματος σε θερμοκρασία 600-700°C, για μισή περίπου ώρα.

<u>3.5.2. Παράγοντας ισοδυναμίας Zn, Guillet (Guilletzincequivalent)</u>

Με εξαίρεση τον μόλυβδο και το νικέλιο οι περισσότερες προσθήκες στοιχείων διαλύονται στη στερεά κατάσταση του ορείχαλκου και το διμερές διάγραμμα Cu-Zn δεν ισχύει πλέον διότι οι καμπύλες ισορροπίας είναι μετατοπισμένες.

Πρακτικά, η προσθήκη οποιουδήποτε στοιχείου αντιστοιχεί σε αύξηση του ποσοστού του ψευδαργύρου. Με άλλα λόγια, στην παρουσία ενός τρίτου στοιχείου, η β φάση εμφανίζεται σε μικρότερο ποσοστό ψευδαργύρου. Για παράδειγμα στην περίπτωση ορείχαλκου που περιέχει 38% Zn και 2% Sn, μπορεί περίπου να θεωρηθεί σαν ορείχαλκος με 42% Zn(είναι ουσιαστικά ορείχαλκος α+β φάσης, άλλα όχι α-φάσης).

Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε εάν ένας ορείχαλκος είναι μονοφασικός ή διφασικός, είναι απαραίτητο για τις διάφορες προσθήκες κραματικών στοιχείων να χρησιμοποιήσουμε την ισοδυναμία Guillet. Πολλαπλασιάζουμε δηλαδή τον παράγοντα ισοδυναμίας Guillet του Zn με την περιεκτικότητα του κάθε κραματικού στοιχείου.

Επομένως πολλαπλασιάζουμε για το πυρίτιο (Si) με 10, για το αλουμίνιο (Al) με 6, για τον κασσίτερο (Sn) με 2, για τον μόλυβδο (Pb) με 1, για το σίδηρο (Fe) με 0,9, για το μαγγάνιο (Mn) με 0,5 και για το νικέλιο (Ni) με -2.

Ο τύπος της ισοδυναμίας Ζη είναι : (Α/Β)*100, όπου

A: 10*Si%+ 6*Al%+ 2*Sn%+ 1*Pb%+ 0,9*Fe%+ 0,5*Mn% -2*Ni+ Zn% και B: A + Cu%

Αυτή η μέθοδος δίνει μεγάλη ακρίβεια για υψηλής περιεκτικότητας ορείχαλκους, δεδομένου ότι τα κραματικά στοιχεία δεν υπερβαίνουν το ποσοστό του 2% το καθένα.[12]

3.6. Ο Ορείχαλκος Ecobrass

Ο Ecobrass είναι ένας ειδικός τύπος ορείχαλκου, χωρίς μόλυβδο, ο οποίος εμφανίζει εξαιρετική συμπεριφορά στην επεξεργασία με σφυρηλάτηση εν ψυχρώ και στη μηχανική κατεργασία. Έχει χαρακτηριστικά αυξημένης μηχανικής αντοχής, τα οποία αντιστοιχούν πλήρως σε ορισμένες κατηγορίες χάλυβα και η αντοχή το στη διάβρωση είναι ανώτερη από εκείνη των συμβατικών ορείχαλκων ελεύθερης κατεργασιμότητας. Αυτό το κράμα είναι κατάλληλο για την παραγωγή μηχανικά κατεργασμένων και σφυρήλατων τμημάτων. Ο Ecobrass δεν περιέχει τοξικές ουσίες, για το λόγο αυτό ικανοποιεί ήδη προσεχείς κατευθυντήριες γραμμές για το περιβάλλον και την υγεία και έχει εγκριθεί για χρήση σε σωληνώσεις πόσιμου νερού.



Εικόνα 8. Μορφές ορείχαλκου Ecobrass.

<u>3.6.1. Χημική Σύσταση</u>

Ο Ecobrass είναι ένα κράμα χαλκού, ψευδαργύρου και πυριτίου σε ένα βελτιστοποιημένο συνδυασμό που υπερτερεί εντυπωσιακά σε σχέση με τον συμβατικό ορείχαλκο. Η ονομαστική σύσταση του Eco brass είναι 75.85% κβCu, 3.39% κ.β.Si, 0.020% κ.β. Fe και 20.74% κ.β.Zn. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τη σύσταση που δίνεται από την εταιρία του Eco brass.



Εικόνα 9.Οι τιμές αντιστοιχούν σε ποσοστό κατά βάρος (Wieland SW1 – Ecobrass).

3.6.2. Φυσικές ιδιότητες

Ο Ecobrass διαθέτει τις γνωστές ιδιότητες των υλικών χαλκού. Το στοιχείο κραματοποίησης, πυρίτιο έχει ευεργετική επίδραση στην ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα του ορείχαλκου.

Ιδιότητες	ECOBRASS®
Πυκνότητα [g/cm ³]	8.46
Μέτρο ελαστικότητας [GPa]	≈ 85
Ηλεκτρική αγωγιμότητα [MS / m] [% IACS]	4.5 (15) 7.8
Θερμική αγωγιμότητα [W/m*K]	≈ 35

Πίνακας 2. Οι φυσικές ιδιότητες του ειδικού ορείχαλκου Ecobrass.

3.6.3. Μηχανικές ιδιότητες

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ορείχαλκου Ecobrass είναι εξαιρετικά υψηλά. Ανάλογα με τις διαστάσεις, οι τιμές αντοχής του εφελκυσμού μπορεί να φτάσουν και τα 1000 MPa.

<u>3.6.4. Μικροδομή</u>

Οι φάσεις, που είναι πλούσιες σε πυρίτιο (κάππα φάση) στην μικροδομή του ορείχαλκου, λειτουργούν ως θραυστήρες αποβλήτων μηχανουργικής κατεργασίας. Πρόκειται για "σκληρούς" θραυστήρες αποβλήτων σε σύγκριση με τα κράματα ορείχαλκου που περιέχουν μόλυβδο στη μικροδομή τους.

<u>3.6.5. Συμπεριφορά στη Διάβρωση</u>

Οι ειδικοί ορείχαλκοι, όπως ο Ecobrass, οφείλουν την εξαιρετική αντοχή τους στη διάβρωση σε κραματικές προσθήκες. Η προσθήκη του πυριτίου μειώνει την αποψευδαργύρωση και την ρηγμάτωση, λόγω καταπόνησης. [13]

3.6.6. Άλλες κραματικές προσθήκες στον ορείχαλκο χωρίς μόλυβδο

Μόλυβδος προστίθεται στα κράματα για να εξασφαλιστεί η βελτίωση της μηχανικής κατεργασίας. Ο μόλυβδος, που έχει χαμηλή θερμοκρασία στερεοποίησης, θα καλύψει τυχόν μικροπόρους κατά τη χύτευση. Επιπλέον, ο μόλυβδος βοηθάει στη μηχανική κατεργασία, αφού ενεργεί ως λιπαντικό με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μικρά ασυνεχή γρέζια.

Η εισαγωγή αυστηρότερων κανονισμών για τα επιτρεπόμενα επίπεδα μολύβδου που απελευθερώνεται στο πόσιμο νερό, έδωσαν το έναυσμα για την ανάπτυξη του ορείχαλκου χωρίς μόλυβδο (lead-free). Ένα τέτοιο κράμα, που ονομάζεται "EnviroBrass", αντικαθιστά το μόλυβδο με το βισμούθιο και το σελήνιο.

Το βισμούθιο (Bi), το οποίο είναι δίπλα στο μόλυβδο στον περιοδικό πίνακα και με παρόμοιες ιδιότητες, μπορεί να αναμένεται να παίξει το ρόλο του μολύβδου στο κράμα αλλά χωρίς τις αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.Το βισμούθιο, ουσιαστικά, διαβρέχει τα όρια των κόκκων και έτσι ο ορείχαλκος χάνει τη συνεκτικότητά του.Το σελήνιο ενισχύει την επίδραση του βισμουθίου, επιτρέποντας χαμηλότερες συγκεντρώσεις Bi να χρησιμοποιηθούν.Η παρουσία του Bí δεν τροποποιεί την ελαστική συμπεριφορά του χαλκού. Ωστόσο, η ρήξη λαμβάνει χώρα πάντοτε κατά την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης. [14,15,16]

Είναι γνωστό ότι το βισμούθιο απομονώνει το χαλκό, ως ατομικό στρώμα στα όρια των κόκκων. Αυτό το ενιαίο στρώμα του βισμουθίου έχει αρκετά δραστικές επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες του χαλκού, με αποτέλεσμα να μετατραπεί από ένα από τα πιο όλκιμα μέταλλα σε ένα πολύ εύθραυστο μέταλλο.

Η ελαστική συμπεριφορά του Cu δεν τροποποιείται με την παρουσία υγρού Bi, αλλά φαίνεται ότι η πλαστική παραμόρφωση είναι απαραίτητη πριν από τη θραύση. Πιστεύεται ότι ο μηχανισμός που προτείνεται για να εξηγήσει τη διείσδυση Bi χωρίς εξωτερική πίεση (σχηματισμό μιας διαταραγμένης φάσης στα όρια των κόκκων) δεν πρέπει να επηρεάζεται πολύ από τις εξωτερικές πιέσεις. [17,18]

4.0. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1. Περιγραφή Υλικού

Η παρούσα εργασία μελετά ένα ειδικό κράμα ορείχαλκου, το C69300, κατά την ονοματολογία σύμφωνα με το UNS (Unified Numbering System). Το υλικό δώθηκε υπό τη μορφή ράβδου και στη συνέχεια το επεξεργαστήκαμε και το μετασχηματίσαμε υπό μορφή πλακιδίου, το οποίοείχε πάχος 6mm, μήκος 120mm και πλάτος 15mm. Η εταιρεία Wieland, με έδρα της τη Γερμανία, παράγει αυτόν τον τύποορείχαλκου, του οποίου η κύρια εφαρμογή είναι οι υδραυλικές εγκαταστάσεις. Η εμπορική ονομασία αυτού του ορείχαλκου είναι Wieland-SW1 ή ECOBRASS.

Η χημική σύσταση του κράματος ορείχαλκου είναι:

Ecobrass	Cu	Zn	Si	Fe
% κ.β.	75.85	20.74	3.39	0.020

Πίνακας 3. Η χημική σύσταση του κράματος Ecobrass.

4.2. Προετοιμασία Δοκιμίων

<u>4.2.1. Κοπή Δοκιμίων</u>

Αρχικά, έγιναν οι κοπές λωρίδων από το αρχικό δοκίμιο ορείχαλκου με πλάτος 15mm, πάχος 6mm και μήκος 120mm, ώστε να αποκτήσουν κατάλληλες διαστάσεις για την ακολουθούμενη έλαση. Τα οχτώ δοκίμια που προέκυψαν από τις κοπές του ελάσματος έχουν πάχος 6mm και μήκος περίπου 15mm. Η κοπή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δισκοτόμου, τύπου StruersDiscotom. Στη συνέχεια και μετά την εν ψυχρώ έλαση, έγινε η κοπή των ελασμένων δοκιμίων σε εφτά κομμάτια για να πραγματοποιηθούν θερμικές κατεργασίες σε διάφορες θερμοκρασίες. Η κοπή σε μικρότερα δοκίμια πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μικροτόμου, τύπου StruersAccutom-2, ώστε να ελέγχουμε καλύτερα τις διαστάσεις των δειγμάτων.

Κατά τη διαδικασία της κοπής, τα δοκίμια ψύχονταν με αραιωμένο ψυκτικό γαλάκτωμα, ώστε να αποφευχθεί η θέρμανση του δοκιμίου. Επιπλέον, πάνω στα δοκίμια χαράκτηκαν οι αριθμοί από το 1-8, ανάλογα με το ποσοστό έλασης που υπέστησαν. Αυτό έγινε, με στόχο, την ευκολότερη αναγνώρισή τους μετά την πραγματοποίηση της εκάστοτε θερμικής κατεργασίας, όπου δεν θα ήταν δυνατός ο διαχωρισμός τους με διαφορετικό τρόπο, αφού τοποθετούνταν και τα οχτώ δοκίμια μαζί, ένα από κάθε ποσοστό έλασης, μέσα στο φούρνο και ιδιαίτερα μετά την οξείδωση που υπέστησαν σε ορισμένες θερμικές κατεργασίες.

4.2.2.Ψυχρή Έλαση

Μετά τη κοπή των ορειχάλκων σε 8 δοκίμια στο δισκοτόμο, τα δείγματα υπέστησαν ψυχρή έλαση, η οποία πραγματοποιήθηκε σε έλαστρο τύπου Laminoir/Mod. M. 100/55. Η έλαση πραγματοποιήθηκε με 8 διαφορετικούς βαθμούς πλαστικής παραμόρφωσης εν ψυχρώ,5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% και 40%, και σε ένα άξονα έλασης, από την οποία ελήφθησαν επιμήκη δοκίμια κατά τον άξονα αυτό. Τα τελικά πάχη που ελήφθησαν στους παραπάνω βαθμούς πλαστικής παραμόρφωσης φαίνονται στον Πίνακα 4. Η μείωση του πάχους των αρχικών δοκιμίων έγινε, προοδευτικά μέσω διαδοχικών περασμάτων (πάσσα) από το ίδιο έλαστρο του οποίου το διάκενο μεταξύ των ραούλων μειώνονταν συνεχώς, με σταθερό βήμα 0.10-0.05mm.

	Αρχικό πάχος(mm)	Τελικό πάχος(mm)
5%	6,01	5,69
10%	6,13	5,52
15%	6,16	5,25
20%	6,15	4,90
25%	6,16	4,63
30%	6,13	4,28
35%	6,10	3,54
40%	6,10	3,50

Πίνακας 4. Τα τελικά πάχη που ελήφθησαν σε ορισμένους βαθμούς πλαστικής παραμόρφωσης.

Ο σκοπός της πραγματοποιούμενης έλασης είναι να μελετηθεί η επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσης εν ψυχρώ και η επίπτωσή τηςστη μικροδομή του μελετώμενου κράματος και στις μηχανικές του ιδιότητες (στους μετασχηματισμούς φάσεων).

4.2.3. Θερμικές Κατεργασίες

Μετά την ψυχρή έλαση, το κάθ' ένα από τα οχτώ δοκίμια κόπηκαν με το μκροτόμο σε επιμέρους εφτά τελικά δοκίμια με διαστάσεις 6 x 15mm. Στη συνέχεια, όλα τα δοκίμια υπέστησαν θερμικές κατεργασίες. Οι θερμικές κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν στις θερμοκρασίες των 540°Cκαι 600°C για χρονικά διαστήματα 30min, 3h, 6h και 24h. Σε κάθε θερμική κατεργασία τοποθετούνταν μέσα στο φούρνο μαζί και τα οχτώ δοκίμια από κάθε ψυχρή έλαση, δηλ. ένα δοκίμιο από κάθε έλαση με βαθμό παραμόρφωσης 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, πάνω σε πυρίμαχη μια βάση, με σκοπό να υποστούν όλα τις ίδιες ακριβώς συνθήκες και να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός χρόνος των θερμικών κατεργασιών.

Μετά από κάθε θερμική κατεργασία τα δοκίμια υπέστησαν βαφή σε νερό. Η βαφή είχε ως στόχο το 'πάγωμα' της διαδικασίας κατακρήμνισης και την εξασφάλιση της λήψης των μικροδομών που αντιστοιχούν στις εκάστοτε θερμοκρασίες, ώστε να εκμηδενιστεί η πιθανότητα μεταβολής της μικροδομής που θα μπορούσε να προκαλέσει μια αργή απόψυξη από τις σχετικά υψηλές θερμοκρασίες των θερμικών κατεργασιών. Αν και πολύ πιθανό να μην υπήρχε κανένα πρόβλημα αν γίνονταν η απόψυξη στον αέρα, αφού ο μελετώμενος τύπος ορείχαλκου έχει μεγάλη εμβαπτότητα, για τις θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται η ίδια μικροδομή είτε γίνεται βαφή στο νερό, είτε στον αέρα.

<u>4.2.4. Εγκιβωτισμός</u>

Η διαδικασία του εγκιβωτισμού που επιδέχονται τα δοκίμια γίνεται έτσι ώστε να προετοιμαστούν για μεταλλογραφική κατεργασία. Για τον εγκιβωτισμό επιλέγουμε ένα υλικό που μπορεί να στερεοποιηθεί, έτσι ώστε να μην επηρεαστεί η επιφάνεια των δοκιμίων από την πίεση και την θερμότητα. Ο εγκιβωτισμός των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικά πλαστικά καλούπια και τοποθετήθηκαν στο κέντρο αυτών, ώστε να μπορούμε στη συνέχεια να επεξεργαστούμε την επιφάνειά τους. Έπειτα, προετοιμάσαμε το μίγμα που θα χρησιμοποιήσουμε. Το μίγμα αποτελείται από ρητίνη και σκληρυντή, ο οποίος βοηθάει στην στερεοποίηση της ρητίνης. Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαφανής πολυεστερική ταχείας πήξεως, ενώ ο καταλύτης (σκληρυντής) ήταν υπεροξείδιο μεθυλικής αιθυλικής κετόνης. Η αναλογία ανάμειξης σκληρυντή-ρητίνης ήταν 10 σταγόνες στα κάθε 10 ml. Έτσι, δημιουργείται μια αντίδραση πολυμερισμού μεταξύ της ρητίνης και του σκληρυντή και επιτυγχάνεται η σκλήρυνση και η στερεοποίηση του μίγματος.Ο χρόνος στερεοποίησης της ρητίνης ήταν περίπου 2h, κατά την οποία λάμβανε χώρα εξώθερμη αντίδραση. Μαζί με το δοκίμιο εγκιβωτίζονταν και ένα κομμάτι χαρτί πάνω στο οποίο αναγράφονταν οι απαραίτητες πληροφορίες για το αντίστοιχο δοκίμιο (βαθμός πλαστικής παραμόρφωσης, θερμοκρασία και χρόνος της κατεργασίας).

<u>4.2.5. Λείανση</u>

Τα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης αποσκοπούσαν στη μείωση της επιφανειακής τραχύτητας του δοκιμίου, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της δομής του μετά από την προσβολή του με το κατάλληλο αντιδραστήριο, για παρατήρηση στο οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM), καθώς και μέτρηση της σκληρότητάς του. Η λείανση πραγματοποιήθηκε σε οριζόντιο, υδρόψυκτο, περιστρεφόμενο τροχό, κατά την διάρκεια της οποίας, η επιφάνεια του δοκιμίου εφάπτονταν σε αυτόν χειρωνακτικά. Η πίεση που ασκήθηκε στο κέντρο του δοκιμίου ήταν ισόποση, για να μη δημιουργηθούν ανισοεπίπεδα στην επιφάνειά του. Σαν μέσο λείανσης χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, τοποθετημένα πάνω στην επιφάνεια του τροχού. Τα χαρτιά SiC χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα μέγεθος κόκκου του λειαντικού μέσου (grid). Για παράδειγμα, ο αριθμός 220grid εκφράζει ότι το χαρτί έχει 220 κόκκους καρβιδίων του πυριτίου/τετραγωνική ίντσα. Τα χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά είναι 1200grid, 2000grid, 3000grid. Οι γραμμές λείανσης πρέπει να είναι κάθετες με τις γραμμές που είχαν δημιουργηθεί στο προηγούμενο στάδιο, ώστε να απαλείφονται τελείως και αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη περιστροφή του δοκιμίου. Όσον αφορά στην προετοιμασία για δοκιμή σκληρομέτρησης, η λείανση περιοριζόταν μέχρι το χαρτί ονομαστικής πυκνότητας 2000 grid, έτσι ώστε να είναι ορατές οι γραμμές λείανσης στο μικροσκόπιο του σκληρόμετρου για ορθή εστίαση. Επίσης, το δοκίμιο

35

πρέπει να ξεπλένεται πριν προχωρήσει στο επόμενο στάδιο, για να μην μολυνθούν τα λειαντικά χαρτιά με κόκκους από τα πιο χονδρόκοκκα λειαντικάχαρτιά των προηγούμενων σταδίων. Μετά την τελική λείανση, τα δοκίμια καθαρίζονται με βαμβάκι και νερό, έπειτα ξεπλένονται με οινόπνευμα και στεγνώνονται με ρεύμα θερμού αέρα.

<u>4.2.6. Στίλβωση</u>

Το επόμενο στάδιο προετοιμασίας των επιφανειών των δοκιμίων για μεταλλογραφία ήταν η στίλβωση. Σκοπός της στίλβωσης είναι η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και αστραφτερή με την ελάττωση των γραμμών λείανσης, έτσι ώστε να γίνει εύκολη και ευδιάκριτη η παρατήρησή τους στο μικροσκόπιο.Η στίλβωση έγινε σε δύο στάδια.

- Στο πρώτο, τα δοκίμια στιλβώθηκαν με αδαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου διαμαντιού 6μm καθώς και με αδαμαντόπαστα με μέγεθος κόκκου διαμαντιού 1μm. Η αδαμαντόπαστα απλώθηκε πάνω σε κατάλληλα, για το κάθε στάδιο, υφάσματα, τα οποία τοποθετούνταν σε περιστρεφόμενο τροχό. Κατά τη δειάρκεια της στίλβωσης ρίχνουμε υγρό (λιπαντικό) για να μην ξεραίνεται η αδαμαντόπαστα. Το απαιτούμενο υγρό λιπαντικό μέσο ήταν της BÜHLER τύπου METADIdiamondsuspension. Κατά τη διάρκεια της στίλβωσης, ελέγχονταν οπτικά η επιφάνεια του δοκιμίου με ξέπλυμα με αιθανόλη, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μετά την ολοκλήρωση της εκάστοτε διαδικασίας, η επιφάνεια του δοκιμίου ξεπλένονταν με νερό, έπειτα καθαρίζονταν με οινόπνευμα και ακολούθως στεγνώνονταν γρήγορα με αέρα, έτσι ώστε να μην προλάβουν να δημιουργηθούν πάνω στην επιφάνεια κηλίδες.
- Στο δεύτερο στάδιο, τα δοκίμια στιλβώθηκαν με χρήση αιωρήματος σίλικα (colloidalsilica, μέγεθος σωματιδίων0,06μmSiO₂). Η σίλικα απλωνόταν κατά διαστήματα πάνω σε κατάλληλο άσπρο υφασμάτινο πανί, το οποίο τοπαθετήσαμε πάνω σε περιστρεφόμενο τροχό.κατάτη δειάρκεια της στίλβωσης ρίχνουμε απιονισμένο νερό για να μην εμφανιστούν κρύσταλλοι, οι οποίοι χαρακώνουν τον ορείχαλκο. Αυτό το στάδιο στίλβωσης διαρκεί περίπου 10min. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, η επιφάνεια του δοκιμίου ξεπλένεται κατευθείαν με απιονισμένο νερό, έπειτα με νερό και

βαμβάκι και στη συνέχεια με αιθανόλη και βαμβάκι. Καθαρίζουμε πολύ καλά γιατί η σίλικα δύσκολα καθαρίζεται από το δοκίμιο και δημιουργεί κηλίδες. Τέλος, στεγνώνουμε με ρεύμα θερμού αέρα.

4.2.7. Χημική προσβολή

Η χημική προσβολή ήταν το τελευταίο στάδιο πριν τη εξέταση των δειγμάτων στο οπτικό μικροσκόπιο και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Το τελευταίο αυτό στάδιο είναι απαραίτητο για να αποκαλυφθεί η δομή του εξεταζόμενου υλικού με μικροσκοπικές μεθόδους. Για την χημική προσβολή χησιμοποιήθηκε διάλυμα FeCl₃, δηλαδή διάλυμα με χημική σύσταση 8,3g FeCl₃, 10ml HCl και 90ml H₂O. Το ορειχάλκινο δοκίμιο προσβάλλεται γρήγορα, γι' αυτό το δοκίμιο προσβάλλεται λίγο και ελέγχεται στο μικροσκόπιο σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο χρόνος παραμονής των επιφανειών των δοκιμίων στο δάλυμα ήταν 1sec. Μετά την ολοκλήρωση της προσβολής, τα δοκίμια ξεπλένονταν με νερό, έπειτα καθαρίζονταν με οινόπνευμα και ακολούθως στεγνώνονταν γρήγορα με αέρα. Στη συνέχεια, εξετάσαμε στο οπτικό μικροσκόπιο την ορθότητα του βαθμού προσβολής και όταν κρινόταν απαραίτητο εφαρμόζαμε περαιτέρω προσβολή.

4.2.8. Ονομασία Δοκιμίων

Για λόγους διευκόλυνσης, τα δοκίμια ονομάστηκαν με βάση τις πειραματικές παραμέτρους, με μια σύντομη και αντιπροσωπευτική τυποποίηση. Ένα παράδειγμα του τρόπου ονομασίας των δοκιμίων είναι το 1/540°C/24h, όπου το πρώτο σκέλος της ονομασίας υποδηλώνει το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης που υπέστησαν τα δοκίμια με ψυχρή έλαση, στη συγκεκριμένη περίπτωση 5%, το δεύτερο σκέλος υποδηλώνει τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε η εκάστοτε θερμική κατεργασία (στους 540 ή 600°C) και τέλος, το τρίτο σκέλος υποδηλώνει το χρονικό διάστημα της κάθε θερμικής κατεργασίας (30min, 3h, 6h ή 24h). Η ίδια ακριβώς μορφή ακολουθήθηκε για την ονομασία όλων των δοκιμίων, με την ίδια διαδοχή των χαρακτηριστικών.

4.3. Μέθοδοι Εξέτασης της Μικροδομής

4.3.1. Οπτικό Μικροσκόπιο (LightOpticalMicroscope, LOM)

Το οπτικό μικροσκόπιο αποτελεί, συνήθως, το αμέσως επόμενο στάδιο μετά την χημική προσβολή, έτσι ώστε τα δοκίμια να παρατηρηθούν, στη συνέχεια, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου OlympusBX41M. Σκοπός της οπτικής μικροσκοπίας είναι μια ευρύτερη παρατήρηση των γενικότερων μεταβολών της μικροδομής των δοκιμίων σε συσχέτιση με την επίδραση των διάφορων συνδυασμών έλασης και θερμικών κατεργασιών, π.χ. συσσωματώματα κρυστάλλων, επιμήκυνση και αύξηση του μεγέθους του κόκκου.

4.3.2. Περίθλαση Ακτίνων-Χ (XRD)

Η μέθοδος της περίθλασης ακτίνων X είναι μια διαδικασία εκπομπής ακτίνων X κάτω από ορισμένες συνθήκες αλληλεπίδρασης ύλης και ακτινοβολίας. Βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας, γνωστού μήκους κύματος λ, επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων ενώσεων και στη συνέχεια στον προσδιορισμό μέσω της αντίστοιχης γωνίας θ. η σχέση μεταξύ της γωνίας θ, του μήκους κύματος λ, των ακτίνων X αλλά και της διαπλεγματικής απόστασης d δίνεται από τη γνωστή εξίσωση Bragg:

n λ =2d sin θ

Όπου η η τάξη της περίθλασης.

Ο διαθέσιμος εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν περιθλασίμετρο τύπου SiemensD5000 και τύπου BrukerD8 Focus, με ακτινοβολία CuKa. Το περιθλασίμετρο διαθέτει άνοδο Cu και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι λ=15.406 nm. Το φιλτράρισμα της ακτινοβολίας γίνεται με φίλτρο Ni. Οι παράμετροι με τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις ήταν τάση V=40 kV, ένταση 40 mA και η γωνία 2θ κυμαίνονταν μεταξύ 30° έως 100°, με βήμα μετατόπισης 0,02(μοίρες/s). Πρέπει για κάθε φάση να αντιστοιχούν τουλάχιστον τρεις κορυφές για να ισχύει η ταυτοποίηση. Σκοπός του XRD (X-RayDiffraction) είναι να δώσει τις φάσεις στις οποίες βρίσκεται το κάθε στοιχείο (δηλαδή κάνει ανάλυση φάσεων), ώστε να ταυτοποιηθούν οι φάσεις που παρατηρήθηκαν με το οπτικό μικροσκόπιο.

4.3.3. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (ScanningElectronMicroscope, SEM)

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (ScanningElectronMicroscope – SEM) χρησιμεύει για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Η μελέτη με τη τεχνική αυτή στηρίζεται στη διαφορά του ατομικού αριθμού (Z) μεταξύ των στοιχείων της επιφάνειας, που περιέχονται στα κατακρημνίσματα και στη μητρική φάση. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν Jeol 6380 LV, επιταχυνόμενης τάσης 20 kV. Τα δοκίμια που μελετήθηκαν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης ήταν αυτά που η μικροδομή τους κρίθηκε ότι χρειάζονταν περαιτέρω μελέτη με μεγαλύτερες μεγεθύνσεις από αυτές που μπορούσαν να επιτευχθούν με τις τυπικές μεθόδους οπτικής μικροσκοπίας.Ελήφθησαν μικρογραφίες δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI), οι οποίες παρείχαν πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της μελετώμενης επιφάνειας των δοκιμίων, και μικρογραφίες οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES), οι οποίες έδωσαν πληροφορίες που αφορούν τη χημική σύσταση, την κρυσταλλογραφία και την τοπογραφία της επιφάνειας, με μεγεθύνσεις x300,x500, x1000 καιx2000.

4.3.4. Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (EDS, <u>XRayMicroanalysis)</u>

Κατά την εξέταση της μικροδομής στο ηλεκτρονικό ικροσκόπιο σάρωσης πραγματοποιήθηκαν ποσοτικές αναλύσεις από κατάλληλο προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης (EnergyDispersiveSpectoscopy, EDS). Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση συμμετοχής κυρίαρχων χημικών στοιχείων.

4.4. Μέθοδοι Μέτρησης των Μηχανικών Ιδιοτήτων

4.4.1. Δοκιμές Σκληρότητας

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της σκληρότητας των δοκιμίων ήταν η μέθοδος Vickers. Στη μέθοδο αυτή ο διεισδυτής είναι μια αδαμάντινη πυραμίδα, τετραγωνικής βάσης, της οποίας η γωνία κορυφής είναι 136°. Η πυραμίδα αυτή διείσδυε στην επιφάνεια του μελετώμενου δοκιμίου, αφήνοντας ένα αποτύπωμα ρομβοειδούς διατομής. Κατόπιν, γίνονταν οι μετρήσεις των διαγωνίων d₁ και d₂ του αποτυπώματος με κλίμακα, από τις οποίες εξάγονταν ο μέσος όρος d των διαγωνίων και έπειτα με τη βοήθεια κατάλληλου πίνακα μετατροπής του μέσου όρου σε σκληρότητα, προέκυπτε η σκληρότητα του δείγματος. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις μετρήσεις ήταν 98 N (ή 10kg).



Εικόνα 10. Γεωμετρία του ίχνους του διεισδυτή της μεθόδου Vickers.

Η τιμή της σκληρότητας κατά Vickers προκύπτει από τη χρήση του τύπου:

$$HV = 2\eta\mu\left(\frac{136}{2}\right) \cdot \frac{F}{d^2} = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}$$

όπου F είναι το φορτίο εφαρμογής (σε kgf) και d² η επιφάνεια του αποτυπώματος (σε mm²) (d=(d1+d2)/2).



Εικόνα 11.Διεισδυτής Vickers και αποτύπωμα.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων για τη λήψη σκληρομετρήσεων περιλαμβάνει λείανση μέχρι το χαρτί 2000grid, έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτες οι γραμμές λείανσης για σωστή εστίαση του μικροσκοπίου του σκληρομέτρου στην επιφάνεια του δοκιμίου. Επιπλέον, για τη λήψη σωστών μετρήσεων είναι σημαντικό οι επιφάνειες να είναι απολύτως παράλληλες μεταξύ τους, ώστε το δοκίμιο να 'πατάει' καλά.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν σε 56 δοκίμια μετρήσεις σκληρότητας. Για την μείωση σφάλματος ελήφθησαν περίπου 10 μετρήσεις από κάθε δοκίμιο. Για κάθε δεκάδα μετρήσεων υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, που δίνει τα περιθώρια σφάλματος γύρω από τον μέσο όρο. Οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν σε αποστάσεις που απείχαν μεταξύ τους τουλάχιστον 3 φορές το μέγεθος του αποτυπώματος, αλλά και από τα άκρα του δοκιμίου. [19]

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

<u>5.1. Εξέταση της Μικροδομής</u>

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η επίδραση της έλασης σε βαθμούς πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% σε συνδυασμό με διάφορες θερμικές κατεργασίες στη μικροδομή των δοκιμίων ειδικού ορείχαλκου Ecobrass, όπως παρατηρήθηκε στο οπτικό και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Επιπλέον, πραγματοποιείται μια προσπάθεια ταυτοποίησης των φάσεων με τη χρήση των τεχνικών EDS και BackscatteredElectronImaging. Χαρακτηριστική μορφολογία της έλασης, η οποία παρατηρείται σε όλες τις θερμικές κατεργασίες στη μικροδομή των δοκιμίων αυτών, είναι η επιμήκυνση των κόκκων παράλληλα στην διεύθυνση της έλασης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνει ο βαθμός πλαστικής παραμόρφωσης τόσο αυξάνεται και η επιμήκυνση των κόκκων.

5.1.1. Δοκίμιο αναφοράς μετά από θερμική κατεργασία και βαφή

Το δοκίμιο αναφοράς προέκυψε από το έλασμα ειδικού ορείχαλκου Ecobrassμε πλάτος 15mm, πάχος 6mm και μήκος 120mm. Στη συνέχεια, έγινε η κοπή του ελάσματος σε 8 δοκίμια, τα οποία έχουν πάχος 6mm και μήκος περίπου 15mm. Το δοκίμιο αναφοράς εξετάστηκε στο XRD και SEM και έχει υποστεί μόνο ανόπτηση.

Σκοπός του XRD είναι να δώσει τις φάσεις στις οποίες βρίσκεται το κάθε στοιχείο (δηλαδή κάνει ανάλυση φάσεων), ώστε να ταυτοποιηθούν οι φάσεις που παρατηρήθηκαν με το οπτικό μικροσκόπιο. Πρέπει για κάθε φάση να αντιστοιχούν τουλάχιστον τρεις κορυφές για να ισχύει η ταυτοποίηση (εικόνα 10). Οι φάσεις που ταυτοποιήθηκαν είναι η φάση α και η φάση κ. Η φάση α κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα (FCC – Face-Centered Cubic) και η φάση κ

Το δοκίμιο αναφοράς έχει υποστεί θερική κατεργασία (ανόπτηση) στους 540°C για 24 ώρες και στη συνέχεια βαφή σε νερό. Η θερμοκρασία 540°C προέκυψε από τη βιβλιογραφία και είναι η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του εν λόγω κράματος. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η μικροδομή του, όπου απεικονίζεται η χαρακτηριστική διφασική δομή του ορείχαλκου (α και κ φάση).

Χαρακτηριστικές είναι οι δύο φάσεις που σχηματίζονται, η α φάση και η κ φάση. Ορισμένοι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες (1). [Εικ. 15] Οι διδυμίες είναι επίπεδες ατέλειες κατά μήκος των οποίων υπάρχει κατοπτρική συμμετρία, δηλαδή ένα μέρος ενός κρυστάλλου αποτελεί το είδωλο του άλλου μέρους ως προ το επίπεδο διδυμίας. Οι διδυμίες βρίσκονται υπό τη μορφή ταινιών στο εσωτερικό των κόκκων, έχουν σχετικά ευθείες και παράλληλες πλευρές και διαφορετικό τόνο από τις περιοχές μη διδυμίας των κόκκων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανάκλαση του φωτός εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό της κάθε περιοχής του κρυστάλλου. Αν και οι διδυμίες δεν αφορούν μεγάλο μέρος του κρυστάλλου, ωστόσο ο ρόλος τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός στη διαδικασία της πλαστικής παραμόρφωσης των μεταλλικών υλικών.

Οι εικόνες προέκυψαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και παρουσιάζονται οι μικροδομές που προέκυψαν σε δύο διαφορετικές μεγεθύνσεις. Σε όλες τις εικόνες είναι εμφανής ο τύπος της δομής. [20,21]



Εικόνα 12. Διάγραμμα XRD του δοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h. Ταυτοποιήθηκαν κορυφές των φάσεων κ και α.



Εικόνα 13.Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.



Εικόνα 14.Ηλεκτρονική μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.



Εικόνα 15.Ηλεκτρονική μικρογραφία δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.



Εικόνα 16.Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (SEM) της μικροδομήςδοκιμίου αναφοράς μετά από ανόπτηση και βαφή.

5.1.2. Ψυχρά Παραμορφωμένα Δοκίμια

Τα δοκίμια του ορείχαλκου υπέστησαν ψυχρή παραμόρφωση (έλαση) σε ποσοστά από 5% εώς 40%. Στη διπλωματική αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που ελήφθησαν σε δοκίμια με ποσοστά έλασης 5%, 20% και 40%. Το ποσοστό έλασης 40% είναι η μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί να υποστεί στο υλικό Ecobrass, γιατί σε ανώτατα ποστοστά πλαστικής εν ψυχρώ παραμόρφωσης το δοκίμιο αρχίζει να ρηγματώνεται.



Εικόνα 17.Ελάσματα ορείχαλκου Ecobrass. Το δεύτερο έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 540°C.



Εικόνα 18.Δοκίμιο ορείχαλκου που έχει υποστεί ψυχρή παραμόρφωση μεγαλύτερη από 40% και έχει «σπάσει».

5.1.2.1 Δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 5%

Μετά από τη διαδικασία ψυχρής έλασης, ακολουθούν οι θερμικές κατεργασίες. Το δοκίμιο υπέστησε θερμικές κατεργασίες στους 540°Cγια 30min, 6h, 24h και στους 600°Cγια 30 min, 3h, 6h.

Η μικροδομή του ορείχαλκου μετά από θερμική κατεργασία στους 540°C για 30minkaι έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, αποτελείται από ευμεγέθεις, οριζόντιους και ελαφρώς πεπλατισμένους κόκκους, εξαιτίας της ψυχρής παραμόρφωσης. Επιπλέον, παρατηρούμε συσσωματώματα κρυστάλλων και διαπιστώνουμε ότι το δοκίμιό μας αποτελείται από πολλούς κρυστάλλους, δηλαδή είναι πολυκρυσταλλικό. Πολυκρυσταλλικά υλικά ονομάζονται τα στερεά που αποτελούνται από ένα σύνολο μικρών κρυστάλλων ή κόκκων. Το υλικό δεν αποτελείται από ένα συνεχές κρυσταλλικό πλέγμα, δηλαδή δεν είναι μονοκρυσταλλικό, αλλά από πολλούς μικρούς κρυστάλλους, που ο καθένας έχει διαφορετικό προσανατολισμό.

Χαρακτηριστικές είναι οι δύο φάσεις που σχηματίζονται, η α φάση και η κ φάση. Ορισμένοι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες. Οι διδυμίες δημιουργούνται σε εδροκεντρωμένες κυβικες δομές (FCC) και επειδή η α φάση κρυσταλλώνεται στη FCC, γι αυτό εμφανίζονται μόνο στη φάση αυτή και όχι στην κ φάση, η οποία κρυσταλλώνεται στην χωροκεντρομένη κυβική δομή (BCC). Η κ φάση είναι πιο πλούσια σε πυρίτιο απ' ότι η α φάση, όπως παρατηρούμε και παρακάτω από την μικροανάλυση EDS..



Εικόνα 19.Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.



Εικόνα 20. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Κατά την θερμική κατεργασία στους 540°Cγια 6hκαι έλαση με βαθμό παραμόρφωσης 5%, η μικροδομή του δοκιμίου αποτελείται από οριζόντιους, πεπλατυσμένους κόκκους από την έλαση. Όπως και στην παραπάνω θερμική κατεργασία, παρατηρούμε ότι η α φάση παρουσιάζει διδυμίες, καθώς και ότι η α φάση αποτελείται από πολλούς κόκκους, οι οποίοι δημιουργούν συσσωματώματα.

Επιπλέον, διακρίνουμε στα όρια των κόκκων την παρουσία μολύβδου (Pb). Ο μόλυβδος στις εικόνες του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης φαίνεται άσπρος, γιατί είναι «βαρύ» στοιχείο, δηλαδή έχει μεγάλο ατομικό αριθμό, και αυτό σημαίνει ότι έχει υψηλή αντίθεση πεδίου.

Στην εικόνα 21 παρατηρούμε την παρουσία μιας ενδομεταλλικής ένωσης, η οποία αποτελείται από πυρίτιο και σίδηρο (Fe_xSi_y). Οι ενδομεταλλικές ενώσεις, στον συγκεκριμένο ορείχαλκο, δεν ξεπερνούν το 1μm. Η ένδομεταλλική αυτή ένωση σχηματίζεται εντός του κόκκου της κ φάσης και είναι δύο μορφών:

- Τετραγωνικής μορφής [1]
- 2. Σφαιρικής μορφής [2]

Πίνακας 5. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της ενδομεταλλικής ένωσης με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 21, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

	σημείο 1	σημείο 2
Στοιχείο	% к.β.	% к.β.
Si	7.38	7.16
Fe	4.18	4.08
Cu	70.74	70.29
Zn	17.70	18.47
Σύνολο	100.00	100.00

Πίνακας 6. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση των φάσεων α και κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 21, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Eco brass	α φάση	κ φάση		
	σημείο 3		σημείο 4	
Στοιχείο	% к.β.	% ατ.	% κ.β.	% ατ.
Si	2.65	5.84	4.24	9.16
Cu	75.90	73.86	76.17	72.68
Zn	21.45	20.29	19.58	18.16
Σύνολο	100.00		100.00	



Εικόνα 21. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.



Εικόνα 22.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.



Εικόνα 23.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Όπως και στις προηγούμενες θερμικές, η μικροδομή που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% αποτελείται από κόκκους ελαφρώς επιμηκυσμένους από τη διαδικασία ψυχρής παραμόρφωσης, μερικοί από τους οποίους έχουν διδυμίες. Παρατηρούμε, επίσης, ότι με τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, δεν διακρίνουμε μεγάλες αντιθέσεις πεδίου, γιατί οι συστάσεις των φάσεών του ορείχαλκου Ecobrass είναι παρόμοιες. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι οι κόκκοι της κ φάσης φαίνονται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο με διαφορετική φωτεινότητα, γιατί οι κόκκοι έχουν διαφορετικό προσανατολισμό.



Εικόνα 24.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

Κατά τη θερμική κατεργασία του ορείχαλκου Ecobrass στους 600°C για 30min με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, δεν παρατηρείται καμία σημαντική αλλαγή από τη μικροδομή που παρατηρήθηκε και για τις θερμικές κατεργασίες στους 540°C, εκτός από την ύπαρξη περισσότερων διδυμιών στους κόκκους της α φάσης. Διαπιστώνουμε, επίσης, ότι δημιουργούνται ζώνες με διαφορετικό μέγεθος κόκκου, άλλες με μικρότερο μέγεθος και άλλες με μεγαλύτερο.



Εικόνα 25.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30 min.



Εικόνα 26.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30 min.

Όπως και στην προηγούμενη θερμική, η μικροδομή που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h και για 6hμε βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% αποτελείται από κόκκους πεπλατυσμένους από τη διαδικασία ψυχρής παραμόρφωσης και διαπιστώνουμε ότι οι περισσότεροι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες. Επιπλέον, παρατηρούμε στην εικόνα 29 ότι η κ φάση είναι πιο λεία, ενώ η α φάση παρουσιάζει ανάγλυφο και ότι η κ φάση είναι πιο χαμηλά (βαθιά) από την α φάση, το οποίο σημαίνει ότι η κ φάση προσβάλλεται πιο εύκολα.



Εικόνα 27.Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.



Εικόνα 28.Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.



Εικόνα 29. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.



Εικόνα 30.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.



Εικόνα 31.Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.



Εικόνα 32.Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.

5.1.2.2. Δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 20%

Μετά από τη διαδικασία ψυχρής έλασης, ακολουθούν οι θερμικές κατεργασίες. Το δοκίμιο υπέστησε θερμικές κατεργασίες στους 540° C για 30 min, 6h, 24h και στους 600° C για 30 min, 3h, 6h.

Η μικροδομή του ορείχαλκου μετά από θερμική κατεργασία στους 540°C για 30minκαι έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20%, αποτελείται από ευμεγέθεις, οριζόντιους και πεπλατισμένους κόκκους, εξαιτίας της ψυχρής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι α φάση παρουσιάζει διδυμίες. Διαπιστώνουμε, επίσης, μια ανακατανομή των κόκκων και αρκετά συσσωματώματα. Τέλος, παρατηρούμε ότι στο δοκίμιό μας υπάρχουν επίπεδα ολίσθησης, γιατί μάλλον δεν έχει υποστεί ακόμα ανακρυστάλλωση [Εικόνα 34]. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει υποστεί παραμόρφωση και όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση, τόσο περισσότερα και τα επίπεδα ολίσθησης.



Εικόνα 33. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.



Εικόνα 34. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.



Εικόνα 35. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.



Εικόνα 36. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Όπως και στην προηγούμενη θερμική, η μικροδομή που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία στους 540° C για 6h και για 24h με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% αποτελείται από κόκκους επιμηκυσμένους από την έλαση και διαπιστώνουμε ότι οι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες.Στην εικόνα 39, παρατηρούμε ότι η κ φάση εμφανίζεται ανάμεσα στου κόκκους της α φάσης και φαίνεται σαν διδυμία στην α φάση. Επιπλέον, στην εικόνα 42 βλέπουμε ενδομεταλλικές ενώσεις(Fe_xSi_y), οι οποίες δεν ξεπερνούν το 1μm.



Εικόνα 37. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.


Εικόνα 38. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.



Εικόνα 39. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Πίνακας 7. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση των φάσεων α και κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 39, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.

Eco brass	κ φάση		α φάση	
	σημείο 1	σημείο 2		
Στοιχείο	% к.β.	% ατ.	% κ.β.	% ατ.
Si	4.56	9.80	2.40	5.31
Cu	74.58	70.92	75.10	73.34
Zn	20.86	19.28	22.50	21.35
Σύνολο	100.00		100.00	



Εικόνα 40. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.



Εικόνα 41. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.



Εικόνα 42. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

Πίνακας 8. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της ενδομεταλλικής ένωσης με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 42, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

	σημείο 1	σημείο 2
Στοιχείο	% к.β.	% к.β.
Si	13.63	9.85
Fe	10.95	9.41
Cu	59.56	64.73
Zn	15.86	16.01
Σύνολο	100.00	100.00

Κατά τη θερμική κατεργασία του ορείχαλκου Ecobrass στους 600°C για 30min με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20%, η μικροδομή αποτελείται από κόκκους πεπλατυσμένους από τη διαδικασία ψυχρής παραμόρφωσης και διαπιστώνουμε ότι οι περισσότεροι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες. Διαπιστώνουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και με την αύξηση της παραμονής του δοκιμίου στην ίδια θερμοκρασία, το δοκίμιο ανακρυσταλώθηκε. Έτσι, σε συνδυασμό με την πλαστική παραμόρφωση, παρατηρείται η δημιουργία νέων μικρότερων κόκκων.



Εικόνα 43. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30min.



Εικόνα 44. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30min.

Όπως και στην προηγούμενη θερμική, η μικροδομή που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h και για 24hμε βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% αποτελείται από κόκκους πεπλατυσμένους από τη διαδικασία ψυχρής παραμόρφωσης και διαπιστώνουμε ότι οι περισσότεροι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες. Παρατηρούμε ενδομεταλλικές ενώσεις (εικόνα 47). Διαπιστώνουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και με την αύξηση της παραμονής του δοκιμίου στην ίδια θερμοκρασία, οι κόκκοι έχουν την τάση να γίνονται πιο ισοαξονικοί.



Εικόνα 45. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.



Εικόνα 46. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.



Εικόνα 47. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.

Πίνακας 9. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της ενδομεταλλικής ένωσης με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 47, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.

	σημείο 1	
Στοιχείο	% к.β.	%ατ.
Si	5.17	11.01
Fe	1.77	1.89
Cu	73.82	69.49
Zn	19.23	17.60
Σύνολο	100.00	



Εικόνα 48. Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h.



Εικόνα 49. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h.



Εικόνα 50. Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h.

Πίνακας 10. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση των φάσεων α και κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 50, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 24h.

Eco brass	κ φάση		α φάση	
	σημείο 1		σημείο 2	
Στοιχείο	% к.β.	% ατ.	% κ.β.	% ατ.
Si	4.37	9.43	2.98	6.54
Cu	76.65	73.00	75.85	73.52
Zn	18.98	17.57	21.17	19.94
Σύνολο	100.00		100.00	

5.1.2.3. Δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 40%

Μετά από τη διαδικασία ψυχρής έλασης, ακολουθούν οι θερμικές κατεργασίες. Το δοκίμιο υπέστησε θερμικές κατεργασίες στους 540°C για 30 min, 6h, 24h και στους 600°C για 30 min, 3h, 6h.

Η μικροδομή του ορείχαλκου μετά από θερμική κατεργασία στους 540°C για 30minkaι έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40%, αποτελείται από ευμεγέθεις, οριζόντιους και πεπλατισμένους κόκκους, εξαιτίας της ψυχρής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της έλασης, τόσο αυξάνονται οι διδυμίες στους κόκκους της α φάσης. Διαπιστώνουμε, επίσης, ότι ο υπάρχουν ζώνες κόκκων, σε άλλες περιοχές λιγότεροι κόκκοι αλλά μεγαλύτεροι και σε άλλες περιοχές περιοσότεροι κόκκοι αλλά μικρότεροι.



Εικόνα 51.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 30 min.

Όπως και στην προηγούμενη θερμική, η μικροδομή που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h και για 24h με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% αποτελείται από κόκκους επιμηκυσμένους από την έλαση και διαπιστώνουμε ότι οι κόκκοι της α φάσης παρουσιάζουν διδυμίες. Παρατηρούμε, ακόμη, την ύπαρξη μολύβδου στα όρια των κόκκων του δοκιμίου. Ο μόλυβδος σχηματίζεται μόνο στα όρια των κόκκων, γιατί δεν μπορεί να ενωθεί με τις υπόλοιπες φάσεις.



Εικόνα 52.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 6h.



Εικόνα 53.Ηλεκτρονική μικρογραφία (SEI) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 540°C για 24h.

Στην θερμική κατεργασία στους 600°C για 30 min, για 3h και για 6h με ποσοστό παραμόρφωσης 40%, η μικροδομή που προκύπτει είναι οριζόντιοι και πεπλατυσμένοι κόκκοι, οι οποίοι δημιουργούν πολλα συσσωματώματα. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και με την αύξηση της παραμονής του δοκιμίου στην ίδια θερμοκρασία, οι κόκκοι έχουν την τάση να γίνονται πιο ισοαζονικοί. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνονται και οι διδυμίες στους κόκκους της α φάσης.

Πίνακας 11. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της φάσης κ με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 55, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.

Eco brass	φάση κ				
	σημείο 1		σημείο 2		
Στοιχείο	%κ.β.	%ατ.	%κ.β.	%ατ.	
Si	5.10	10.90	4.56	9.81	
Cu	75.88	71.65	75.97	72.21	
Zn	19.02	17.46	19.47	17.98	
Σύνολο	100.00		100.00		

Πίνακας 12. Σημειακή στοιχειακή ανάλυση της φάσης α με EDS, στην ηλεκτρονική μικρογραφία σάρωσης της εικόνας 55, για τον ειδικό ορείχαλκο Ecobrass μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.

Eco brass	φάση α				
	σημείο 3		σημείο 4		
Στοιχείο	%κ.β.	%ατ.	%κ.β.	%ατ.	
Si	2.78	6.10	3.01	6.60	
Cu	75.46	73.34	74.82	72.52	
Zn	21.76	20.56	22.17	20.88	
Σύνολο	100.00		100.00		



Εικόνα 54.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 30 min.



Εικόνα 55.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.



Εικόνα 56.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.



Εικόνα 57.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 3h.



Εικόνα 58.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.



Εικόνα 59.Ηλεκτρονική μικρογραφία (BES) της μικροδομής μετά από έλαση με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% και θερμική κατεργασία στους 600°C για 6h.

5.2. Μηχανικές Ιδιότητες

Δοκιμές σκληρομέτρησης τύπου Vickers εκτελέσθηκαν σε όλα τα δοκίμια ορείχαλκου Ecobrass με βαθμούς ψυχρής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και θερμικές κατεργασίες στους 540°C και 600°C. Καθώς και στα δοκίμια που υπέστησαν μόνο πλαστική παραμόρφωση, χωρίς θερμικές κατεργασίες, τα οποία αποτελούν και τα δοκίμια αναφοράς για τις δύο ομάδες δοκιμίων που υπέστησαν θερμικές κατεργασίες μετά τη ψυχρή έλαση, αντίστοιχα.

5.2.1. Θερμικές κατεργασίες στους 540°C

Αρχικά μετρήθηκαν οι σκληρότητες των δοκιμίων με παραμορφώσεις 5%, 20% και 40%. Το δοκίμιο ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5% έχει σκληρότητα 188HV, η οποία αποτελεί και την υψηλότερη τιμή σκληρότητας σε σύγκριση με τις τιμές που μετρήθηκαν στα δοκίμια που είχαν υποστεί διάφορες

θερμικές κατεργασίες, μετά την έλαση. Το δοκίμιο ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% έχει σκληρότητα 264 HV, η οποία αποτελεί και την υψηλότερη τιμή σκληρότητας σε σύγκριση με τις τιμές που μετρήθηκαν στα δοκίμια που είχαν υποστεί διάφορες θερμικές κατεργασίες, μετά την έλαση. Ο πίνακας 13 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από σκληρομέτρησης (μέσες τιμές και τυπικές αποκίσεις) στους ορείχαλκους με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες. Επιπλέον, στο διάγραμμα της εικόνας 60απεικονίζονται γραφικά τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων του πίνακα σε συνάρτηση με τον χρόνο των αντίστοιχων θερμικών κατεργασιών.

Πίνακας 13. Αποτελέσματα δοκιμών σκληρότητας στον ορείχαλκο Ecobrass με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες στους 540°C.

Eco brass	540°C				
	Χωρίς Θ.Κ.	30min	бh	24h	
παραμόρφσωση 5%	188 ± 12	152 ± 9	165 ± 7	152 ± 10	
παραμόρφωση 20%	209 ± 9	174 ± 6	168 ± 7	160 ± 4	
παραμόρφωση 40%	264 ± 12	171 ± 3	150 ± 7	149 ± 5	



Εικόνα 60. Διάγραμμα σκληρότητας (HV) συναρτήσει του χρόνου (h) για τον ορείχαλκο Ecobrass με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40%, σε θερμοκρασία 540°C.

Οι καμπύλες των θερμικών κατεργασιών στους 540°C έχουν παρόμοια μορφή, όπως παρατηρείται από την εικόνα 60. Και στις τρεις θερμικές κατεργασίες για το δοκίμιο με ποσοστό παραμόρφωσης 5%, η τιμή της σκληρότητας πέφτει ραγδαία όσο παραμένει σε αυτή τη θερμοκρασία, δηλαδήπαρατηρούμε χαμηλότερες τιμές για μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας.Το ίδιο παρατηρούμε ότι συμβαίνει και με τα δοκίμια με παραμόρφωση 20% και 40%. Η χαμηλότερη τιμή της σκληρότητας, 149HV, παρατηρείται για την θερμική κατεργασία, που πραγματοποιήθηκε στους 540°C για 24h. Γενικότερα, από το διάγραμμα της εικόνας 60 συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα παραμονής των δοκιμίων στους 540°C, τόσο μειώνεται η σκληρότητα. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι όσο αυξάνεται η πλαστική παραμόρφωση των δοκιμίων, τόσο μεγαλώνει η σκληρότητα. Όμως, όσο μεγαλύτερη παραμόρφωση έχει το δοκίμιο, τόσο ταχύτερα μειώνεται η σκληρότητά του κατα την αύξηση της παραμονής του στην ίδια θερμοκρασία.

<u>5.2.2. Θερμικές κατεργασίες στους 600°C</u>

Τα δοκίμια του ορείχαλκου Ecobrassυπέστησαν θερμική κατεργασία στους 600°C, για χρόνους 30 min, 3h, 6h και 24h. Στη συνέχεια μετρήθηκαν οι σκληρότητες των δοκιμίων με ποσοστό ψυχρής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40%. Το δοκίμιο ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 40% έχει σκληρότητα 264HV, η οποία αποτελεί και την υψηλότερη τιμή σκληρότητας σε σύγκριση με τις τιμές που μετρήθηκαν στα δοκίμιο ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης θερμικές κατεργασίες, μετά την έλαση. Το δοκίμιο ορείχαλκου με βαθμό αποτελεί και την υψηλότερη τιμή σκληρότητας σε σύγκριση τιμή σκληρότητα 20% έχει σκληρότητα 20% δοκίμιο ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 20% έχει σκληρότητα 20% και 40%.

Πίνακας 14. Αποτελέσματα δοκιμών σκληρότητας στον ορείχαλκο Ecobrassμε βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες.

Eco brass					
	Χωρίς Θ.Κ.	30min	3h	бh	24h
παραμόρφωση 5%	188 ± 12	149 ± 6	170 ± 11	144 ± 4	$\mathbf{\mathbf{X}}$
παραμόρφωση 20%	209 ± 9	163 ± 4	\searrow	159 ± 4	152 ± 4
παραμόρφωση 40%	264 ± 12	164 ± 6	146 ± 4	142 ± 5	\ge

Στον πίνακα 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές σκληρότητας στα δοκίμιαορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, 20% και 40% και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες και στο διάγραμμα της εικόνας 60 απεικονίζονται γραφικά τα αποτελέσματα αυτά σε συνάρτηση με τον χρόνο των αντίστοιχων

θερμικών κατεργασιών. Η μέγιστη τιμή, όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι αυτή που έχει το δοκίμιο πριν τις θερμικές κατεργασίες με ποσοστό παραμόρφωσης 40% και είναι 264HV, σε αντίθεση με τη τιμή που λαμβάνεται με βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης 5%, που αφορά την κατάσταση αναφοράς. Η ελάχιστη τιμή είναι 142HV,η οποία λαμβάνεται κατά τη θερμική στους 600°C για 6h, όπως και για το βαθμό παραμόρφωσης 5% και 20%.



Εικόνα 61. Διάγραμμα σκληρότητας (HVN) συναρτήσει του χρόνου (h) για τα δοκίμια ορείχαλκου με βαθμό πλαστικής παραμόρφωση 5%, 20% και 40%, σε θερμοκρασία 600°C.

Από το διάγραμμα της εικόνας 61γίνεται φανερό ότι οι χαμηλότερες τιμές σκληρότητας λαμβάνονται κατά τις θερμικές στους 600°C. Οι καμπύλες των θερμικών κατεργασιών στους 600°C έχουν παρόμοια μορφή, όπως παρατηρείται από την εικόνα 61. Επιπλέον, ο ρυθμός μείωσης της σκληρότητας και για τις τρεις ομάδες των θερμικών κατεργασιών είναι μικρός. Αυτό ισχύει για το δοκίμιο ορείχαλκου με παραμόρφωση 5%, 20%, καθώς και για το δοκίμιο με παραμόρφωση 40%.Οι καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή και συγκεκριμένα με αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται μια σημαντική σταδιακή πτώση της σκληρότητας, δηλ. οι καμπύλες βισυμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται το χρονικό διάστημα παραμονής των δοκιμίων στους 600°C, τόσο μειώνεται η σκληρότητα, αν και όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο ο ρυθμός μείωσης της σκληρότητας μειώνεται. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι όσο αυξάνεται η πλαστική παραμόρφωση των δοκιμίων, τόσο μεγαλώνει η σκληρότητα. Όμως, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τα δοκίμια με ποσοστό παραμόρφωσης 5%, 20% και 40%, παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές σκληρότητας. Αυτό σημαίνει ότι παρ' όλο που όταν αυξάνουμε τον βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης αυξάνεται και η σκληρότητα, όταν γίνονται οι θερμικές κατεργασίες τα δοκίμια έχουν παρόμοιες σκληρότητες (≈144 HV) πα ρόλο που έχουν τόσο μεγάλη διαφορά στο βαθμό παραμόρφωσης.

6.0. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το δοκίμιο ειδικού ορείχαλκου Ecobrass, παρουσιάζει δύο φάσεις, την α φάση και την κ φάση, όπως παρατηρήσαμε με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).
- Παρατηρούμε την ύπαρξη μιας ενδομεταλλικής ένωσης (Fe_xSi_y) στην κ φάση, η οποία όμως δεν ξεπερνάει σε μέγεθος το 1μm. [22]
- Με την αύξηση του βαθμού ψυχρής παραμόρφωσης (έλαση), διαπιστώνουμε ότι οι κόκκοι του υλικού μας επιμηκύνονται, δηλαδή είναι πιο πεπλατισμένοι.
- Οι τιμές της σκληρότητας για κάθε θερμική κατεργασία και δεδομένο χρόνο μειώνονται με αύξηση του βαθμού πλαστικής παραμόρφωσης εν ψυχρώ.
- Οι μέγιστες τιμές σκληρότητας λαμβάνονται πριν τις θερμικές κατεργασίες των δοκιμίων, δηλαδή στα δοκίμια αναφοράς που έχουν υποστεί μόνο πλασική παραμόρφωση. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο βαθμός ψυχρής παραμόρφωσης, αυξάνεται και η σκληρότητα των δοκιμίων, πριν τις θερμικές κατεργασίες.
- Το δοκίμιο με παραμόρφωση 5% έχει μικρότερη σκληρότητα πριν τις θερμικές κατεργασίες, σε αντίθεση με το δοκίμιο με παραμόρφωση 40%, το οποίο παρουσιέζει τη μέγιστη σκληρότητα πριν τις θερμικές, ενώ μετά τις θερμικές κατεργασίες εμφανίζει μικρότερο αριθμό σκληρότητας από το δοκίμιο με βαθμό παραμόρφωσης 5%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] : Kharakwal, J.S. and L.K. Gurjar. "Zinc and Brass in Archaeological Perspective". Ancient Asia Journal of the Society of South Asian Archaelogy.
- [2] : Pollard, Mark and Carl Heron. Archaeological Chemistry. RSC Publishing (1996).
- [3] : Callcut, Vin. Brief Early History of Brass.
- [4] : Copper Development Association. Brass, URL: <u>www.copperinfo.co.uk</u>
- [5]: Copper Applications in Metallurgy of Copper & Copper Alloys, By Vin Callcut
- [6] :METAL TECHNIQUES FOR CRAFTSMEN, OPPI UNTRACHT, DOU.BLEDAY 8 Company, Inc, GARDEN CITY NEW YORK
- [7] : <u>www.brass.org</u>
- [8] : Cast Copper Alloy Sleeve Bearings, Non Ferrous Founder's Society, Copper Development Association
- [9] : CPD 'Brass in focus', magazine "engineering designer", May/June 2004
- [10] : X Miettinen J (2007). Thermodynamic description of the Cu-Si-Zn system in the copper-rich corner, Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 31, 422-427
- [11] : M. Kowalski, P.J. Spencer, J. Phase Equilib. 14 (1993) 432-438
- [12]: Cast Copper Alloy Sleeve Bearings, Non Ferrous Founder's Society, Copper Development Association
- [13]: Wieland-Werke AG, <u>www.wieland.de</u>
- [14]: Peters DT. New bismuth/selenium red brass alloys solve lead concerns. Mod Cast 1997;87:57–9.
- [15]:Michels HT. Replacing lead in brass plumbing castings. Adv Mater Process January 2002:75–7.
- [16]: Whiting LV, Sahoo M, Newcombe PD, Zavadil R, Peters DT. Detailed analysis of mechanical properties of SeBiLOYs I and II. AFS Trans 1999;182:343–51.
- [17]: T. Magnin, A. Chambreuil, and B. Bayle, Acta Mater. 44, 1457 (1996).
- [18]: B. Joseph, Embrittlement of Copper by Liquid Bismuth: Kinetic Study and Mechanism, Thesis, University Paris-XI, Orsay, France, 16 October 1998.

- [19]: ASM Metals Handbook, Desk Edition, ASM International, 2001, από την ηλεκτρονική διεύθυνση: <u>www.asminternational.org</u>.
- [20]: Φούρλαρης, Γ.: Μετασχηματισμοί Φάσεων, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006
- [21]: Παπαδημητρίου, Γ. Δ. : Γενική Μεταλλογνωσία Ι, ΕΜΠ, Αθήνα, 1989
- [22]: D.P. Field, L.T. Bradford, M.M. Nowell, and T.M. Lillo, The Role of Annealing Twins During Recrystallization of Cu, Acta. Matter., 2007