

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

ΑΠΟ ΧΑΛΚΟ

υπό

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΙΔΑΓΓΕΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2010

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

ΑΠΟ ΧΑΛΚΟ

υπό

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΔΙΔΑΓΓΕΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2010



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

Αριθ. Εισ.: 8303/1
Ημερ. Εισ.: 26-03-2010
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2010
ΔΙΔ

© 2010 Αθανάσιος Διδάγγελος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός , Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Κερμανίδης Αλέξανδρος
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Βαξεβανίδης Νικόλαος
Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Δρ. Μεταλλουργό Μηχανικό κ. Χασιώτη Νικόλαο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Κερμανίδη Αλέξανδρο και Βαξεβανίδη Νικόλαο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Γιώτα και Θωμά για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Θάνος Διδάγγελος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΚΟ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΔΙΔΑΓΓΕΛΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Δ. Χασιώτης, Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός ΕΜΠ

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασία εκπονήθηκε συστηματική μελέτη της επίδρασης της διάβρωσης στην τοπογραφία τωρνευμένων επιφανειών του κράματος χαλκού/κασσίτερου CuSn12. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης του υπό μελέτη υλικού σε θαλασσινό νερό σύμφωνα με την προδιαγραφή G44-94 κατά ASTM για έξι διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό διάλυμα (μέχρι 90 ημέρες). Με βάση τη σύγκριση της απώλειας μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό μέσο που καταμετρήθηκε στο εργαστήριο, κατέστη δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της για διάφορες πειραματικές συνθήκες. Για την κατανόηση των μηχανισμών που συμβάλλουν στην παρατηρούμενη υποβάθμιση της τοπογραφίας, διεξήχθη εκτενής στερεοσκοπική μελέτη καθώς και μελέτη προφίλομετρίας των επιφανειών του διαβρωμένου υλικού. Αρχικά παρατηρήθηκε διάβρωση κυρίως τοπικά στο κέντρο των δοκιμίων, ενώ κατά το μήκος των δοκιμίων με την πάροδο του χρόνου έκθεσης εντοπίστηκαν περιοχές με εντονότερη και άλλες με λιγότερο έντονη διάβρωση. Επιπλέον, η ανάλυση προφίλομετρίας των επιφανειών έδειξε ότι οι κυριότερες χαρακτηριστικές παράμετροι της τοπογραφίας (τραχύτητα, κυμάτωση) των διαβρωμένων δοκιμίων του κράματος χαλκού/κασσίτερου μετά το πέρας των πειραμάτων διάβρωσης, παρουσιάζουν σημαντική υποβάθμιση υποστηρίζοντας σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στερεοσκοπική ανάλυση τους.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	.....
1.1	Κίνητρο και Υπόβαθρο	.....
1.2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	..... 2
1.3	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	..... 3
Κεφάλαιο 2	Χαλκός και Κράματα Χαλκού	..... 5
2.1	Γενικά	.....
2.2	Κύριες κατηγορίες κραμάτων χαλκού	.....
	2.2.1. Κράματα Cu-Zn	.....
	2.2.2. Κράματα Cu-Sn	.....
Κεφάλαιο 3	Διάβρωση	..... 15
3.1	Γενικά	..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης
3.2	Περιβάλλοντα και Επιπτώσεις διάβρωσης	.....
	3.2.1. Κόστος	.....
	3.2.2. Ασφάλεια	.....
	3.2.3. Απώλειες ενέργειας και φυσικών πόρων	.....
3.3	Μορφές διάβρωσης και μέθοδοι προστασίας	.....
	3.3.1. Διάβρωση με βελονισμούς	.....
	3.3.2. Γαλβανική διάβρωση	.....
	3.3.3. Διάβρωση σε σχισμές ή χαραγές	.....
	3.3.4. Περικρυσταλλική διάβρωση	.....
	3.3.5. Εκλεκτική προσβολή	.....
	3.3.6. Τύποι διάβρωσης που επηρεάζονται από μηχανικούς παράγοντες	.....
	3.3.7. Θερμογαλβανική διάβρωση	.....
	3.3.8. Βιολογική ή μικροβιολογική διάβρωση	.....
	3.3.9. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής	.....
3.4	Προϊόντα διάβρωσης κραμάτων χαλκού	.....

Κεφάλαιο 4 Ποιότητα Κατεργασμένης Επιφάνειας	.....
4.1 Γενικά	.....
4.2 Κατεργασίες αφαίρεσης υλικού - Τόρνευση	.....
4.2.1. Τόρνευση	.....
4.2.2. Κοπή τόρνευσης	.....
4.2.3. Συνθήκες που επικρατούν κατά την κατεργασία της τόρνευσης	.....
4.3 Τραχύτητα επιφάνειας	.....
4.4 Μέτρηση Τραχύτητας επιφάνειας (Προφίλομετρία)	.....
Κεφάλαιο 5 Πειραματική μεθοδολογία	.....
5.1 Εισαγωγή	.....
5.2 Μέθοδοι και υλικά	.....
5.2.1. Υλικό	.....
5.2.2. Προετοιμασία δοκιμίων	.....
5.3 Πειράματα διάβρωσης	.....
5.3.1. Διάβρωση σε σχισμές	.....
5.3.2. Πειραματική διάταξη	.....
5.3.3. Πειραματική διαδικασία	.....
5.3.4. Αποτίμηση του βαθμού διάβρωσης	.....
Κεφάλαιο 6 Πειραματικά Αποτελέσματα	.....
Κεφάλαιο 7 Ανάλυση αποτελεσμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης	.....
7.1 Εισαγωγή	.....
7.2 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω της απώλειας βάρους	.....
7.3 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω του ρυθμού διάβρωσης	.....
7.4 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω της στερεοσκοπίας	.....
7.5 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω της προφίλομετρίας	.....
Κεφάλαιο 8 Σύνοψη Συμπερασμάτων	.....
Κεφάλαιο 9 Θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση	.....
Βιβλιογραφία	.....

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Ονοματολογία κραμάτων χαλκού, κατά την τυποποίηση CDA.....	XX
Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά οξειδίων και υδροξειδίων του χαλκού.....	XX
Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά των κυριότερων χλωριδίων του χαλκού.....	XX
Πίνακας 4-1: Βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι αντίστοιχες εργαλειομηχανές κοπής.....	XX
Πίνακας 4-2: Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας κατά DIN 4760.....	XX
Πίνακας 4-3: Τυποποίηση της ποιότητας μιας κατεργασμένης επιφάνειας ως προς το μέγιστο βάθος τραχύτητας κατά την προδιαγραφή (DIN 3141/1960 και DIN 150 1302).....	XX
Πίνακας 5-1: Τυποποιήσεις κράματος CuSn12 σε εθνικό και διεθνές επίπεδο.....	XX
Πίνακας 5-2: Χημική σύσταση δοκιμών CuSn12 (κατά βάρος %) με βάση τις χημικές αναλύσεις (X.A) και τις αντίστοιχες προδιαγραφές πιστοποίησης.....	XX
Πίνακας 5-3: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών CuSn12 με βάση τον προμηθευτή και τις αντίστοιχες προδιαγραφές πιστοποίησης.....	XX
Πίνακας 5-4: Συνθήκες κατεργασίας τόνρευσης των τεσσάρων ληφθέντων επιφανειών.....	XX
Πίνακας 5-5: Πίνακας ταξινόμησης των δοκιμών κράματος χαλκού/κασσίτερου για τα πειράματα διάβρωσης.....	XX
Πίνακας 7-1: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας δοκιμών πρώτης σειράς	XX
Πίνακας 7-2: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας δοκιμών δεύτερης σειράς	XX
Πίνακας 7-3: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας δοκιμών τρίτης σειράς.....	XX
Πίνακας 7-4: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας δοκιμών τέταρτης σειράς	XX
Πίνακας 7-5: Απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας των διαβρωμένων δοκιμών.....	XX
Πίνακας 7-6: Χαρακτηρισμός των τρημάτων διάβρωσης ανά σειρά πειραματικών συνθηκών των δοκιμών για το κράμα CuSn12.....	XX

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Πυρομεταλλουργική παραγωγή αργού χαλκού από θειούχα χαλκομεταλλεύματα με ακαριαία τήξη σε κάμινο Outokumpu.	XX
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Zn.	XX
Σχήμα 2-3: α) Μικροφωτογραφία ορείχαλκου (67% Cu-33% Zn), φάσης α, μετά από έλαση και ανόπτηση, β) Μικροφωτογραφία χυτού ορείχαλκου (60% Cu-40% Zn), φάσης α+β', όπου η φάση είναι η ανοιχτόχρωμη (κίτρινη) και η β' η σκουρόχρωμη (μαύρη).	XX
Σχήμα 2-4: Μεταβολή (α) θερμικής αγωγιμότητας και ηλεκτρικής αντίστασης (β) αντοχής σε εφελκυσμό καλωδίων μονοφασικών ορειχάλκων, συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο.	XX
Σχήμα 2-5: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Sn.	XX
Σχήμα 2-6: α) Μικροφωτογραφία χυτού μπρούντζου (90% Cu-10% Sn), δενδριτικής και ετερογενούς φάσης α, β) Μικροφωτογραφία μπρούντζου (68% Cu-32% Sn), φάσης α+δ, όπου η φάση α είναι δενδριτική και ετερογενής.	XX
Σχήμα 3-1: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Zn.	XX
Σχήμα 3-2: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Zn.	XX
Σχήμα 3-1: α) Τοπική διάβρωση ενός κράματος 2195 Al-Li μετά ποτενσιομετρική εμφύσηση σε 3.5 % NaCl. β) Διάβρωση με βελονισμούς.	XX
Σχήμα 3-2: Διάβρωση σε σχισμές α) αριστερά, μιας φλάντζας ανοξείδωτου χάλυβα και β) δεξιά, ο αντίστοιχος μηχανισμός.	XX
Σχήμα 3-3: Αυτοφύης χαλκός (Cu) σε παραγένεση με κυπρίτη (Cu ₂ O) σε καθαρή τομή (αριστερά) και μετά από οξείδωση (δεξιά).	XX
Σχήμα 3-4: Υψηλής ευκρίνειας μικροφωτογραφίες SEM από σχηματισθέντα φιλμ α) τενορίτη+κυπρίτη και β) κυπρίτη σε συνθήκες εργαστηρίου.	XX
Σχήμα 3-5: Διάγραμμα σταθερότητας για το σύστημα Cu - H ₂ O σε θερμοκρασία 25°C.	XX
Σχήμα 4-1: Κάθετη τομή μιας κατεργασμένης με κοπή μεταλλικής επιφάνειας.	XX
Σχήμα 4-2: Κατηγορίες αποκλίσεων μιας κατεργασμένης επιφάνειας από την αντίστοιχη ονομαστική.	XX
Σχήμα 4-3: Φραιζάρισμα, Πλάνιση, Λείανση, Τόρνευση, Διάτρηση και οι αντίστοιχες Εργαλειομηχανές κοπής.	XX
Σχήμα 4-4: Μορφές αποβλήτου σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού.	XX
Σχήμα 4-5: Ψευδόκοψη.	XX
Σχήμα 4-6: Κατηγορίες κατεργασίας τόρνευσης.	XX

Σχήμα 4-7:Κινηματική τórνευσης.	XX
Σχήμα 4-8: Είδη εσωτερικής και εξωτερικής τórνευσης.	XX
Σχήμα 4-9: Μηχανικά μέρη τórνου.	XX
Σχήμα 4-10:Κατηγορίες κατεργασίας τórνευσης	XX
Σχήμα 4-11: Χαρακτηριστικά στοιχεία της τραχύτητας επιφάνειας κατά το σύστημα M (κεντρικής γραμμής).	XX
Σχήμα 4-12: Υπολογισμός της τραχύτητας R_a	XX
Σχήμα 4-13: Σχηματική απεικόνιση των R_p , R_t και R_v	XX
Σχήμα 4-14: Τρεις χαρακτηριστικές επιφάνειες με διαφορετικές τιμές λοξότητας R_{sk}	XX
Σχήμα 4-15: Τρεις χαρακτηριστικές επιφάνειες με διαφορετικές τιμές κύρτωσης R_{ku}	XX
Σχήμα 5-1: Τυπική μικροδομή του χυτού κράματος CuSn12 σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM.	XX
Σχήμα 5-2: Διάταξη κοπής και διαστάσεις δοκιμών διάβρωσης.	XX
Σχήμα 5-3: Πειραματική διάταξη.	XX
Σχήμα 6-1: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας μη διαβρωμένων δοκιμών της σειράς 1.	XX
Σχήμα 6-2: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 1 μετά από 15 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-3: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 1 μετά από 30 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-4: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 1 μετά από 45 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-5: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 1 μετά από 60 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-6: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 1 μετά από 75 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-7: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 1 μετά από 90 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-8: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας μη διαβρωμένων δοκιμών της σειράς 2.	XX
Σχήμα 6-9: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 2 μετά από 15 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX
Σχήμα 6-10: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμών της σειράς 2 μετά από 30 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.	XX

Σχήμα 6-28: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 90 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον	XX
Σχήμα 7-1: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων πρώτης πειραματικής σειράς.....	XX
Σχήμα 7-2: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων δεύτερης πειραματικής σειράς.....	XX
Σχήμα 7-3: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων τρίτης πειραματικής σειράς.....	XX
Σχήμα 7-4: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων τέταρτης πειραματικής σειράς	XX
Σχήμα 7-5: Μεταβολή της απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων ανά πειραματική σειρά	XX
Σχήμα 7-6: Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης των δοκιμίων ανά πειραματική σειρά.....	XX
Σχήμα 7-7: Μακροσκοπική άποψη της επιφάνειας τυπικών δοκιμίων CuSn12 μετά από έκθεση σε υδατικό περιβάλλον NaCl (3.5%) για συγκεκριμένες συνθήκες.....	XX
Σχήμα 7-8: Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά.....	XX
Σχήμα 7-9: Μεταβολή του μέγιστου ύψους Rt των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά	XX
Σχήμα 7-10: Μεταβολή της μέσης απόστασης RSm των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά.....	XX
Σχήμα 7-11: Μεταβολή της μέσης αριθμητικής κυμάτωσης Wa των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά.....	XX
Σχήμα 7-12: Μεταβολή της λοξότητας Rsk των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά	XX
Σχήμα 7-13: Μεταβολή της κύρτωσης Rku των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά	XX

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

«Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της διπλωματικής εργασίας, παρατίθεται μια περιληπτική ανασκόπηση της σχετικής με την εργασία βιβλιογραφίας και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της διπλωματικής εργασίας.»

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Είναι γεγονός ότι μερικά κράματα του χαλκού, όπως π.χ ο μπρούντζος ήταν τόσο γνωστά από την αρχαιότητα, ώστε στις μέρες μας να χρησιμεύουν ακόμα και για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων ιστορικών εποχών της ανθρώπινης εξέλιξης (εποχή του μπρούντζου 1000-3000 π.χ). Τα αντικείμενα από τα κράματα αυτά, καθόλη τη διάρκεια των αιώνων αποτέλεσαν πολύτιμα αριστουργήματα τέχνης. Πρόσφατα σύγχρονοι ερευνητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι ήδη από την εποχή του Ηράκλειτου (στα «περί θεαμάτων»), ο μπρούντζος ήταν σπάνιο και υψηλής αξίας «μέταλλο/κρατέρωμα» και για αυτό ο Ηράκλειτος πήρε την απόφαση να χρηματοδοτήσει τον Περσικό πόλεμο με την χώνευση μπρούντζινων αγαλμάτων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν πειράματα επιταχυνόμενης διάβρωσης του κράματος χαλκού/κασσίτερου/κασσίτερου CuSn12 με την τεχνική των εναλλακτικών εμβαπτίσεων. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων θα ληφθούν συμπεράσματα για τον τρόπο και τον ρυθμό διάβρωσης του κράματος

χαλκού/κασσίτερου/κασσίτερου CuSn12 σε θαλάσσιο περιβάλλον, τον μηχανισμό ανάπτυξης της και την επίδραση σε σχέση με τα διάφορα είδη των τورνευμένων επιφανειών.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Αν και πολλοί ερευνητές μέχρι σήμερα έχουν ασχοληθεί διεξοδικά με το φαινόμενο της διάβρωσης των κραμάτων του χαλκού και τους μηχανισμούς δημιουργίας του, ωστόσο ελάχιστες εργασίες έχουν ασχοληθεί με την θαλάσσια διάβρωση τورνευμένων επιφανειών μπρούντζου CuSn12 και τις άμεσες συνέπειες της.

Η περιορισμένη αυτή βιβλιογραφία που είναι σχετική με την μελέτη της διάβρωσης μπρούντζου CuSn12 σε θαλασσινό νερό, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται εργασίες που ασχολούνται με την διάβρωση αρχαίων αντικειμένων (π.χ.[1], [2], [3], [4] και [5]). και η οποία είναι και η εκτενέστερη. Στην δεύτερη κατηγορία, εντάσσονται εργασίες που μελετούν την διάβρωση κραμάτων Cu-Sn σε επιταχυνόμενα τεχνητές αλκαλικές συνθήκες στο εργαστήριο (π.χ.[6], [7], [8] και [9]). Τα αποτελέσματα των εργασιών αυτών υποδεικνύουν την ανάπτυξη δύο τύπων διαβρωμένης επιφάνειας ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες.

Σύμφωνα με τον πρώτο μηχανισμό, η ανάπτυξη του διαβρωμένου φιλμ προχωρά προς το εσωτερικό του κράματος και σε αυτό το αρχικό στάδιο ελέγχεται από την μετακίνηση αρνητικών οπών προς τα έξω (π.χ μετακίνηση ιόντων οξυγόνου προς τα μέσα) και ταυτόχρονο σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης πλούσιων σε Sn. Στον αντίποδα, οι διαβρωμένοι μηχανισμοί του τύπου II χαρακτηρίζονται από πολύ πιο έντονη οξείδωση του κράματος Cu-Sn (έντονα τοπική ή μη), που οφείλεται στη διαβρωτικότητα των χλωριόντων του θαλάσσιου περιβάλλοντος ή στην ύπαρξη στο κράμα, στις συνθήκες ή στη γεωμετρία των μεταλλικών επιφανειών. Στην περίπτωση διαβρωμένης επιφάνειας, αρχικά η επιφάνεια διαλύεται έντονα, με ταυτόχρονη σταθεροποίηση των ενώσεων του Sn ενώ στην συνέχεια

παρατηρείται μείωση του ρυθμού διάβρωσης λόγω της αύξησης των προϊόντων διάβρωσης του χαλκού.

1.3 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε δύο βασικές ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια (2 -4) και (5-9), αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του χαλκού, οι κατηγορίες των κραμάτων του ως προς την ονοματολογία τους ενώ στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται λεπτομερής αναφορά στα δύο βασικότερα κράματα του με προσθήκη Zn και Sn, τους ορείχαλκους και τους μπρούντζους, αντίστοιχα

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μία εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της διάβρωσης και ειδικότερα στην μελέτη του φαινομένου και στις μεθόδους προστασίας όσο αφορά τα κράματα του χαλκού.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται συνοπτική αναφορά στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με έμφαση στην τόννευση όπως αυτή μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι βασικότερες κατηγορίες αφαίρεσης υλικού, η τόννευση μεταλλικών επιφανειών καθώς επίσης και οι συνθήκες που επικρατούν κατά την κοπή αυτή. Στο δεύτερο μέρος του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας μιας επιφάνειας και οι αντίστοιχες μέθοδοι και παράμετροι μέτρησης της στο εργαστήριο.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται το υλικό μελέτης, η μεθοδολογία και οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Σκοπός του Κεφαλαίου 5 είναι να παρουσιάσει τις πειραματικές σειρές που διεξήχθησαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης της διάβρωσης στην τοπογραφία της επιφάνειας κράματος

χαλκού/κασσίτερου/κασσίτερου CuSn12 καθώς και την αποτίμηση της διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα εργασία βάσει της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 7 αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές στα διαβρωμένα δοκίμια του κράματος χαλκού/κασσίτερου/κασσίτερου CuSn12. Το κεφάλαιο χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους υποκεφάλαια. Το πρώτο αφορά την αποτίμηση της διάβρωσης μέσω της απώλειας βάρους σε δοκίμια τα οποία είχαν υποβληθεί σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό. Το δεύτερο αφορά την εκτίμηση της προηγηθείσας διάβρωσης βάσει του ρυθμού διάβρωσης, στο τρίτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής μελέτης των διαβρωμένων υλικών, ενώ στο τέταρτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τραχυμέτρησης

Τέλος, σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στα Κεφάλαιο 8 και 9, αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2 Χαλκός και Κράματα Χαλκού

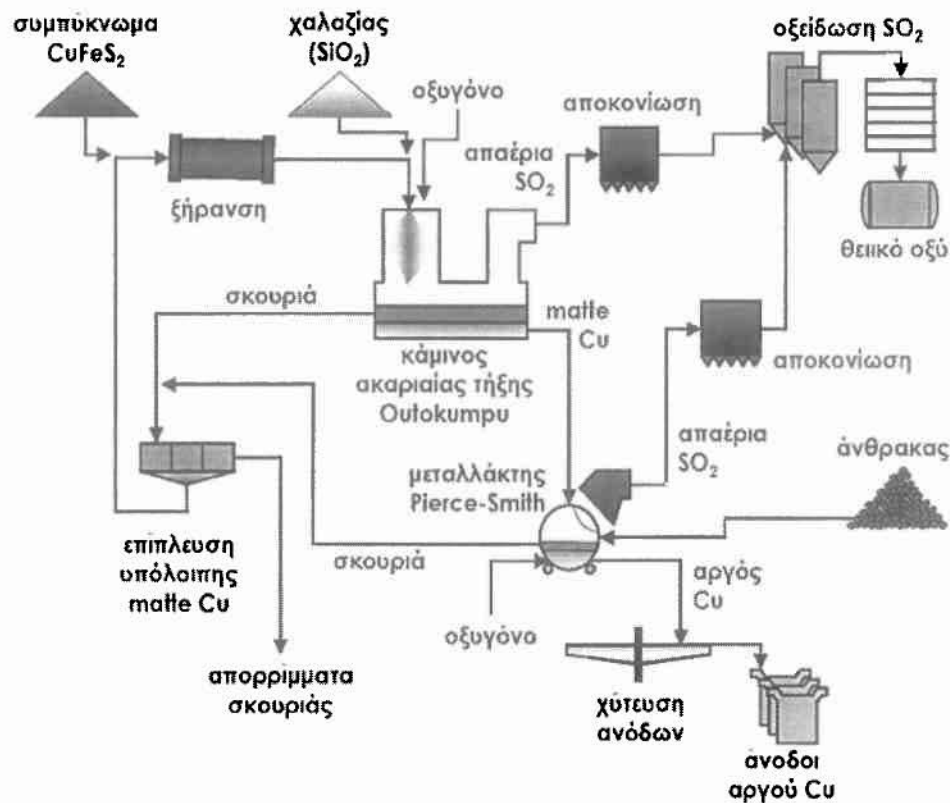
«Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος από το τέλος της νεολιθικής εποχής. Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά του χαλκού, οι κατηγορίες των κραμάτων του ως προς την ονοματολογία τους ενώ στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται λεπτομερής αναφορά στα δύο βασικότερα κράματα του με προσθήκη Zn και Sn, τους ορείχαλκους και τους μπρούντζους, αντίστοιχα.»

2.1 Γενικά

Ο χαλκός είναι το πρώτο μέταλλο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος από το τέλος της νεολιθικής εποχής και μάλιστα μια ολόκληρη περίοδος του πολιτισμού, η οποία ονομάζεται εποχή του χαλκού. Το σύμβολο προέρχεται από το λατινικό *Cuprum*, Ρωμαϊκό όνομα της Κύπρου που φημιζόταν για τα ορυχεία χαλκού. Ο χαλκός βρίσκεται αυτοφυής στη φύση, καθώς και με τη μορφή διάφορων μεταλλευμάτων του. Λαμβάνεται, κυρίως από τα θειούχα ορυκτά του, από τα οποία τα σημαντικότερα είναι ο χαλκοπυρίτης (CuFeS_2), ο χαλκοσίνης (CuS) κ.ά. και τα οξυγονούχα, τα οποία είναι λιγότερα διαδεδομένα στη φύση, όπως είναι ο κυπρίτης (Cu_2O), ο μαλαχίτης $[\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2]$, ο αζουρίτης $[\text{Cu}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2]$ κ.α. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση του μετάλλου βρίσκεται στη λιθόσφαιρα, περίπου 70 mg/kg, ενώ οι τιμές του για το φλοιό της γης κυμαίνονται μεταξύ 24 και 55 mg/kg.

Ο χαλκός λαμβάνεται από τα ορυκτά μεταλλεύματά του με διάφορες μεθόδους, ανάλογα με το ορυκτό και την περιεκτικότητά του σε χαλκό. Από τα θειούχα μεταλλεύματα λαμβάνεται με δύο μεθόδους. Στην πρώτη με κατάλληλες διαδικασίες και τελικά με

θέρμανση στην κάμινο Outokumpu διαχωρίζεται κυρίως, από το οξείδιο και λαμβάνεται ακατέργαστος χαλκός (Σχήμα 2-1). Στη δεύτερη γίνεται κατεργασία με οξύ και από διάλυμα του παραγόμενου θειικού χαλκού λαμβάνεται με αναγωγή. Ο χαλκός, ο οποίος λαμβάνεται και στις δύο περιπτώσεις δεν είναι καθαρός και γι' αυτό υποβάλλεται σε καθαρισμό, είτε με οξείδωση των προσμίξεων σε φλογοβόλο κάμινο, είτε με ηλεκτρόλυση, οπότε λαμβάνεται ο καθαρός χαλκός.



Σχήμα 2-1: Πυρομεταλλουργική παραγωγή αργού χαλκού από θειούχα χαλκομεταλλεύματα με ακαριαία τήξη σε κάμινο Outokumpu

Στις μέρες μας, ο χαλκός χρησιμοποιείται και στην καθαρή του μορφή 99,99% και σε μορφή κραμάτων, κυρίως με Ψευδάργυρο (Zn), Κασσίτερο (Sn), Αργίλιο (Al), Νικέλιο (Ni)

και Φώσφορο (P). Ο χαλκός έχει χρώμα κιτρινέρυθρο, ειδικό βάρος 8,83 - 8,94 g/cm³, σκληρότητα 3 της κλίμακας Mohs, τήκεται στους 1.084ο C και βράζει στους 2.310ο C. Είναι πολύ ελατός και όλκιμος και κατεργάζεται εύκολα με σφυρηλασία εν ψυχρώ. Παρουσιάζει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και θαυμάσια θερμική αγωγιμότητα, γι' αυτό και η μισή παγκόσμια παραγωγή του Cu χρησιμοποιείται για την κατασκευή αγωγών, μετασχηματιστών, γεννητριών, ηλεκτρικών εξαρτημάτων κ.λ.π. Επίσης, παρουσιάζει πολύ βραδεία οξειδωση και διάβρωση στον ατμοσφαιρικό αέρα και στη θάλασσα, με αποτέλεσμα να έχει εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα της ναυπηγικής. Ο χαλκός, ενώ είναι πολύ μαλακός και όλκιμος, βελτιώνει πολύ τις μηχανικές του ιδιότητες μετά από μηχανικές και θερμικές κατεργασίες. Ωστόσο, δε χυτεύεται καλά και γι' αυτό για την κατασκευή χυτών αντικειμένων χρησιμοποιούνται τα κράματά του.

2.2 Κύριες κατηγορίες κραμάτων χαλκού

Ο χαλκός και τα κράματα του διακρίνονται βάση της χημικής σύνθεσης ως προς τα μετέχοντα κραματικά στοιχεία. Οι κύριες κατηγορίες τους είναι [10]:

- τα κράματα Cu-Zn, τα οποία ονομάζονται *ορείχαλκοι*
- τα κράματα Cu-Sn, τα οποία ονομάζονται *μπρούντζοι*
- το κράμα Cu-Al, το οποίο ονομάζεται *χαλκοαλουμίνιο*
- το κράμα Cu-Ni, το οποίο ονομάζεται *χαλκονικέλιο*
- τα κράματα Cu-Zn-Ni, τα οποία ονομάζονται *Maillechorts*
- το κράμα Cu-Be, το οποίο ονομάζεται *χαλκοβηρύλλιο*
- το κράμα Cu-Si, το οποίο ονομάζεται *χαλκοπυρίτιο*

Ως προς την μέθοδο μορφοποίησης, τα κράματα χαλκού διακρίνονται σε: κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Λόγω του μεγάλου πλήθους των κραμάτων του χαλκού καθ' όλη την διάρκεια εφαρμογής τους από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, τόσο η

τυποποίηση τους όσο και η αντίστοιχη ονοματολογία δεν έχουν πλήρως αποσαφηνιστεί σε παγκόσμιο επίπεδο [11]. Έτσι, για την τυποποίηση των κραμάτων χαλκού, ο αμερικάνικος οργανισμός CDA (Copper Development Association), χρησιμοποιεί το λατινικό γράμμα C, ακολουθούμενο από τρεις αριθμούς, εκ των οποίων ο πρώτος και κυριότερος αναφέρεται στην κατηγορία του κράματος (τα κύρια στοιχεία που μετέχουν σε αυτό), ενώ οι δύο επόμενοι (XX) σε υποκατηγορίες του κράματος (Πίνακας 2-1).

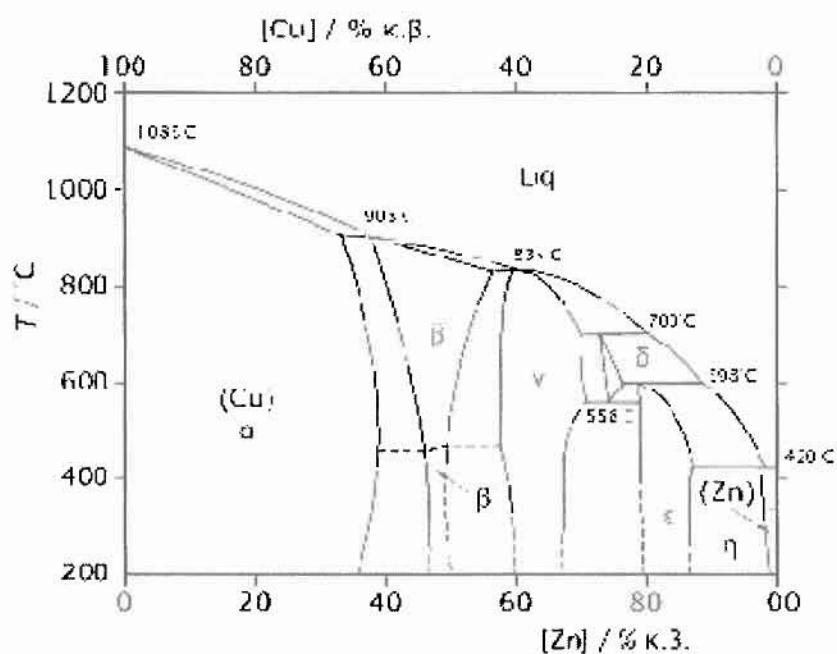
Κωδικός	Κατηγορία
A. Κράματα διαμόρφωσης	
C1XXXX	Καθαρός χαλκός (min 99.3% Cu) και κράματα χαλκού με 96-99.3% Cu
C2XXXX	Κράματα Cu-Zn (ορείχαλκοι)
C3XXXX	Κράματα Cu-Zn-Pb (ορείχαλκοι με μόλυβδο)
C4XXXX	Κράματα Cu-Zn-Sn (ορείχαλκοι με κασσίτερο)
C5XXXX	Κράματα Cu-Sn (μπρούντζοι με φώσφορο)
C6XXXX	Κράματα Cu-Al (χαλκοαλουμίνιο) και κράματα Cu-Si (χαλκοπυρίτιο)
C7XXXX	Κράματα Cu-Ni (χαλκονικέλιο) και κράματα Cu-Zn-Ni (Maillechorts)
B. Κράματα χύτευσης	
C8XXXX	Χυτός χαλκός, κράματα χαλκού με μικρά ποσοστά προσθηκών, ορείχαλκοι διαφόρων τύπων, μπρούντζοι με Mn και κράματα Cu-Zn-Si
C9XXXX	Χυτά κράματα Cu-Sn, Cu-Sn-Pb, Cu-Sn-Ni, Cu-Al-Fe, Cu-Ni-Fe, Cu-Ni-Zn

Πίνακας 2-1: Ονοματολογία κραμάτων χαλκού, κατά την τυποποίηση CDA

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα δύο κυριότερα είδη κραμάτων χαλκού (ορείχαλκοι και μπρούντζοι) ως προς τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά τους (μικροδομή, μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στη διάβρωση κ.α) [11].

2.2.1 Κράματα Cu-Zn

Οι ορείχαλκοι αποτελούν κράματα Cu-Zn, στα οποία το ποσοστό του ψευδαργύρου, στην πράξη δεν υπερβαίνει το 45 %, ωστόσο θεωρητικά μπορεί να φθάσει και το 68%. Στο σχήμα 2-2, παρουσιάζεται το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Cu-Zn.

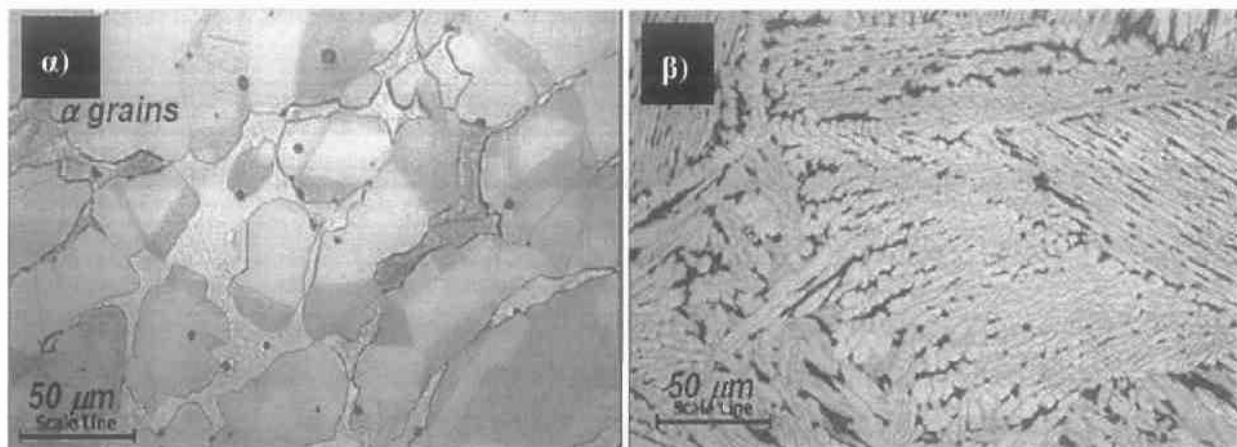


Σχήμα 2-2: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Zn.

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

Για ποσοστά ψευδαργύρου 46-51% και θερμοκρασία υψηλότερη των 454°C, σχηματίζεται η φάση β, του κυβικού χωροκεντρωμένου συστήματος, η οποία 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 είναι εξαιρετικά εύθραυστη.

Πρακτική χρησιμότητα έχουν δύο είδη ορείχαλκου: μονοφασικός ορείχαλκος φάσης α (με 5-39% Zn) και διφασικός α+β' (με 40-45% Zn), (Σχήμα 2-3) [12]. Ορείχαλκοι αμιγούς φάσης β και διφασικοί β+γ δεν βρίσκουν εφαρμογές, λόγω της ευθραυστότητάς τους.

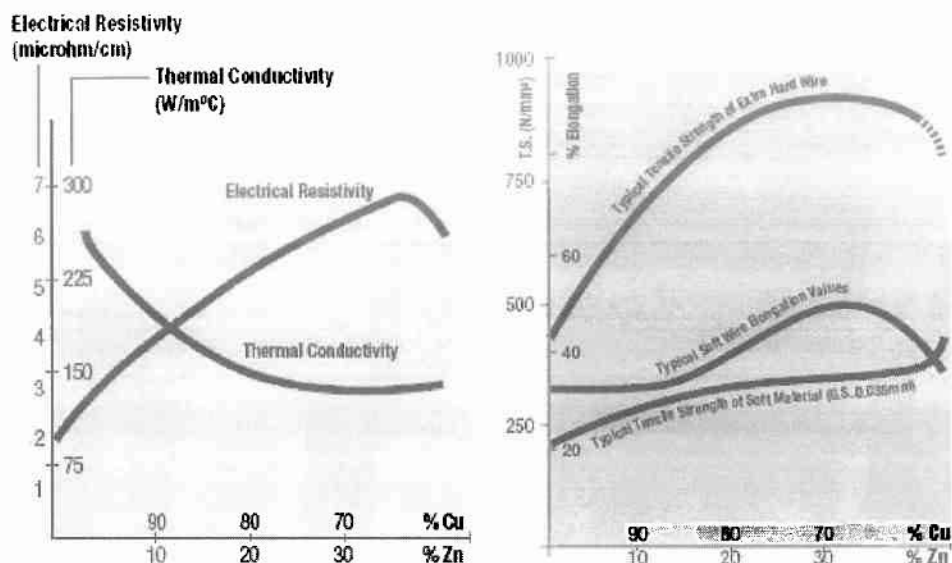


Σχήμα 2-3: α) Μικροφωτογραφία ορείχαλκου (67% Cu-33% Zn), φάσης α, μετά από έλαση και ανόπτηση, β) Μικροφωτογραφία χυτού ορείχαλκου (60% Cu-40% Zn), φάσης α+β', όπου η φάση είναι η ανοιχτόχρωμη (κίτρινη) και η β' η σκουρόχρωμη (μαύρη)

Γενικά, οι ιδιότητες των ορείχαλκων μεταβάλλονται κατά συνεχή τρόπο, με την αύξηση της περιεκτικότητας του Zn. Αυξανόμενου του ποσοστού σε Zn, το χρώμα των ορειχάλκων μετατρέπεται από κόκκινο σε κίτρινο (σχήμα 2-3 α και β), ενώ η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα ελαττώνεται, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για ηλεκτρικές εφαρμογές (Σχήμα 2-4α). Ομοίως, η θερμική τους αγωγιμότητα μειώνεται αυξανόμενου του ποσοστού σε Zn, αλλά σε πολύ μικρό βαθμό.

α)

β)



Σχήμα 2-4: Μεταβολή (α) θερμικής αγωγιμότητας και ηλεκτρικής αντίστασης (β) αντοχής σε εφελκυσμό καλωδίων μονοφασικών ορειχάλκων, συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο [12].

Στο Σχήμα 2-4β, παρουσιάζεται η μεταβολή της αντοχής καλωδίων μονοφασικών ορειχάλκων, συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στον ορείχαλκο που περιέχει 30%Zn. Το κράμα αυτό εμφανίζει επίσης άριστη συμπεριφορά κατά την κοίλανση. Επίσης, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Zn, αυξάνεται η σκληρότητα και η ολκιμότητα, για ορείχαλκο με περιεκτικότητα σε Zn μέχρι 28-30%. Με περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας σε ψευδάργυρο, η σκληρότητα ελαττώνεται ενώ η ολκιμότητα συνεχίζεται αυξανόμενη.

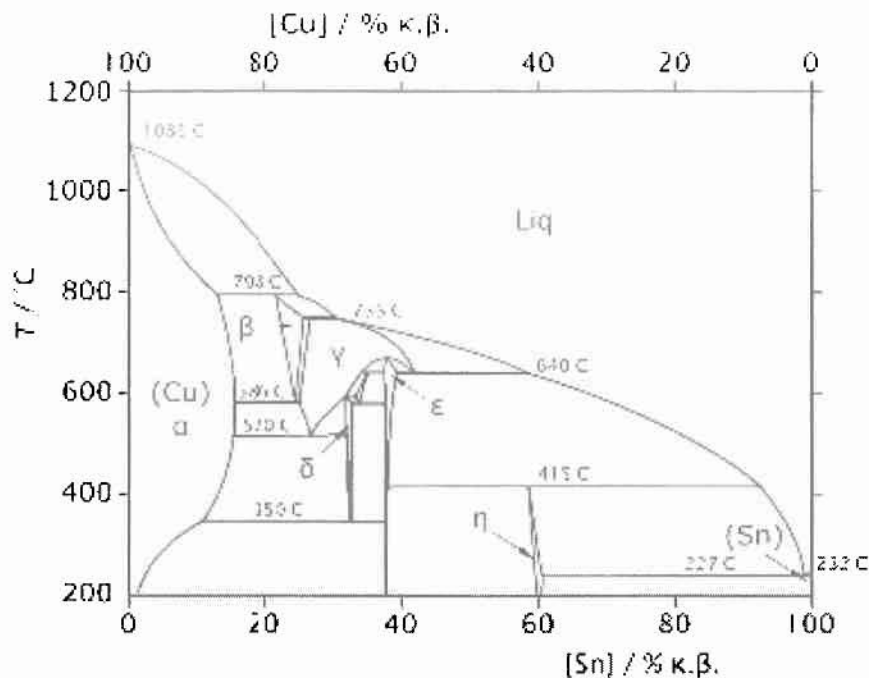
Οι α-ορείχαλκοι διαμορφώνονται εύκολα εν ψυχρώ και δυσκολότερα εν θερμώ. Οι ορείχαλκοι α+β, διαμορφώνονται εύκολα εν θερμώ (700-750°C), διότι σε υψηλές θερμοκρασίες η εύθραυστη φάση β', μετασχηματίζεται στην όλκιμη φάση β. Γενικά, η μορφοποίηση των μονοφασικών ορειχάλκων γίνεται εν ψυχρώ, με ενδιάμεσες ανοπτήσεις, ενώ των διφασικών γίνεται εν θερμώ.

Γενικά, οι ορείχαλκοι παρουσιάζουν αντοχή σε 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%Al). Επιπλέον η αντιδιαβρωτική προστασία τους επιτυγχάνεται με την δημιουργία προστατευτικών ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων από Ni, Cr ή Au.

Οι ορείχαλκοι που περιέχουν ψευδάργυρο 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 συνθήκες περιβάλλοντος. Οι τάσεις αυτές μπορούν να προέρχονται είτε από εξωτερική καταπόνηση, είτε από ενδοτράχυνση του κράματος. Η διάβρωση είναι ταχύτερη στην περίπτωση αμμωνιακής ατμόσφαιρας ή ατμόσφαιρας αλάτων υδραργύρου. Ονομάζεται και εποχιακή ρωγμάτωση, διότι παρατηρείται σε εποχές μεγάλης υγρασίας. Η εργοδιάβρωση αντιμετωπίζεται εάν ο ορείχαλκος μετά την διαμόρφωσή του ανοιχθεί σε θερμοκρασία 275°C, για 0.5 h, ώστε να ελαττωθούν οι εσωτερικές τάσεις από ενδοτράχυνση, χωρίς ταυτόχρονη μείωση της σκληρότητας του κράματος.

2.2.2 Κράματα Cu-Sn

Από τη μελέτη του διμερούς διαγράμματος ισορροπίας των φάσεων του συστήματος Cu-Sn (Σχήμα 2-5), προκύπτει ότι για ποσοστά μικρότερα του 13.5% σε Sn υπάρχει μόνο η φάση α, μετά από στερεοποίηση. Για μεγαλύτερα ποσοστά σε κασσίτερο, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, εμφανίζεται η φάση β που μετατρέπεται σε φάση γ και, εν συνεχεία σε φάση δ. Ο μετασχηματισμός της δ σε φάση ε και η κατακρήμνιση της ε, στη μάζα της φάσης α, δεν πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 350°C, διότι οι ταχύτητες των μετασχηματισμών είναι πολύ μικρές.

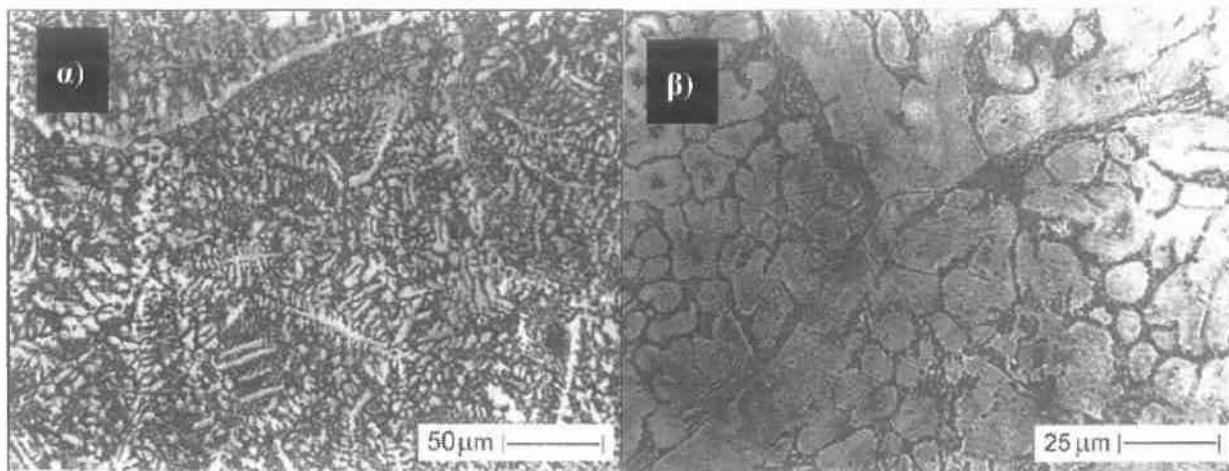


Σχήμα 2-5: Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του διμερούς συστήματος Cu-Sn.

Στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα κράματα Cu-Sn είναι μονοφασικά, φάσης α, για περιεκτικότητα Sn μικρότερη του 10% και διφασικά, φάσεων α+δ, για περιεκτικότητες Sn μεγαλύτερες του 10% (Σχήμα 2-6) [12]. Συνήθως η περιεκτικότητα του κασσίτερου δεν υπερβαίνει το 16%. Οι μπρούντζοι, συχνά, εμπεριέχουν φώσφορο P, σε ποσοστό μικρότερο του 0.1%, το οποίο δεσμεύει οξυγόνο, κατά την χύτευσή τους.

Τα φωσφοριούχα κράματα διαμόρφωσης Cu-Sn, που περιέχουν 1.25-10% Sn, είναι μονοφασικά και μπορούν να σκληρυνθούν με ενδοτράχυνση. Παρουσιάζουν καλύτερη μηχανική αντοχή και αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση από τα κράματα Cu-Zn, ωστόσο είναι ακριβότερα, διότι ο Sn στοιχίζει πιο ακριβά από τον Zn. Όταν η περιεκτικότητα του Sn υπερβαίνει το 10%, τα κράματα Cu-Sn είναι αδύνατο να μορφοποιηθούν με πλαστική παραμόρφωση, λόγω της παρουσίας της σκληρής και εύθραυστης φάσης δ. Τέτοια κράματα

με Sn έως 16%, παρασκευάζονται με χύτευση, η οποία διευκολύνεται από την καλή τους εύροια, η οποία διατηρείται ακόμη και παρουσία προσθηκών Zn και Pb.



Σχήμα 2-6: α) Μικροφωτογραφία χυτού μπρούντζου (90% Cu-10% Sn), δενδριτικής και ετερογενούς φάσης α, β) Μικροφωτογραφία μπρούντζου (68% Cu-32% Sn), φάσης α+δ, όπου η φάση α είναι δενδριτική και ετερογενής.

Μπρούντζοι με προσθήκες ψευδαργύρου και μολύβδου χρησιμοποιούνται σε υδραυλικές εργασίες, λόγω των καλών μηχανικών τους ιδιοτήτων, της αντοχής τους σε τριβή και φθορά και της καλής αντοχής τους σε διάβρωση.

Κεφάλαιο 3 Διάβρωση

«Με τον όρο διάβρωση, χαρακτηρίζεται η καταστροφή και η εν γένει φθορά ενός υλικού που προκύπτει σαν αποτέλεσμα της επίδρασης του περιβάλλοντος εντός του οποίου χρησιμοποιείται. Στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της διάβρωσης και ειδικότερα στην μελέτη του φαινομένου και στις μεθόδους προστασίας όσο αφορά τα κράματα του χαλκού. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι κατηγορίες της διάβρωσης, η διάβρωση σε υδατικά περιβάλλοντα ενώ ακολουθεί αναφορά στην διαβρωτική συμπεριφορά του χαλκού και των κραμάτων αυτού».

3.1 Γενικά

Ο ακριβής ορισμός της έννοιας της διάβρωσης δεν είναι εύκολο να διατυπωθεί παρά το γεγονός ότι έχουν γίνει πολλές προσπάθειες [13]. Η περιεκτικότερη διατύπωση είναι πιθανότατα η παρακάτω [14]:

«Με τον όρο "διάβρωση" χαρακτηρίζεται η καταστροφή και η εν γένει φθορά ενός υλικού που προκύπτει σαν αποτέλεσμα της επίδρασης του περιβάλλοντος εντός του οποίου χρησιμοποιείται.. Περιγράφεται από την αντίδραση ενός ορισμένου υλικού με το περιβάλλον του η οποία προκαλεί μια μετρήσιμη μεταβολή στο υλικό αυτό. Η μεταβολή αυτή μπορεί να υποβαθμίσει τη λειτουργία ενός εξαρτήματος ή ενός ολόκληρου συστήματος από το συγκεκριμένο υλικό. Η φύση της μεταβολής μπορεί να είναι ηλεκτροχημική, χημική ή φυσική».

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω ορισμό η διάβρωση δεν περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη ομάδα υλικών. Παρόλα αυτά το φαινόμενο παρατηρείται πολύ πιο έντονα στα

μεταλλικά υλικά, γι' αυτό και ο όρος χρησιμοποιείται περισσότερο στην πράξη στη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή η μετρήσιμη μεταβολή που αναφέρει ο ορισμός συνίσταται συνήθως σε απώλεια μάζας του μετάλλου ή στην αντίδρασή του με άλλα στοιχεία του περιβάλλοντος που μπορούν να οδηγήσουν στη μετατροπή του σε άλλου είδους υλικά. Και στις δύο περιπτώσεις το φαινόμενο είναι ανεπιθύμητο καθώς το κύριο αποτέλεσμα του είναι η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής από το συγκεκριμένο υλικό. Στην πρώτη περίπτωση αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απώλεια μάζας οδηγεί σε μείωση της ενεργού διατομής ορισμένων ή όλων των μελών της κατασκευής. Αντίθετα στη δεύτερη περίπτωση, ενώ δεν υπάρχει απώλεια μάζας, τα προϊόντα που προκύπτουν από τη χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα έχουν πολύ μικρότερη μηχανική αντοχή από το αρχικό μέταλλο.

Η διάβρωση μπορεί να χωριστεί σε κατηγορίες με πολλούς διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε σε κάθε περίπτωση. Τρία είναι όμως τα πιο συνηθισμένα [15]:

1. Η φυσική κατάσταση του διαβρωτικού μέσου: Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε σε υγρή και ξηρή διάβρωση. Η υγρή διάβρωση προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιας υγρής φάσης (π.χ. θαλασσινού νερού, ατμοσφαιρικής υγρασίας, βιολογικών υγρών κλπ) προκειμένου να προχωρήσει. Αντίθετα στην ξηρή διάβρωση το διαβρωτικό μέσο είναι θερμά αέρια, όπως π.χ. τα καυσαέρια οχημάτων. Η ξηρή διάβρωση συχνά ονομάζεται και οξείδωση όταν το διαβρωτικό μέσο είναι οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας.

2. Ο μηχανισμός της διάβρωσης από χημικής άποψης: Με βάση το κριτήριο αυτό διακρίνουμε την ηλεκτροχημική διάβρωση που εξελίσσεται μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, οπότε οι διάφορες φάσεις που εμπλέκονται στο φαινόμενο μπορεί να μην είναι σε άμεση, αλλά μόνο σε ηλεκτρική επαφή και τη χημική διάβρωση όπου οι χημικές δράσεις

δεν είναι ηλεκτροχημικής φύσεως και η άμεση επαφή των διαφόρων φάσεων είναι απαραίτητη προϋπόθεση.

3. Η μορφολογία της φάσης που διαβρώνεται: Στην περίπτωση αυτή η διάβρωση διακρίνεται σε ομοιόμορφη, οπότε ολόκληρη η επιφάνεια που εκτίθεται στο διαβρωτικό περιβάλλον διαβρώνεται με τον ίδιο τρόπο και τον ίδιο ρυθμό και σε τοπική, οπότε η διάβρωση προχωρεί σε ορισμένες μόνο περιοχές της εκτεθειμένης επιφάνειας (π.χ. διάβρωση τρυπανισμών, περικρυσταλλική κλπ), ενώ το μεγαλύτερο μέρος της δεν επηρεάζεται.

Από τα προηγούμενα βέβαια είναι προφανές ότι ένα υλικό μπορεί να ενταχθεί ως προς την διάβρωση του ταυτόχρονα σε περισσότερες από μια διαφορετικές κατηγορίες. Στην παρούσα εργασία η διάβρωση διακρίνεται με βάση τη φυσική κατάσταση του διαβρωτικού μέσου, οπότε η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται σε υγρή και ξηρή διάβρωση. Επίσης με δεδομένο το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας, η ανάλυση αυτή ασχολείται κυρίως με το χαλκό και τα κράματα του.

3.2 Περιβάλλοντα και Επιπτώσεις διάβρωσης

Δυστυχώς, σχεδόν όλα τα περιβάλλοντα προκαλούν διάβρωση: ο αέρας, η υγρασία, το νερό, το θαλασσίνο νερό, ο ατμός, τα καυσαέρια, τα αέρια Cl_2 , H_2S , S_2 , SO_2 , η αμμωνία, τα οξέα, το αλκοόλ, οι τροφές κ.λ.π [16].

Έτσι, τα κυριότερα είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος διακρίνονται σε:

a. Ατμοσφαιρικός αέρας (ξηρός ή υγρός, καθαρός ή ρυπασμένος): Ο ατμοσφαιρικός αέρας διακρίνεται ανάλογα με την σύσταση του σε βιομηχανικό, θαλάσσιο και αγροτικό. Η διαβρωτική του δράση κυρίως οφείλεται στην ύπαρξη σε αυτόν οξυγόνου και υγρασίας και ενισχύεται επίσης με την παρουσία ρυπαντικών αερίων και αμμωνίας (SO_2 , NO_x , H_2S , NH_3).

β. Έδαφος (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπαρισμένο) : Το έδαφος είναι διαλυτικό στο νερό και περιέχει μεγάλο αριθμό διαλυμένων σωμάτων. Επομένως η διαβρωτική δράση του εδάφους οφείλεται στην υγρασία, την οξύτητα, στα διαλυμένα άλατα, στους μικροοργανισμούς, στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του και είναι πιο έντονη στις συνθήκες όπου έχουμε τριεπιφάνειες (έδαφος -μέταλλο-υγρός αέρας).

γ. Γλυκό νερό: Η διαβρωτική δράση του νερού εξαρτάται κυρίως από το διαλυμένο οξυγόνο μέσα σε αυτό, τα διαλυμένα άλατα και αέρια, τους μικροοργανισμούς, τα διαλυμένα ή απλώς αιωρούμενα σωματίδια.

δ. Θαλασσινό νερό: Η διαβρωτική δράση του θαλασσινού νερού οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα αλάτων, στο διαλυμένο σε αυτό οξυγόνο αλλά και στην ύπαρξη μικροοργανισμών που είτε παράγουν με το μεταβολισμό τους αποπαθητικοποιητικά ιόντα, είτε καταλύουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

ε. Καυσαέρια ή θερμά αέρια: Τα περισσότερα καυσαέρια και θερμά αέρια είναι πολύ έντονα διαβρωτικά και η έντονη αυτή διαβρωτική τάση τους οφείλεται κυρίως στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες, πιέσεις, ταχύτητες ροής και στα συστατικά που περιέχουν.

στ. Χημικό περιβάλλον: Εδώ περιλαμβάνονται όλες οι χημικές ουσίες ανόργανες και οργανικές και η έντονη διαβρωτική τους επίδραση εξαρτάται από την χημική συγγένεια των ουσιών αυτών με τις μεταλλικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή, από την θερμοκρασία, την πίεση και την ταχύτητα ροής.

ζ. Πυρηνικό περιβάλλον: Το περιβάλλον στο οποίο γίνεται χρήση ραδιενεργών ουσιών ή γίνονται πυρηνικές αντιδράσεις είναι έντονα διαβρωτικό. Και αυτό γίνεται επειδή οι ακτινοβολίες επηρεάζουν την χημική σύσταση, την δομή και τις ηλεκτρονικές ιδιότητες των μετάλλων (δημιουργία ενεργών κέντρων και αταξιών δομής) και τον μηχανισμό των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων (προσφορά ενέργειας ενεργοποίησης).

Γενικά, τα ανόργανα υλικά είναι πιο διαβρωτικά από τα οργανικά. Για παράδειγμα, η διάβρωση στη βιομηχανία του πετρελαίου οφείλεται περισσότερο στο NaCl, S₂, H₂SO₄, HCl και νερό παρά στο πετρέλαιο, βενζίνη ή νάφθα.

Η διάβρωση είναι φαινόμενο τεράστιας σημασίας γιατί προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις στην οικονομία, στην ασφάλεια, στην κατανάλωση ενέργειας και στο περιβάλλον [16].

3.2.1 Κόστος

Τα άμεσα κόστη για τη διάβρωση (αντικατάσταση υλικού, εξαρτήματος, αντιδιαβρωτική προστασία κ.λ.π) υπολογίζονται στο 4% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος ενός αναπτυγμένου έθνους. Στις ΗΠΑ περίπου 250 δισεκατομμύρια δολάρια χάνονται κάθε χρόνο λόγω διάβρωσης.

Τα έμμεσα κόστη της διάβρωσης, όπως τα κόστη της διακοπής λειτουργίας μονάδων (shutdowns) και της απώλειας ή μόλυνσης των προϊόντων, δύσκολα μπορούν να υπολογισθούν αλλά πιστεύεται ότι είναι τουλάχιστον όσο και τα άμεσα κόστη. Τα περισσότερα κόστη δεν γίνεται να αποφευχθούν. Τα μέταλλα και τα αντίστοιχα κράματα τους πολλές φορές πρέπει να χρησιμοποιούνται σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, οπότε η βιομηχανία πρέπει να επιλέξει εάν θα χρησιμοποιήσει πολύ ακριβά μέταλλα με υψηλή αντοχή σε διάβρωση ή χημικούς αναστολείς ή επικαλύψεις κ.λ.π ή απλά θα αντικαταστήσει το μέταλλο όταν διαβρωθεί. Γνώση των αιτιών διάβρωσης, καλός σχεδιασμός, καλή επιλογή υλικών και επαρκείς μέθοδοι ελέγχου διάβρωσης μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα κόστη της διάβρωσης.

3.2.2 Ασφάλεια

Όταν η επιθεώρηση για διάβρωση δεν είναι συστηματική και όταν δεν παρθούν άμεσα μέτρα για τον περιορισμό και την διόρθωση μιας διαβρωμένης επιφάνειας, τότε οι επιπτώσεις

μπορεί να είναι τραγικές. Το 30% όλων των αεροπορικών ατυχημάτων οφείλονται σε διάβρωση σε συνδυασμό με εφελκυστικές τάσεις. Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση ηλεκτρικών πύργων, ζημιές σε κτήρια κ.λ.π. Αστοχίες σε αγωγούς και μηχανήματα λόγω διάβρωσης, στις βιομηχανίες, μπορούν να οδηγήσουν σε πυρκαγιές, εκρήξεις και απελευθέρωση τοξικών αερίων.

3.2.3 Απώλειες ενέργειας και φυσικών πόρων

α) *Απώλεια ενέργειας.* Οι εναλλάκτες θερμότητας (συσκευές διατήρησης και μεταφοράς θερμότητας από ένα ρευστό σε άλλο) χάνουν την αποδοτικότητά τους όταν η διάβρωση μειώνει την μεταφορά θερμότητας. Η διάβρωση των πιστονιών του αυτοκινήτου μειώνει την ισχύ της μηχανής. Αυτά είναι παραδείγματα απώλειας ενέργειας τα οποία μπορούν να αποφευχθούν με τις ανάλογες σωστές ενέργειες κατά της διάβρωσης

β) *Απώλεια φυσικών πόρων.* Υπολογίζεται ότι το 40% της παγκόσμιας παραγωγής σε χάλυβα χρησιμοποιείται μόνο για την αντικατάσταση μετάλλου που χάνεται λόγω διάβρωσης. Το 25% της παγκόσμιας παραγωγής σε χάλυβα, θα μπορούσε να είχε διασωθεί εάν εφαρμοζόταν προσεκτικός έλεγχος της διάβρωσης. Ο χάλυβας βέβαια κυρίως παράγεται από scrap. Επίσης, το αλουμίνιο και ο χαλκός ανακυκλώνονται σε μικρότερο, όμως, ποσοστό από ότι ο χάλυβας. Όμως, τα μέταλλα που βρίσκονται σε μικρές ποσότητες στη γη ανακυκλώνονται σε μικρό βαθμό. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η ζήτηση για τα μέταλλα αυτά αυξάνει ενώ τα αποθέματα τους μειώνονται. Η διάβρωση λοιπών των μετάλλων συντελεί και στη μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων των μεταλλευμάτων.

3.2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι αγωγοί πετρελαίου έχουν την δυνατότητα σοβαρότατης οικολογικής καταστροφής. Διάρρηξη αγωγών πετρελαίου λόγω διάβρωσης στο Μιζούρι το 1989 προκάλεσε την

απόρριψη 3 εκατομμυρίων λίτρων (L) αργού πετρελαίου. Σύμφωνα με κυβερνητική μελέτη του Καναδά περίπου 40000 δεξαμενές καυσίμων παρουσιάζουν διαρροές λόγω διάβρωσης.

3.3 Μορφές διάβρωσης και μέθοδοι προστασίας

Η διάβρωση εμφανίζεται με μια μεγάλη ποικιλία μορφών που η κάθε μία έχει και τα δικά της χαρακτηριστικά [17]. Οι μορφές αυτές κατατάσσονται σε βασικές κατηγορίες με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος κατάταξης είναι σε διάβρωση χαμηλών θερμοκρασιών και διάβρωση υψηλών θερμοκρασιών. Ένας άλλος τρόπος που είναι και ο συνηθέστερος είναι η κατάταξη σε ξηρή διάβρωση και υγρή διάβρωση.

Η ξηρή διάβρωση λαμβάνει χώρα σε απουσία υγρής φάσης και περιλαμβάνει αντιδράσεις μετάλλου-αερίου ή μετάλλου-ατμού. Μη μεταλλικά στοιχεία όπως το οξυγόνο, τα αλογόνα, το υδρόθειο και ο θειούχος ατμός οδηγούν στο σχηματισμό ενός στρώματος στη μεταλλική επιφάνεια, χωρίς την παρεμβολή υγρού ηλεκτρολύτη.

Η υγρή διάβρωση εμφανίζεται όταν είναι παρούσα υγρή φάση. Η υγρή αυτή φάση στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι ένα υδατικό διάλυμα ή ηλεκτρολύτης, πρόκειται δηλαδή για διάβρωση σε υδατικά περιβάλλοντα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και περιπτώσεις διάβρωσης που το υδατικό διάλυμα δεν είναι παρόν σε μεγάλες ποσότητες αλλά αντίθετα σε πολύ περιορισμένες. Παρουσία και ελάχιστων ποσοτήτων ύδατος είναι δυνατόν να μεταβάλλει ριζικά την διαβρωτική συμπεριφορά. Έτσι έχει παρατηρηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις μετάλλων ότι ενώ το ξηρό χλώριο είναι μη διαβρωτικό, διαλυμένο στην υγρασία που επικάθεται στην επιφάνεια των μετάλλων σε λεπτά στρώματα αποβαίνει εξαιρετικά διαβρωτικό.

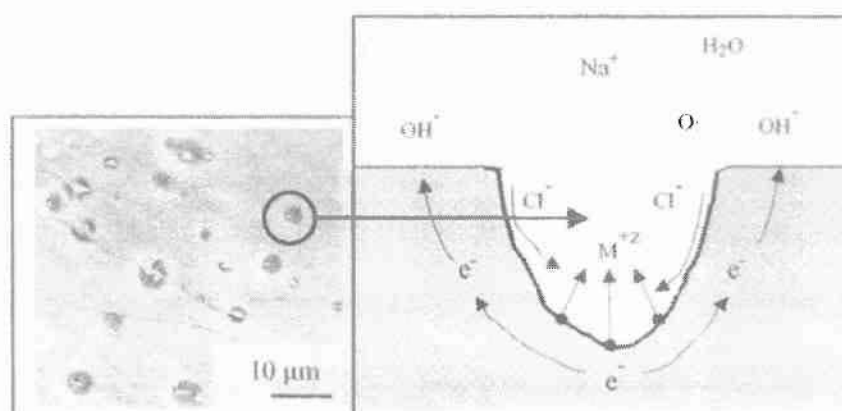
Η διάβρωση ενός μετάλλου σε υδατικά περιβάλλοντα λαμβάνει χώρα όταν το μέταλλο εμβαπτιστεί στα περιβάλλοντα αυτά και τμήμα επιφάνειας του εκτεθεί στην επίδραση τους.

Στην περίπτωση αυτή λαμβάνουν χώρα διεργασίες που κατά κύριο λόγο εδράζονται στην διεπιφάνεια στερεής (μέταλλο) και υγρής φάσης (διαβρωτικό περιβάλλον) και έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια μετάλλου. Η απώλεια αυτή πραγματοποιείται με την μετάβαση του μετάλλου από τη μεταλλική κατάσταση στην μη μεταλλική με τη μορφή προϊόντων διάβρωσης, διαλυτών ή μη διαλυτών στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότερες μορφές διάβρωσης με βάση την οπτική εμφάνιση του διαβρωμένου μεταλλικού υλικού.

3.3.1 Διάβρωση με βελονισμούς.

Σε αυτό το είδος διάβρωσης παρουσιάζεται εκλεκτικός τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης, ακόμα και όταν το μέταλλο ή κράμα έχει καλυφθεί με προστατευτικό επίστρωμα, ή εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας (Σχήμα 3-1α). Έστω κι αν η διάβρωση έχει σαν αρχικό στάδιο τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης, εξελίσσεται σε τοπική εκλεκτική διάλυση, δηλαδή τελικά σχηματίζονται εσοχές και κρατήρες (Σχήμα 3-1β) [18].



Σχήμα: 3-1. α) Τοπική διάβρωση ενός κράματος 2195 Al-Li μετά ποτενσιομετρική εμφάνιση σε 3.5 % NaCl. β) Διάβρωση με βελονισμούς

Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά είδη γιατί προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής. Είναι συχνά δύσκολο να διακρίνουμε τους βελονισμούς είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους είτε γιατί συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης. Το περιβάλλον που δημιουργεί κυρίως απώλειες από βελονισμούς είναι τα διαλύματα χλωριόντων.

Τα περισσότερο ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος της διάβρωσης, είναι αυτά που προστατεύονται με λεπτά στρώματα οξειδίων, όπως ο χαλκός, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το μαγνήσιο. Μπορεί όμως να εμφανιστεί και στο κοινό χάλυβα, το σίδηρο, το μόλυβδο και πολλά άλλα μέταλλα.

Για τη μείωση της διάβρωσης με βελονισμούς μπορούν να εφαρμοστούν τα εξής μέτρα: α) Χρήση κατάλληλων υλικών και επιστρωμάτων, β) Επιλογή κατάλληλης γεωμετρίας, γ) Μη χρησιμοποίηση υλικών που μπορούν να απορροφήσουν νερό σε χρήσεις όπου η επιφάνεια υγραίνεται περιοδικά, δ) Καθοδική προστασία, ε) Λειτουργία στη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία, στ) Προσθήκη αναστολέων και ζ) Ανάδευση, αερισμός και κυκλοφορία των διαλυμάτων κ.λ.π. Όσο αφορά τα κράματα του χαλκού, οι ορείχαλκοι με αλουμίνιο αποτελούν την καλύτερη επιλογή ως προς την διάβρωση με βελονισμούς, ενώ αντίθετα τα υψηλής καθαρότητας κράματα σε Cu παρουσιάζουν την μικρότερη δυνατή προστασία [19].

3.3.2 Γαλβανική διάβρωση

Μεταξύ δύο σε επαφή ανόμοιων μετάλλων που βρίσκονται σε διαβρωτικό ή γενικά αγώγιμο περιβάλλον υφίσταται διαφορά δυναμικού που προκαλεί ροή ηλεκτρονίων στο σύστημα τους. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης του λιγότερο

ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου (άνοδος) και την ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού (κάθοδος).

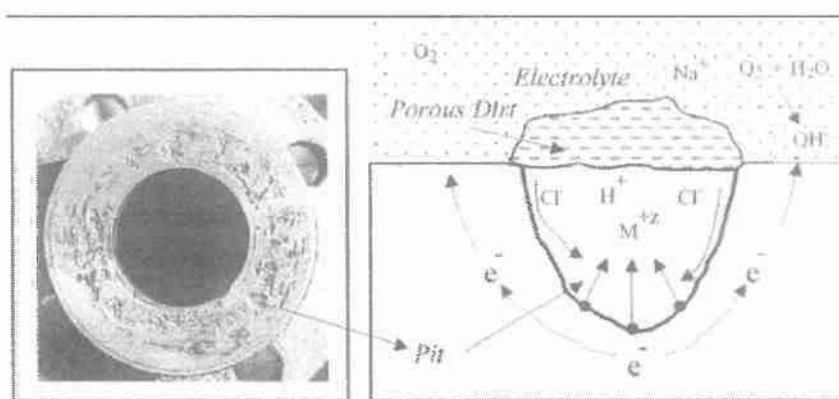
Η θέση και η εξέλιξη της διμεταλλικής διάβρωσης επηρεάζεται από :

- τη φύση και τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος
- την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος: σε μεγάλες επιφάνειες σε επαφή με διάλυμα υψηλής αγωγιμότητας π.χ. θάλασσα, η προσβολή μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλη απόσταση από την επαφή και έτσι να γίνει λιγότερο επικίνδυνη, ενώ σε μαλακό νερό και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες η προσβολή παρουσιάζεται κοντά στις συνδέσεις και είναι πιο επικίνδυνη γιατί φθάνει μέχρι και δημιουργία αυλακώσεων μεγάλου βάθους.
- το λόγο ανοδικής προς καθοδική επιφάνεια, με δυσμενέστερη την περίπτωση μικρής ανόδου προς μεγάλη κάθοδο.
- την υγρασία, που είναι καθοριστικός παράγοντας εμφάνισης και εξέλιξης της γαλβανικής διάβρωσης.

Ο χαλκός και τα κράματα του σχεδόν πάντα δρουν ως κάθοδος λόγω της θέσης του Cu στην ηλεκτρεγερτική σειρά. Η γαλβανική διάβρωση αντιμετωπίζεται με τις παρακάτω ενέργειες: α) επιλογή συνδυασμών υλικών με μικρή διαφορά δυναμικού β) μόνωση ανόμοιων μετάλλων, γ) χρήση αντι-διαβρωτικού χρώματος, δ) σχεδιασμός για εύκολη αντικατάσταση ανοδικών τμημάτων ή αύξηση του πάχους τους, ε) εγκατάσταση τρίτου μετάλλου ανοδικότερο από τα δύο μέταλλα που βρίσκονται σε επαφή και ευκολότερα αντικαταστάσιμο, κ.ά. και στ) χρήση αναστολέων.

3.3.3 Λιάβρωση σε σχισμές ή χαραγές

Μια σχισμή ή μια προφυλαγμένη περιοχή μεταλλικής επιφάνειας μπορεί να αποτελέσει συχνά αιτία έντονης εντοπισμένης διάβρωσης εξαιτίας εμφάνισης διαφορετικής συγκέντρωσης μέσα και έξω από αυτή. Ο βασικός μηχανισμός είναι ουσιαστικά ο ίδιος όπως στη γαλβανική διάβρωση αλλά στην περίπτωση της διάβρωσης σε σχισμές η κατευθυντήρια δύναμη είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των περιοχών του ίδιου του μετάλλου που εκτίθεται σε διαφορετικά περιβάλλοντα και όχι τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαφορετικών μετάλλων που εκτίθενται στο ίδιο περιβάλλον (Σχήμα 3-2) [18]. Τα ποσοστά διάβρωσης επηρεάζονται από το λόγο επιφανειών ανόδων/καθόδων όπως γίνεται στη γαλβανική διάβρωση. Στη διάβρωση χαραγής, η αντίσταση του ηλεκτρολύτη στη ροή των ιόντων μπορεί επίσης να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον περιορισμό της διάβρωσης.



Σχήμα 3-2. Διάβρωση σε σχισμές α) αριστερά, μιας φλάντζας ανοξείδωτου χάλυβα και β) δεξιά, ο αντίστοιχος μηχανισμός

Μπορεί να αποφευχθεί κυρίως με: α) κατάλληλο σχεδιασμό των συγκολλήσεων, β) με αποφυγή γωνιών και εσοχών, γ) με απόλυτη αποστράγγιση, δ) με συχνή απομάκρυνση των αποθέσεων και των στερεών αιωρημάτων κ.ά.

3.3.4 Περικρυσταλλική διάβρωση.

Το είδος αυτό της διάβρωσης εμφανίζεται στα περατωτικά όρια των μεταλλικών κόκκων όπου σχηματίζονται τοπικά γαλβανικά στοιχεία είτε λόγω υψηλότερης κρυσταλλικής ενέργειας των σημείων αυτών είτε λόγω συγκέντρωσης εκεί ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. Ειδική περίπτωση περικρυσταλλικής διάβρωσης αποτελεί η διάβρωση στη περιοχή των συγκολλήσεων των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων.

Αντιμετωπίζεται με θερμική κατεργασία έξω από τη ζώνη ευαισθητοποίησης, ελάττωση του περιεχόμενου άνθρακα κάτω από 0.03%, προσθήκη καρβιδίων Ta, Ti, Nb, κ.ά.

3.3.5 Εκλεκτική προσβολή

Εκλεκτική διάβρωση είναι η απομάκρυνση ενός μόνο στοιχείου από ετερογενές στερεό κράμα. Εμφανίζεται μόνο σε κράματα όπου δύο ή περισσότερα μέταλλα δημιουργούν στερεό διάλυμα. Κατά τη διαβρωτική διαδικασία διαλύεται μόνο το λιγότερο ευγενές μέταλλο ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή αλλά με μεγάλη μείωση της μηχανικής του αντοχής. Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων εξαρτάται από τη σύνθεση τους και αυξάνει με τη συγκέντρωση του ευγενέστερου συστατικού.

3.3.6 Τύποι διάβρωσης που επηρεάζονται από μηχανικούς παράγοντες

Στην πράξη υπάρχουν τύποι διάβρωσης που προκαλούνται από τη συντονισμένη δράση μηχανικών και χημικών παραγόντων. Ανάλογα με τη φύση των μηχανικών τάσεων που δρουν διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

1. Μηχανική δράση ενός υγρού πάνω στο μέταλλο:

α) Διάβρωση εκτριβής ή ρευστού: Πρόκειται για την αύξηση της ταχύτητας φθοράς ή προσβολής του μετάλλου λόγω της σχετικής κίνησης του υγρού διαβρωτικού μέσου και της μεταλλικής επιφάνειας.

Η διάβρωση εκτριβής αντιμετωπίζεται με επιλογή κατάλληλων υλικών, εισαγωγή φίλτρων για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, παροχή ομαλής εσωτερικής επιφάνειας των σωληνώσεων για εύκολη αποστράγγιση, αποφυγή διακοπόμενης και τυρβώδους ροής, επικάλυψη με διαφόρων ειδών επιστρώματα και χρήση αναστολέων.

β) Σπηλαιώδης διάβρωση: Οφείλεται στο σχηματισμό φυσαλίδων ατμού μέσα σε ρευστό που κινείται με μεγάλη ταχύτητα. Οι φυσαλίδες σπάνε κοντά στη μεταλλική επιφάνεια προκαλώντας κύματα πρόσκρουσης σε αυτήν υψηλής πίεσης.

2. Μηχανική δράση ενός στερεού σώματος στο μέταλλο

Διάβρωση από τριβή: Ως διάβρωση από τριβή ορίζεται η προσβολή που συμβαίνει στη διεπιφάνεια δύο σε επαφή επιφανειών, μία τουλάχιστον εκ των Όποιων είναι μεταλλική, όταν υπό φορτίο υφίστανται ελαφριά σχετική ολίσθηση η μία προς την άλλη.

3. Μηχανικές δυνάμεις μέσα στο μέταλλο

α) Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση: Είναι η συνδυασμένη δράση τοπικής διαβρωτικής προσβολής και εσωτερικών ή εξωτερικών εφελκυστικών τάσεων. Το αποτέλεσμα της είναι η δημιουργία λεπτών ρωγμών που προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου κάθετα στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης, ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό (ευθύ ή διακλαδιζόμενο) δρόμο

β) Βλάβη από υδρογόνο: Προκαλείται από τη ρόφηση υδρογόνου από το μέταλλο χωρίς να υπάρχει δράση διάβρωσης στην επιφάνεια.

γ) Διάβρωση κόπωσης: Είναι η συνδυασμένη δράση διαβρωτικής προσβολής και κυκλικών τάσεων δηλ. γρήγορα εναλλασσομένων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων.

3.3.7 Θερμογαλβανική διάβρωση

Είναι η διάβρωση που προκαλείται από την εμφάνιση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας κατασκευής. Προκαλείται διαφορετική πόλωση του μετάλλου, οπότε δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές περιοχές που οδηγό τοπική προσβολή. Αντιμετωπίζεται με: α) Αποφυγή ανομοιόμορφης θέρμανσης ή ψύξης ή θέρμανση τμήματος κατασκευής, β) Κατάλληλο σχεδιασμό για αποφυγή επαφής με υγρά από εξωτερική πηγή διαφορετικής θερμοκρασίας, γ) Εξασφάλιση της συνέχειας της μόνωσης ή της επένδυσης.

3.3.8 Βιολογική ή μικροβιολογική διάβρωση

Ως βιολογική διάβρωση ορίζεται η διάβρωση που ξεκινά ή επιταχύνεται από την παρουσία μικροοργανισμών (βακτηρίδια) ή μακροοργανισμών. Ποικιλίες των μικροοργανισμών αυτών αναπτύσσονται στο νερό, στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και στα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων. Οι μικροοργανισμοί επηρεάζουν είτε άμεσα τις ανοδικές και καθοδικές δράσεις είτε με προσβολή των προστατευτικών επιστρωμάτων ή/και των αναστολέων είτε με παραγωγή διαβρωτικών ουσιών είτε με παραγωγή αποθέσεων με τη μορφή σωρών ή εξογκωμάτων.

3.3.9 Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής.

Ρεύματα διαφυγής ονομάζονται τα συνεχή ρεύματα που ακολουθούν δρόμο διαφορετικό από τον προβλεπόμενο. Τα ρεύματα αυτά μπορεί να προέρχονται από σιδηρόδρομους, διατάξεις συγκολλήσεων, συστήματα γείωσης και καθοδικής προστασίας, κ.λ.π. Η διάβρωση εμφανίζεται στα σημεία εξόδου των ρευμάτων από τις κατασκευές.

Αντιμετωπίζεται με κατάλληλη σύνδεση διατάξεων, ηλεκτρική μόνωση, επιφανειακά επιστρώματα, καθοδική προστασία, χρήση μη αγώγιμων ρευστών και θυσιαζόμενων ανόδων.

Δεδομένου ότι σχεδόν όλες οι μορφές διάβρωσης του χαλκού και των κραμάτων του, ανήκουν στην κατηγορία της διάβρωσης που λαμβάνει χώρα παρουσία υδατικών διαλυμάτων και αφορούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας (θαλασσινό νερό), η περαιτέρω ανάπτυξη θα περιοριστεί στην μελέτη της κατηγορίας αυτής .

3.4 Προϊόντα διάβρωσης κραμάτων χαλκού

Τα προϊόντα διάβρωσης (ενδιάμεσα και τελικά) των κραμάτων χαλκού εξαρτώνται κυρίως από το είδος της διάβρωσης και τις συνθήκες που επικρατούν [20]. Τα κυριότερα από αυτά περιλαμβάνουν οξειδία, υδροξείδια και χλωριούχα άλατα του χαλκού. Τα οξειδία και τα υδροξείδια του μετάλλου είναι τα πρώτα που σχηματίζονται όταν ένα μέταλλο αντιδρά με το περιβάλλοντα αέρα, δημιουργώντας ένα λεπτό φιλμ ή ένα παχύ στρώμα πάνω στην εκτεθειμένη μεταλλική επιφάνεια που μειώνει το ρυθμό της περαιτέρω οξειδωσης.

3.4.1 Οξειδία και υδροξείδια

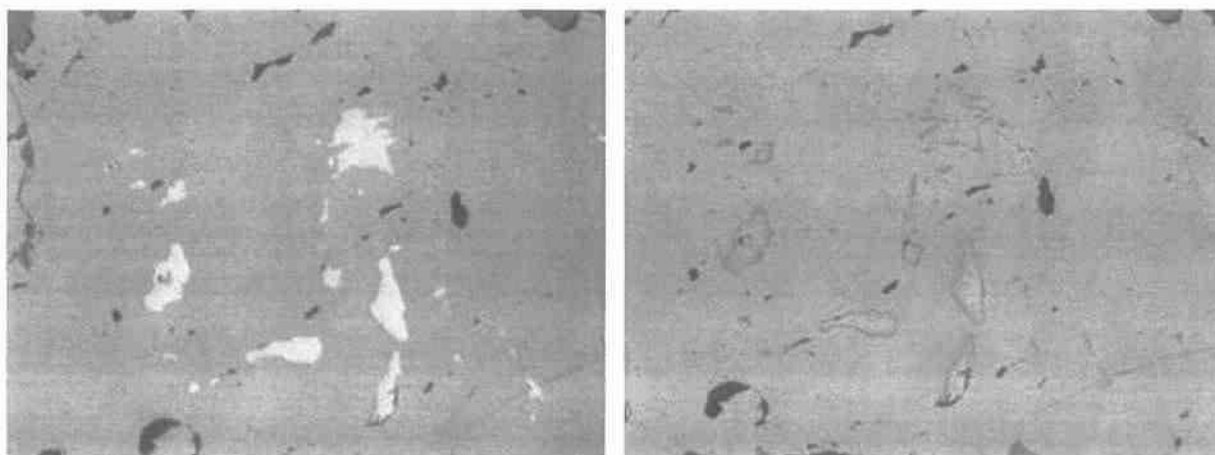
Ο κυπρίτης (Cu_2O) είναι το ερυθρό πρωτοξείδιο του χαλκού το οποίο αποτελεί το πιο σύνηθες προϊόν διάβρωσης του χαλκού και των κραμάτων του καθώς είναι δυνατόν να σχηματισθεί σε μια πληθώρα διαφορετικών συνθηκών. Στον αντίποδα, ο τενορίτης (CuO), απαντάται λιγότερο συχνά όπως επίσης και το υδροξείδιο του χαλκού, ο σπερτινίτης ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) λόγω της δυσκολίας απομόνωσης του ως σταθερή φάση. Στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των παραπάνω προϊόντων διάβρωσης.

Όνομα	Χημικός τύπος	Κρυσταλλικό σύστημα	Χρώμα	Σκληρότητα κατά Mohs
Κυπρίτης	Cu ₂ O	Κυβικό	Υπομεταλλικό ερυθρό	3.5-4
Τενορίτης	CuO	Μονοκλινές	Μεταλλικό φαιό μαύρο	3.5
Σπερτινίτης	Cu(OH) ₂	Συχνά άμορφο	Μπλέ-πράσινο	1-2?

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά οξειδίων και υδροξειδίων του χαλκού

A. Κυπρίτης (Cu₂O)

Ο κυπρίτης μπορεί να επιδειξει πολλούς χρωματισμούς, από το βαθύ κόκκινο και το σκούρο καφετί μέχρι το πορτοκαλοκίτρινο, ανάλογα με τις προσμίξεις που έχει, την απομάκρυνση από την στοιχειομετρία και από το μέγεθος των κρυστάλλων του. Η σκληρότητα του κατά Mohs κυμαίνεται μεταξύ 3.5-4, είναι αδιάλυτος στο νερό και κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα. Ο Sage ήταν ο πρώτος που συσχέτισε το οξείδιο του χαλκού ως προϊόν διάβρωσης κραμάτων χαλκού με το ορυκτό κυπρίτη (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-3: Αυτοφύης χαλκός (Cu) σε παραγένεση με κυπρίτη (Cu₂O) σε καθαρή τομή (αριστερά) και μετά από οξείδωση (δεξιά)

Ο κυπρίτης μπορεί να εμφανιστεί στην επιφάνεια του χαλκού και των κραμάτων του κατά την έκθεσή τους στον αέρα και την υγρασία. Για την πλειοψηφία των τεχνικών υλικών από χαλκό/κράματα χαλκού, ο κυπρίτης εμφανίζεται ως προϊόν διάβρωσης μέσα στη μεταλλική δομή και βρίσκεται σε απευθείας επαφή με την μεταλλική επιφάνεια. Αποτελεί το πιο σύνηθες προϊόν όταν ξεκινά η διεργασία της διάβρωσης. Στην συνέχεια, καθώς η διάβρωση συνεχίζεται και ιόντα χαλκού μεταναστεύουν προς τα έξω, κυπρίτης μπορεί να σχηματιστεί πάνω από το πρωτογενές στρώμα διάβρωσης. Για το λόγο αυτό, κατά την εξέταση της διατομής ενός διαβρωμένου κράματος χαλκού/κασσίτερου, εμφανίζονται πολλά και διαφορετικά στρώματα κυπρίτη. Μερικά από αυτά τα στρώματα κυπρίτη μοιάζουν να έχουν δημιουργηθεί κάτω από τα όρια της αρχικής επιφάνειας, ίχνη της οποίας μπορεί να διατηρούνται ανάμεσα στα στρώματα της διάβρωσης, ενώ άλλα μπορεί να έχουν δημιουργηθεί πάνω από την αρχική επιφάνεια, οπότε το όριο της αρχικής επιφάνειας να εμπεριέχεται στο στρώμα του κυπρίτη.

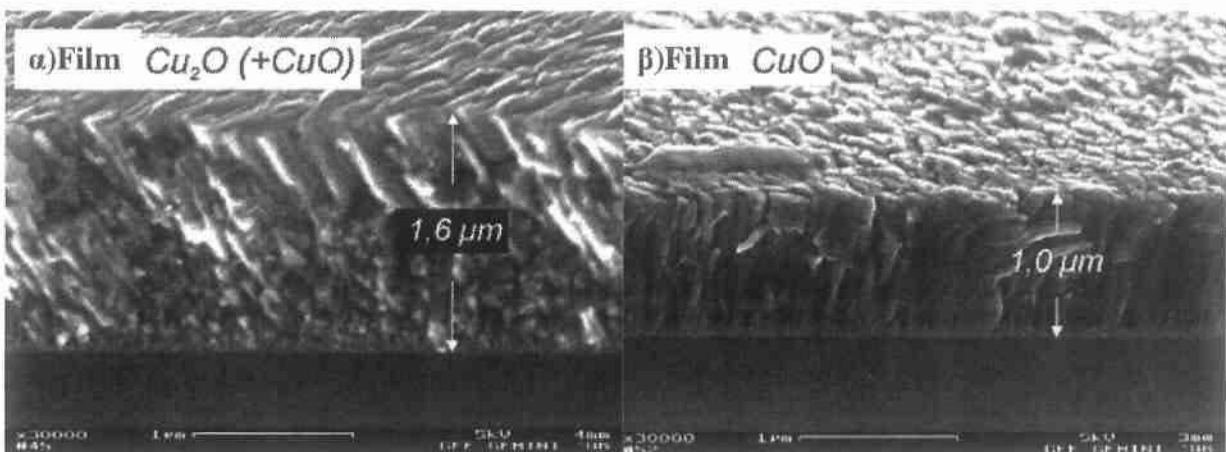
Ένα στρώμα κυπρίτη περιέχει ελάχιστα λιγότερο χαλκό από αυτόν που περιγράφει ο χημικός τύπος του. Τα άτομα οξυγόνου βρίσκονται σε στοιχειομετρία στο πλέγμα αλλά τα άτομα του χαλκού είναι λιγότερα, οπότε παρουσιάζονται κενές θέσεις χαλκού στο πλέγμα. Εξαιτίας των κενών θέσεων του χαλκού στο πλέγμα και προκειμένου να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα του οξειδίου, ορισμένα ιόντα Cu^{2+} μπορεί να υπεισέρχονται στο πλέγμα του οξειδίου. Η δομή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον ρόλο του κυπρίτη στη διάβρωση των κραμάτων χαλκού, εφόσον τον καθιστά αγωγό ηλεκτρονίων. Για παράδειγμα, μέσω της δομής αυτής μεταφέρεται ένα ηλεκτρόνιο από τον μονοσθενή Cu^+ στο δισθενή χαλκό Cu^{2+} , δηλαδή παρατηρείται μετανάστευση θετικών οπών. Ιοντική αγωγιμότητα λαμβάνει χώρα από την μετανάστευση των κενών θέσεων του πλέγματος και ταυτόχρονα οξείδωση από την μετανάστευση του χαλκού μέσω του πλέγματος στην επιφάνεια. Οι διεργασίες αυτές διευκολύνονται από την στιγμή που ιόντα O^{2-} (ξηρή διάβρωση) και Cl^-

(υψηλή διάβρωση) οδεύουν προς το κράμα του χαλκού, ενώ τα ιόντα του μονοοξειδίου Cu απομακρύνονται από αυτό.

B. Τενορίτης (CuO)

Ο τενορίτης αναφέρεται σε παλιότερα βιβλία ως μελακονίτης, εξαιτίας του μαύρου χρώματος του όπως απαντάται στην φύση. Ο τενορίτης έχει χρώμα μεταλλικό μαύρο-γκρι (τέφρας) και γριζοπράσινο σε ανακλώμενο φως. Έχει σκληρότητα 3.5 στην κλίμακα Mohs, είναι αδιάλυτος στο νερό και κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα σε αντίθεση με τον κυπρίτη που κρυσταλλώνεται στο κυβικό σύστημα. Η διαφορά αυτή στο κρυσταλλικό πλέγμα καθιστά πιο δύσκολη τη ψευδόμορφη ανάπτυξη του ως τη δομή του χαλκού/κράματος.

Συνήθως σχηματίζεται όταν ο χαλκός θερμαίνεται αργά στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αρχικά στην επιφάνεια σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα κυπρίτη, το οποίο καθώς αναπτύσσεται εμφανίζει μικρά στίγματα τενορίτη, ο οποίος τελικά καλύπτει την επιφάνεια (Σχήμα 3-4) [21].

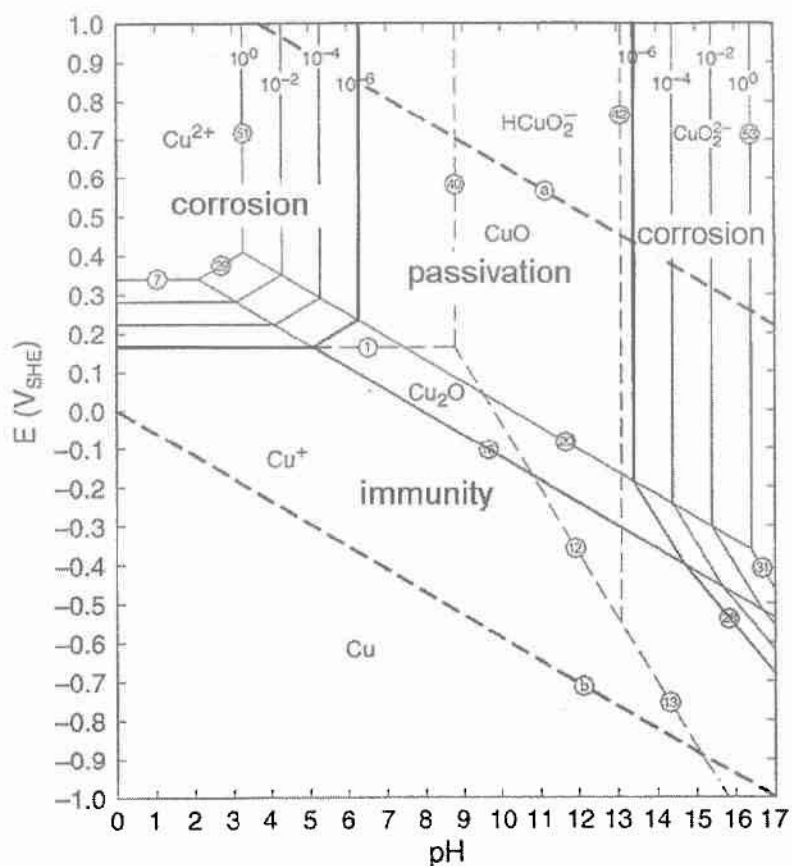


Σχήμα 3-4: Υψηλής ευκρίνειας μικροφωτογραφίες SEM από σχηματισθέντα φιλμ

α) τενορίτη+κυπρίτη και β) κυπρίτη σε συνθήκες εργαστηρίου

Η οξείδωση των περισσότερων ενώσεων του χαλκού στον αέρα υπό θέρμανση 400°C με 600°C θα δώσει τελικά τενορίτη. Ο τενορίτης αποτελεί σπάνιο συστατικό της φυσικής

διαβρωμένης επιφάνεια ενώ ο κυπρίτης είναι το κυρίαρχο προϊόν που σχηματίζονται σε θαλάσσιο ή ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Συνήθως η παρουσία του τενορίτη ως συστατικό του φιλμ διάβρωσης σηματοδοτεί ότι ο χαλκός/κράμα χαλκού έχει εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τα διαγράμματα Pourbaix (Σχήμα 3-5) [22], τενορίτης μπορεί να προκύψει σε διάφορες συνθήκες. Στην πράξη όμως κινητικοί παράγοντες περιορίζουν τον σχηματισμό του τενορίτη σε ορισμένες μόνο συνθήκες όπως, υψηλή θερμοκρασία και υψηλό pH.



Σχήμα 3-5: Διάγραμμα σταθερότητας για το σύστημα Cu – H₂O σε θερμοκρασία 25°C.

Γ. Σπερτινίτης (CuOH₂)

Ο σπερτινίτης (CuOH), σπάνια απαντάται ως σταθερή ορυκτική φάση. Είναι ουσία ένα μεταβατικό, ενδιάμεσο προϊόν που σχηματίζεται κατά την διάβρωση. Είναι άμορφο ή μικροκρυσταλλικό στερεό ή γέλη, με μπλε χροιά που μετατρέπεται εύκολα σε άλλα προϊόντα. Πρόσφατα, στην εργασία των Chen et.al 2005 αναφέρεται η εύρεση σπερτινίτη ως προϊόν διάβρωσης χαλκού σε NaCl και CO_2 περιβάλλον (Chen et.al 2005).

3.4.2 Χλωριούχα άλατα χαλκού

Σήμερα γνωρίζουμε ότι οι χλωριούχες ενώσεις του χαλκού αποτελούν τον κυριότερο κίνδυνο για την σταθερότητα του χαλκού και των κραμάτων του σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Η παρουσία του υποχλωριούχου χαλκού, CuCl , ως προϊόν διάβρωσης κοντά στην μεταλλική επιφάνεια μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά και μακροχρόνια προβλήματα στην σταθερότητα του χαλκού/κράματος χαλκού/κασσίτερου. Η αργή αλλά προοδευτική διάβρωση του χαλκού και των κραμάτων του, γνωστή ως «η ασθένεια του χαλκού», ή «οκαρκίνος του χαλκού», αποδίδεται στην ύπαρξη υποχλωριούχου χαλκού εντός της διαβρωμένης επιφάνειας (φιλμ).

Το πιο σημαντικά χλωριούχα στη διάβρωση του χαλκού είναι ο ναντοκίτης (υποχλωριούχος χαλκός), CuCl και οι τρι-υδροξυ-χλωριούχες ενώσεις του χαλκού: ατακαμίτης, παρατακαμίτης, κλινοατακαμίτης και βοταλλακίτης. Τα τελευταία αποτελούν ισομερή με γενικό τύπο $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$. Ο αναρακίτης, αν και παλιότερα θεωρούνταν ξεχωριστή ορυκτολογική φάση, σήμερα έχει χαρακτηρίζεται ως αντικαταστημένος με ψευδάργυρο παρατακαμίτης και ονομάζεται ψευδαργυρικός παρακαταμίτης.

Οι τρι-υδροξυ-χλωριούχες ενώσεις του χαλκού μπορεί να αποτελούν πρωτογενή προϊόντα διάβρωσης ή να προκύψουν από τον μετασχηματισμό άλλων προϊόντων. Στον Πίνακα 3-2, παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά των κυριοτέρων χλωριδίων του χαλκού.

Όνομα	Χημικός τύπος	Κρυσταλλικό σύστημα	Χρώμα	Σκληρότητα κατά Mohs
Ναντοκίτης	CuCl	Κυβικό	Αχνό πράσινο	2.5
Ατακαμίτης	Cu ₂ (OH) ₃ Cl	Ορθορομβικό	Υαλώδες πράσινο	3-3.5
Παρατακαμίτης	Cu ₂ (OH) ₃ Cl	Ρομβοεδρικό	Αχνό πράσινο	3
Κλινοατακαμίτης	Cu ₂ (OH) ₃ Cl	Μονοκλινές	Αχνό πράσινο	3
Βοταλλακίτης	Cu ₂ (OH) ₃ Cl	Μονοκλινές	Αχνό πράσινο-μπλε	3
Αναρακίτης	(Cu,Zn) ₂ (OH) ₃ Cl	Ρομβοεδρικό	Ανοιχτό πράσινο	3

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά των κυριότερων χλωριδίων του χαλκού

A. Ναντοκίτης (CuCl)

Η ορυκτολογική φάση του ναντοκίτη (CuCl) πρωτο-αναγορίστηκε σε ορυχεία χαλκού στην πόλη Nantoko της Χιλής, από την οποία πήρε και το όνομα της. Εντοπίζεται στη φύση με τη μορφή μεγάλων συσσωματωμάτων ή με τη μορφή τετραεδρικών κρυστάλλων σε σύνθετα δείγματα παρασκευασμένα σε εργαστηριακές συνθήκες. Η αχνοπράσινη ορυκτολογική φάση είναι ισοτροπική εξαιτίας του κρυσταλλικού συστήματος και κατά τη μεταλλογραφική εξέταση με μικροσκοπία πολωμένου φωτός παρουσιάζει ανώμαλη σιαθλαστικότητα, κυρίως στις άκρες. Ο ναντοκίτης εμφανίζεται στα κράματα χαλκού ως μια γκρι ή πράσινο-γκρι, διαφανής στερεά φάση με υφή κεριού. Η σκληρότητα του είναι μόλις 2.5 στην κλίμακα του Mohs και για αυτό μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί.

B. Ατακαμίτης (Cu₂(OH)₃Cl)

Ο ατακαμίτης πήρε το όνομα του από την έρημο Atacama στη βόρειο Χιλή, όπου και αναγνωρίστηκε πρώτη φορά ως δευτερογενές απόθεμα σε μεταλλεύματα χαλκού-χρυσού. Οι κρύσταλλοι του είναι ορθορομβικοί και λαμβάνουν διάφορες αποχρώσεις του πρασίνου. Είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη η παρουσία του ατακαμίτη πάνω σε διαβρωμένα από θαλασσινό νερό με τη μορφή σκούρων πράσινων ασυνεχών κηλίδων (patches). Εργαστηριακές δοκιμές για τη δημιουργία τεχνητά διαβρωμένων επιφανειών - φιλμ με βάση το χλωριούχο νάτριο, NaCl, ή το αραιωμένο υδροχλωρικό οξύ, HCl, έχουν ως αποτέλεσμα ένα στρώμα ατακαμίτη στην επιφάνεια του χαλκού/κράματος χαλκού/κασσίτερου, αλλά σε μια αυθεντική διαβρωμένη επιφάνεια ο ατακαμίτης δεν αποτελεί στρώμα και μάλιστα σε επαφή με την μεταλλική επιφάνεια.

Γ. Παρατακαμίτης (αναρακίτης) και κλινοατακαμίτης ($Cu_2(OH)_3Cl$)

Ο παρατακαμίτης επίσης πήρε το όνομα του από την έρημο Atacama στη βόρειο Χιλή. Εμφανίζεται συνήθως ως δευτερογενές στρώμα διάβρωσης στην διαβρωμένη επιφάνεια του χαλκού/κράματος χαλκού/κασσίτερου, έχει αχνό πράσινο χρώμα και μπορεί να βρεθεί με τη μορφή πούδρας ή φλυκταινών όταν προκύπτει από τον μετασχηματισμό του ναντοκίτη. Σπάνια μπορούν να ανιχνευθούν πλήρως αναπτυγμένοι κρύσταλλοι παρατακαμίτη.

Ακόμη και σήμερα, επικρατεί σύγχυση όσον αφορά στις κρυσταλλικές δομές του παρατακαμίτη, του αναρακίτη και του κλινοατακαμίτη. Ωστόσο, το όνομα κλινοατακαμίτης έχει καθιερωθεί για τον χαρακτηρισμό του ισομερούς του παρατακαμίτη και κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα. Παρόλα αυτά, στην πράξη η διάκριση ανάμεσα στον παρατακαμίτη και τον κλινοατακαμίτη είναι εξαιρετικά δύσκολη εξαιτίας της ομοιότητας των λαμβανομένων διαγραμμάτων XRD.

Δ. Βοταλλακίτης [$(Cu,Zn)_2(OH)_3Cl$]

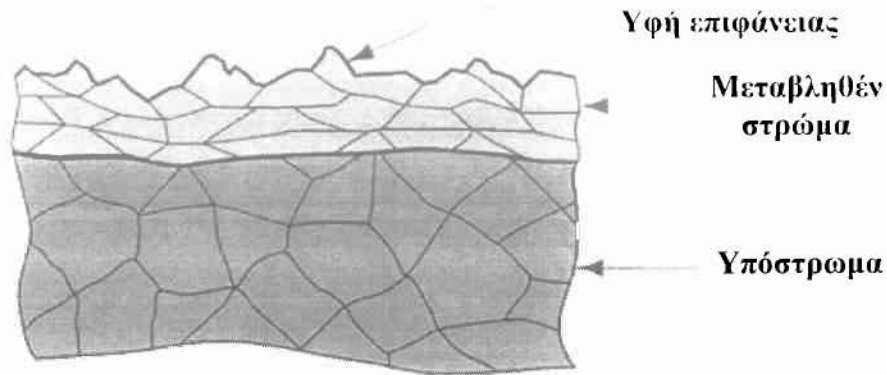
Ο βοταλλακίτης είναι το λιγότερο σταθερό από τα τέσσερα ισομερή, για αυτό είναι ελάχιστες οι φορές που έχει εντοπιστεί ως προϊόν χαλκού/κραμάτων χαλκού. Κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα και αναγνωρίστηκε, χαρακτηρίστηκε και ονομάστηκε από τον Church που το εντόπισε στο ορυχείο Botallack στην Κορνουάλη του Η.Ε.

Κεφάλαιο 4 Ποιότητα Κατεργασμένης Επιφάνειας

«Με τον όρο ποιότητα επιφάνειας, χαρακτηρίζεται η κατάσταση του επιφανειακού στρώματος ενός υλικού όπως προκύπτει από την ενέργεια ενός ή περισσότερων κατεργασιών. Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται συνοπτική αναφορά στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού με έμφαση στην τόννευση όπως αυτή μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι βασικότερες κατηγορίες αφαίρεσης υλικού, η τόννευση μεταλλικών επιφανειών καθώς επίσης και οι συνθήκες που επικρατούν κατά την κοπή αυτή. Στο δεύτερο μέρος του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας μιας επιφάνειας και οι αντίστοιχες μέθοδοι και παράμετροι μέτρησης της στο εργαστήριο».

4.1 Γενικά

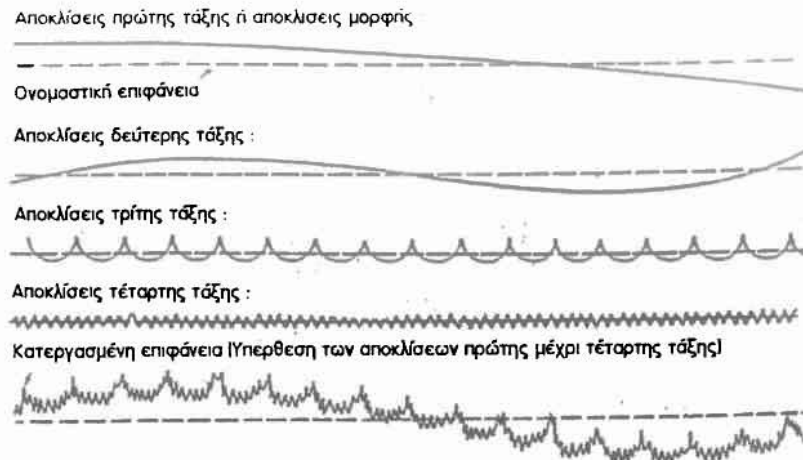
Ο όρος «ποιότητα» επιφάνειας αναφέρεται στην κατάσταση του επιφανειακού στρώματος ενός υλικού όπως προκύπτει από την ενέργεια ενός ή περισσότερων κατεργασιών. Χαρακτηρίζεται από επιμέρους όρους, που αναφέρονται είτε σε γεωμετρική μορφή (τραχύτητα – κυμάτωση – ίχνη επιφάνειας) είτε σε φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες (όπως μικροσκληρότητα, χημική σύσταση, παραμένουσες τάσεις, μικροδομή) της επιφάνειας. Σημειώνεται ότι είναι δυνατόν ακόμη και μετά την τελική κατεργασία να διατηρούνται κάποιες ιδιότητες προερχόμενες από τις αρχικές κατεργασίες, πχ έλαση – κοπή.



Σχήμα 4-1: Κάθετη τομή μιας κατεργασμένης με κοπή μεταλλικής επιφάνειας

Η ποιότητα επιφάνειας, όπως ορίστηκε, είναι συνάρτηση της μεθόδου κατεργασίας, η οποία όχι μόνο προσδίδει τη χαρακτηριστική γεωμετρική μορφή της επιφάνειας, αλλά επιδρά και σε ορισμένο βάθος επί της επιφανειακής στοιβάδας, όπου παρατηρούνται αλλαγές μεγάλου ή μικρού βαθμού από τις ταυτόχρονες κατά την κοπή μηχανικές επιδράσεις, χημικές αντιδράσεις και μεταλλογραφικούς μετασχηματισμούς. Τα παραπάνω είναι αλληλένδετα και λαμβάνονται υπ' όψη όταν απαιτείται πλήρης μελέτη της επιφάνειας.

Κατά την κατεργασία ενός αντικείμενου με φυσικό τρόπο (χειρωνακτικά) ή με μηχανικές μεθόδους, η επιφάνεια που προκύπτει παρουσιάζει διαφορές (αποκλίσεις) σε σχέση προς την ιδανική. Κατά την μικροσκοπική εξέταση της επιφάνειας του κατεργασμένου αντικείμενου είναι δυνατή η διαπίστωση ύπαρξης αποκλίσεων από τη ιδεατή γεωμετρική μορφή (επιπεδότητα, κυκλική διατομή, κυρτότητα, κ.α.). Οι αποκλίσεις αυτές ονομάζονται αποκλίσεις μορφής και κατατάσσονται σε πέντε βασικές κατηγορίες ανάλογα με την μορφή τους (κατά ΟΙΝ 4760 και 4762) όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Κατηγορίες αποκλίσεων μιας κατεργασμένης επιφάνειας από την αντίστοιχη ονομαστική

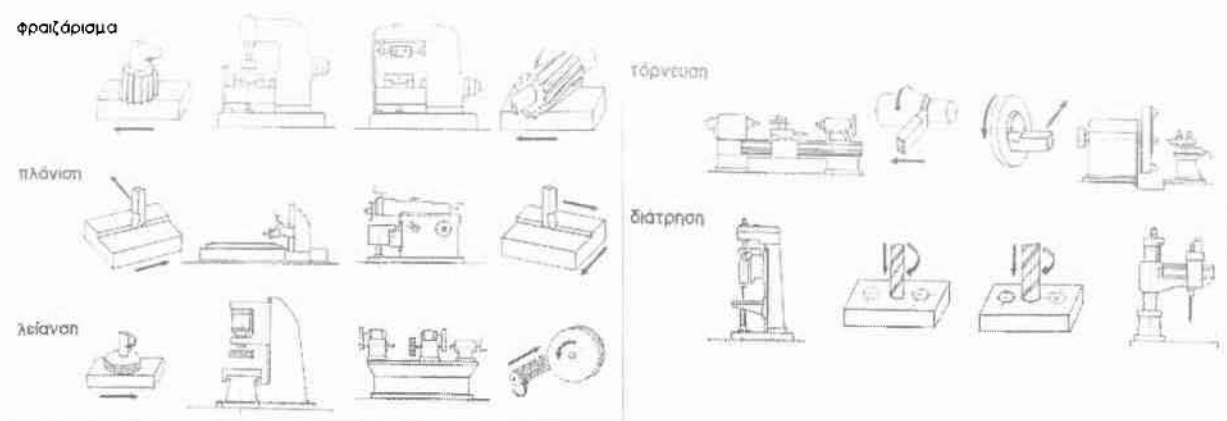
Συνοπτικά, οι αποκλίσεις 1ης και 2ης τάξης αποτελούν τα λεγόμενα μακρογεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας. Οι αποκλίσεις 3ης και ανώτερης τάξης συνιστούν τα μικρο-γεωμετρικά σφάλματα. Ειδικότερα, οι αποκλίσεις 3ης έως και 5ης τάξης προσδιορίζουν της τραχύτητα επιφάνειας.

4.2 Κατεργασίες αφαίρεσης υλικού - Τόρνευση

Οι βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι εργαλειομηχανές στις οποίες γίνονται οι αντίστοιχες κατεργασίες, παρουσιάζονται λεκτικά και γραφικά στον Πίνακα 4-1 και στο Σχήμα 4-3, αντίστοιχα [23-25].

<i>Κατεργασία</i>	<i>Εργαλειομηχανή</i>
Τόρνευση	Τόρνος
Φραιζάρισμα	Φραιζα
Διάτρηση	Δράπανος
Πλάνιση	Πλάνη
Λείανση	Λειαντικός τροχός

Πίνακας 4-1: Βασικότερες κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και οι αντίστοιχες εργαλειομηχανές κοπής



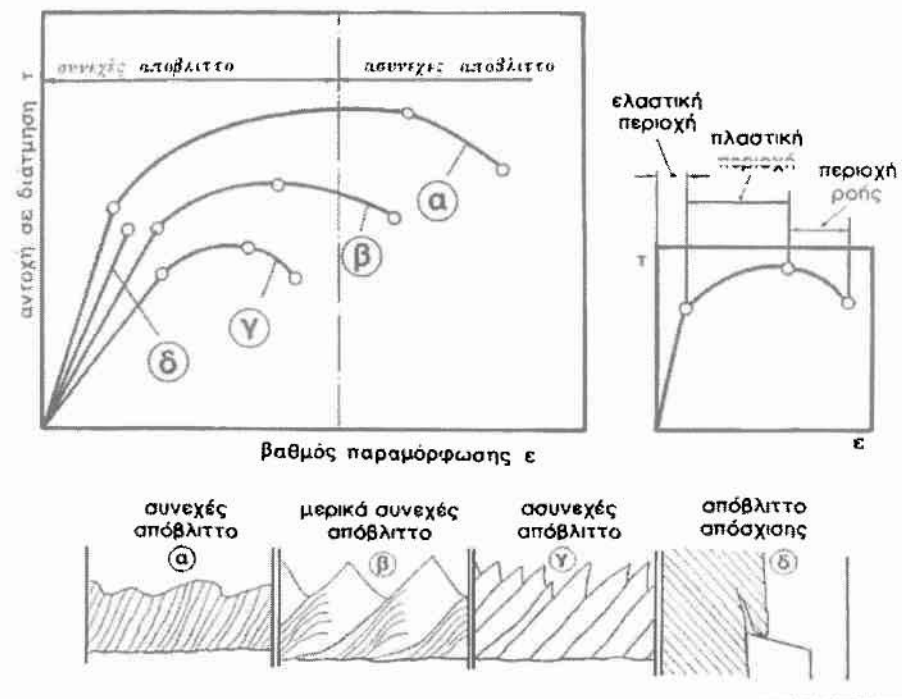
Σχήμα 4-3: Φραιζάρισμα, Πλάνιση, Λείανση, Τόρνευση, Διάτρηση και οι αντίστοιχες Εργαλειομηχανές κοπής

Η αφαίρεση του υλικού στις εργαλειομηχανές επιτυγχάνεται μέσω της διαφορετικής κινηματικής του κοπτικού εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, με καθορισμένο βάθος (το οποίο ονομάζεται βάθος κοπής) και προδιαγεγραμμένη ταχύτητα εισχώρησης. Το υλικό του τεμαχίου που απομακρύνεται λέγεται απόβλητο (γρέζι) και μπορεί, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες κατεργασίας και το υλικό του τεμαχίου, να έχει διάφορες μορφές.

Ανάλογα με τον βαθμό παραμορφώσεως ϵ και την αντοχή σε διάτμηση τ του κατεργαζόμενου υλικού, το παραγόμενο απόβλητο μπορεί να είναι συνεχές ή ασυνεχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-4. Το συνεχές απόβλητο είναι και το επιθυμητό στην πράξη, μια και σχετίζεται με ευνοϊκές συνθήκες όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, την καταναλισκόμενη ισχύ, την προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας του τεμαχίου καθώς και την αναπτυσσόμενη φθορά στο κοπτικό εργαλείο. Το συνεχές απόβλητο δημιουργείται από συνεχή πλαστική παραμόρφωση που υφίσταται στην περιοχή της ζώνης διάτμησης. Το γεγονός αυτό, έχει σαν συνέπεια την διαρροή του υλικού του και την ροή του σαν ταινία πάνω στην επιφάνεια απόβλητου του κοπτικού εργαλείου. Το ασυνεχές απόβλητο

δημιουργείται με την περιοδική θραύση του αποβλήτου κατά την διέλευση του από την ζώνη διατμήσεως. Τέτοιο απόβλητο συναντάται σε ψαθυρά υλικά όπως ο χυτοσίδηρος ή σε πολύ χαμηλές ταχύτητες κοπής, σε μεγάλες προώσεις ή σε κοπή με εργαλεία με μικρές γωνίες αποβλήτου.

Έτσι ευνοϊκές συνθήκες κοπής όσον αφορά την δημιουργία του αποβλήτου, γενικά επιτυγχάνονται με τις εξής συνθήκες: μεγάλη ταχύτητα κοπής, μικρή πρόωση και μεγάλη γωνία αποβλήτου



Σχήμα 4-4: Μορφές αποβλήτου σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού

Σε περιπτώσεις που το συνεχές απόβλητο αποκτά μεγάλο μήκος (ιδίως στην κατεργασία όλκιμων υλικών), με αποτέλεσμα να επιφέρει δυσκολίες αλλά και κινδύνους κατά την ώρα της κατεργασίας, χρησιμοποιούνται κατάλληλες διαμορφώσεις του κοπτικού εργαλείου που ονομάζονται γρεζοθραύστες. Ένα φαινόμενο που σχετίζεται με την δημιουργία του συνεχούς αποβλήτου είναι και η δημιουργία της ψευδόκοπης.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του αποβλήτου, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί στην κόψη του εργαλείου η ψευδόκοψη. Πρόκειται για σφηνοειδές, ασύμμετρο σώμα από ισχυρά παραμορφωμένο και σκληρυμένο υλικό του τεμαχίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-5. Στο σχήμα αυτό διακρίνονται η κοπτική ακμή του εργαλείου που έχει μορφή σφήνα, το κατεργαζόμενο τεμάχιο, το απόβλητο που παράγεται και η ψευδόκοψη ανάμεσα στο κοπτικό εργαλείο και το τεμάχιο. Η ψευδόκοψη αυτή δημιουργείται από επάλληλα στρώματα υλικού του τεμαχίου, που προσκολλώνται στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.



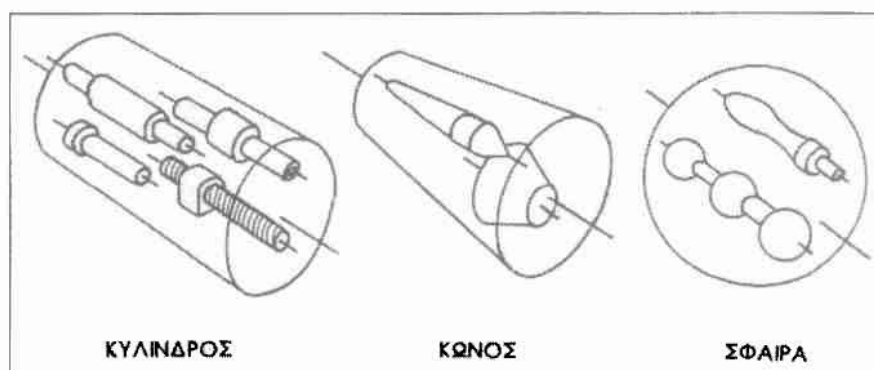
Σχήμα 4-5: Ψευδόκοψη

Η ψευδόκοψη αναπτύσσεται καθώς η κοπή προχωρεί. Όταν η ψευδόκοψη αποκτά ένα ορισμένο μέγεθος, αποχωρίζονται από το σώμα της, λόγω των δυνάμεων κοπής, μικρά κομμάτια τα οποία προσκολλώνται είτε στο απόβλητο που ρέει, είτε στην νεοσχηματισμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Η ύπαρξη της ψευδόκοπης χειροτερεύει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ η συμπεριφορά της ως προς το κοπτικό εργαλείο εξαρτάται από τις συνθήκες κοπής. Έτσι υπάρχει περίπτωση η σταθερή παρουσία της ψευδόκοπης να προστατεύει το κοπτικό εργαλείο, μια και κόβει αυτή και όχι άμεσα η κοπτική ακμή του, ενώ υπάρχει και η περίπτωση, ανάλογα τις συνθήκες κοπής, η ψευδόκοψη να φθείρει το εργαλείο κυρίως στην επιφάνεια αποβλήτου του, με τον μηχανισμό της απόξεσης. Η δημιουργία ή

αποφυγή της ψευδόκοψης μπορεί να ελεγχθεί από την κατάλληλη επιλογή των συνθηκών κατεργασίας

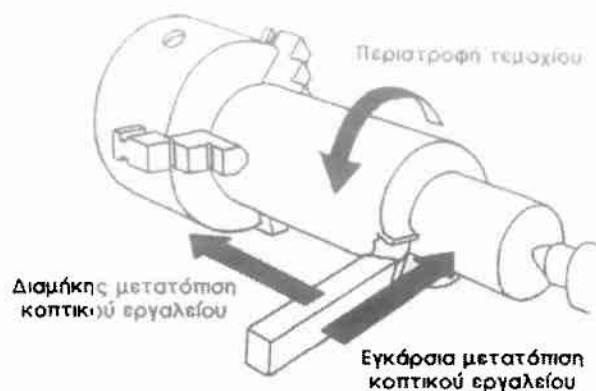
4.2.1 Τόρνευση

Με τόρνευση κατεργάζονται τεμάχια συμμετρικά εκ περιστροφής με κατά κανόνα κυκλική διατομή. Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζονται μερικά τέτοια τεμάχια, τα οποία είναι δυνατόν να αποκτήσουν διαφορετική ποιότητα επιφάνειας στα επί μέρους τμήματά τους, ανάλογα τις συνθήκες κατεργασίας στις οποίες κατεργάζονται. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται τεμάχια στα οποία διάφορα τμήματά τους παίρνουν σχήμα κυλίνδρου, κώνου και σφαίρας.



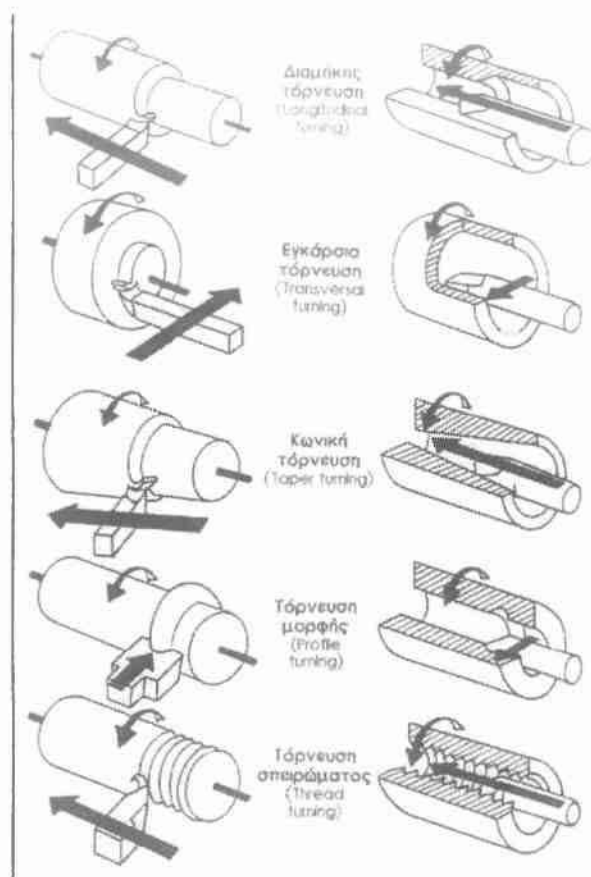
Σχήμα 4-6: Κατηγορίες κατεργασίας τόρνευσης

Κατά την τόρνευση, το κατεργαζόμενο τεμάχιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του, συγκρατημένο στον σφικτήρα (τσοκ) του τόρνου. Με αυτόν τον τρόπο, συγκρούεται με το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει δυνατότητα εγκάρσιας και διαμήκους μετακίνησης και έτσι απομακρύνεται υλικό από το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Οι κινήσεις αυτές κατά την τόρνευση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-7. Το εγκάρσιο βάθος εισχώρησης του εργαλείου στο τεμάχιο αποτελεί και το βάθος κοπής.



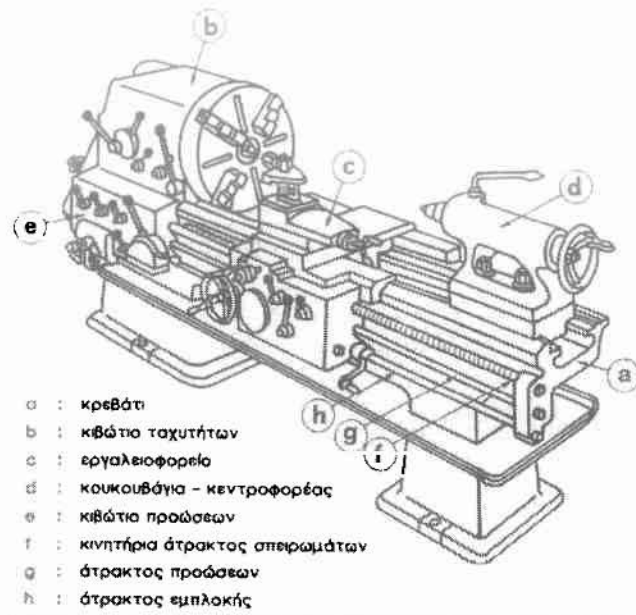
Σχήμα 4-7: Κινηματική τόννευσης

Οι διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει το κατεργαζόμενο τεμάχιο με την τόννευση, απαιτούν διαφορετικό συνδυασμό κινήσεων, όπως και χρησιμοποίηση του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται, εξαρτάται και από το είδος της παραγόμενης επιφάνειας αλλά και από το αν η τόννευση είναι εξωτερική ή εσωτερική στο κομμάτι. Έτσι στο Σχήμα 4-8, παρουσιάζονται διάφορα είδη εξωτερικής και εσωτερικής τόννευσης, για την κατεργασία κυλινδρικών, κωνικών επιφανειών, επιφανειών ειδικής μορφής και σπειρωμάτων. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται με βέλη οι κινήσεις που απαιτούνται κάθε φορά για την συγκεκριμένη κοπή.



Σχήμα 4-8: Είδη εσωτερικής και εξωτερικής τόννευσης

Η εργαλειομηχανή που εξασφαλίζει με ακρίβεια τις κινήσεις του τεμαχίου και του εργαλείου για την τόννευση, είναι ο τόρνος. Στο σχήμα 4-9 παρουσιάζεται σχηματικά ένας τόρνος, όπου διακρίνονται και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.



Σχήμα 4-9: Μηχανικά μέρη τόννου

Ο τόννος αποτελεί μια από τις περισσότερο παραγωγικές εργαλειομηχανές και το 40% περίπου των εργασιών κοπής των μετάλλων γίνονται σε τόννο. Οι σύγχρονοι τόννοι έχουν δυνατότητα παραγωγής καμπύλων εξαρτημάτων, με μεγάλο αριθμό ακρίβειας και μεγάλες ταχύτητες παραγωγής. Το μέγεθος του τόννου εκτιμάται βασικά από δύο χαρακτηριστικά :

- τη μέγιστη διάμετρος τεμαχίου που μπορεί να δεθεί στους σφικτήρες και να περιστραφεί γύρω από τους οδηγούς,
- το μήκος κρεβατιού.

Επισημαίνεται ότι το μήκος του κρεβατιού δεν αντιστοιχεί και στο μέγιστο μήκος τεμαχίου προς κατεργασία μια και αυτό καθορίζεται από την απόσταση των κέντρων του κιβώτιου ταχυτήτων και του κεντροφορέα. Εκτός των παραπάνω χαρακτηριστικών παίζουν σημαντικό ρόλο και τα εξής :

- ο μικρότερος και ο μεγαλύτερος αριθμός στροφών που μπορεί να επιτευχθεί,

- το πλήθος των ταχυτήτων,
- η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα και
- το συνολικό βάρος του

Οι τόννοι, όπως και οι περισσότερες εργαλειομηχανές, μπορεί να είναι συμβατικοί πράγμα που σημαίνει πως καθοδηγούνται από τον χειριστή που κάνει όλες τις απαραίτητες κινήσεις και ρυθμίσεις για την κατεργασία, ή να είναι τόννοι ψηφιακά καθοδηγούμενοι όπου οι κινήσεις αλλά και οι ρυθμίσεις απαιτούν πολύ μικρή συμμετοχή του παραδοσιακού χειριστή μια και τις αναλαμβάνει μια ηλεκτρονική μονάδα καθοδήγησης που την χειρίζεται προγραμματιστής.

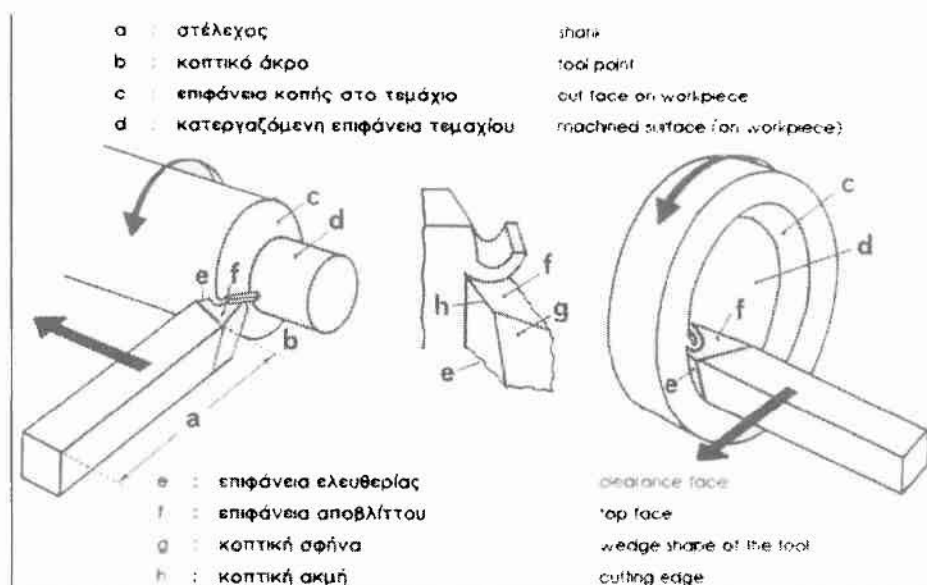
Η τεχνολογία όμως της κοπής κατά βάση παραμένει η ίδια. Έτσι οι επιλεγόμενες ταχύτητες κοπής, οι προώσεις, τα κοπτικά εργαλεία κ.λπ, καθορίζονται και στις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Η αυτοματοποίηση αυτή των κατεργασιών που γίνεται τις τελευταίες δεκαετίες δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να καταργήσει την αναγκαιότητα γνώσης των υλικών, των καταλλήλων συνθηκών κοπής, της συμπεριφοράς της φθοράς των κοπτικών εργαλείων και γενικά αυτού που ονομάζεται τεχνολογία της κοπής. Οι τόννοι, παραδοσιακοί ή μη, διακρίνονται ανάλογα με την τοποθέτηση του σφικτήρα ή αντίστοιχα την τοποθέτηση του κοπτικού εργαλείου σε μετωπικούς και κάθετους τόννους.

4.2.2 Κοπή Τόρνευσης

Για την κοπή στην τόρνευση χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία συνήθως από χάλυβα εργαλείων, ταχυχάλυβα, σκληρομέταλλα και κεραμικά. Η διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου εξαρτάται κατά πολύ από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο και από την γεωμετρία της κόψης του. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα κοπτικό εργαλείο συνοψίζονται στα παρακάτω :

- μεγάλη σκληρότητα, ώστε να μπορεί το εργαλείο να εισχωρεί στο μαλακότερο κατεργαζόμενο τεμάχιο
- αντίσταση στην θερμότητα, ώστε να διατηρεί την σκληρότητά του στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την κοπή και
- αντίσταση σε φθορά, ώστε η κοπτική ακμή του να διατηρεί τις κοπτικές ιδιότητές της.

Στο κοπτικό εργαλείο διακρίνονται δύο χαρακτηριστικά τμήματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-10, το στέλεχος (shank) και το κοπτικό άκρο (tool point). Το μεν στέλεχος χρησιμοποιείται για την συγκράτηση του εργαλείου στον εργαλειοδέτη, ενώ το κοπτικό άκρο περιλαμβάνει τις κοπτικές ακμές που συμμετέχουν στην κοπή. Το στέλεχος είναι από μαλακό υλικό ώστε να δέχεται τα κρουστικά φορτία και τις δυναμικές καταπονήσεις κατά την διάρκεια της κοπής χωρίς να θραύεται.



Σχήμα 4-10: Χαρακτηριστικές ακμές και επιφάνειες εργαλείου και τεμαχίου στην τórνευση

Μια επίπεδη τομή του κοπτικού άκρου έχει το σχήμα σφήνας ή οποία ονομάζεται και κοπτική σφήνα (wedge shape of the tool). Στο ίδιο σχήμα 4-10 παρουσιάζονται γενικά, οι χαρακτηριστικές επιφάνειες και ακμές του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά την τόννευση.

Οι γωνίες κοπής που προαναφέρθηκαν, επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της κοπής (ποιότητα επιφάνειας, τραχύτητα κ.λπ) και εξαρτώνται από το υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί. Έτσι για να αποφευχθεί θραύση της κοπτικής ακμής στην κατεργασία σκληρών υλικών, επιλέγεται μεγάλη γωνία σφηνός. Η γωνία ελευθερίας κρατείται τόση ώστε να μην δημιουργείται τριβή ανάμεσα στην επιφάνεια ελευθερίας και την κατεργαζόμενη επιφάνεια του τεμαχίου ενώ η μεγάλη γωνία αποβλίττου βοηθά στην καλύτερη ροή του αποβλίττου και κατά συνέπεια στην διαδικασία της κοπής. Η γωνία αποβλίττου όμως δεν μπορεί να μεγαλώνει τυχαία μια και επηρεάζει την γωνία σφηνός. Αυτό σημαίνει πως ανάμεσα στις κοπτικές γωνίες του εργαλείου υπάρχει αλληλεξάρτηση και πρέπει να γίνεται βέλτιστη επιλογή τους. Οι κατάλληλες αυτές γωνίες για τον συνδυασμό υλικό κοπτικού εργαλείου - υλικό κατεργαζόμενου τεμαχίου, προκύπτουν μετά από συστηματικά πειράματα. Σήμερα υπάρχουν αρκετά τέτοια αποτελέσματα που προτείνουν γωνίες κοπής ανάλογα το υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί. Γενικά όμως ισχύουν τα εξής: σκληρό υλικό απαιτεί μεγάλη γωνία σφηνός ενώ μαλακό υλικό απαιτεί μεγάλη γωνία αποβλίττου

Τέλος, άλλες συνθήκες που παίζουν σημαντικό ρόλο κατά την τόννευση είναι η ταχύτητα κοπής που σχετίζεται με τις στροφές περιστροφής του κομματιού και την διάμετρο κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής. Οι τρεις αυτοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατεργασία και η σωστή κάθε φορά επιλογή τους, αποτελεί απαραίτητη γνώση του χειριστή ενός τόννου.

4.2.3 Συνθήκες κοπής στην κατεργασία της τόννευσης

Στις πιο βασικές ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν ανάλογα τις συνθήκες κοπή κατά την κατεργασία της τόννευσης, περιλαμβάνονται οι παρακάτω:

A) Ταχύτητα κοπής. Αναφέρεται στη στιγμιαία (σχετική) ταχύτητα μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του προς κατεργασία τεμαχίου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής. Είναι η περιφερειακή ταχύτητα του τεμαχίου που τριφνύεται και δείχνει πόσα μέτρα αποβλήτου παράγονται ανά λεπτό. Δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} [m / \text{min}] \quad (4.1)$$

όπου: D η αρχική διάμετρος του προς κατεργασία τεμαχίου [mm] και

n η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου σε στροφές ανά λεπτό [rpm]

B) Βάθος κοπής a [mm]. Αντιστοιχεί στο βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου στο κομμάτι προς κατεργασία κατά την ακτίνα του τεμαχίου. Προφανώς κατά την εσωτερική τόννευση το βάθος κοπής καθορίζεται από το πάχος του κοπτικού εργαλείου.

Γ) Πρόωση s [mm/rev]. Αναφέρεται στη σχετική μετατόπιση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου που προσφέρει με σταθερό ρυθμό στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή. Η κίνηση της πρόωσης στον τόρνο γίνεται από το κοπτικό εργαλείο, αλλά σε άλλες περιπτώσεις είναι δυνατό να γίνει και από το προς κατεργασία τεμάχιο. Στον τόρνο, ειδικότερα, μπορούμε να πούμε πως η πρόωση είναι η κατά την έννοια του άξονα περιστροφής μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή του αντικείμενου.

Από το συνδυασμό των v , s και a εξαρτώνται κατά κύριο λόγο, η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ο χρόνος κατεργασίας, οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και η καταναλισκόμενη ισχύς κοπής και τέλος η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου.

4.3 Τραχύτητα επιφάνειας

Η τραχύτητα επιφάνειας ανήκει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε κατεργασμένης επιφάνειας [26-28]. Μια κατεργασμένη επιφάνεια παρουσιάζει γενικά αποκλίσεις από τη θεωρητική της μορφή, από τη λεγόμενη ονομαστική επιφάνεια. Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να καταταγούν σε τάξεις οι οποίες εμφανίζονται στον πίνακα 4-2.

Τάξη απόκλισης	Χαρακτηριστικά αποκλίσεων	Αιτίες αποκλίσεων
1 ^η	Μη επιπεδότητα Μη στρογγυλότητα	Σφάλματα στον ολισθήρα εργαλειομηχανής. Παραμορφώσεις εργαλειομηχανής, κατεργαζόμενου τεμαχίου. Εσφαλμένη στήριξη τεμαχίου.
2 ^η	Κυματώσεις	Έκκεντρος τοποθέτηση τεμαχίου ή εργαλείου. Ταλαντώσεις εργαλείου ή και τεμαχίου. Σημαντική ανομοιογένεια του υλικού του τεμαχίου.
3 ^η	Αυλακώσεις	Μορφή της κόψης του εργαλείου. Κινηματική της κατεργασίας.
4 ^η	Ρωγμές. Ανωμαλίες σε μορφή λεπιών κ.λπ.	Ατέλειες τροχίσεως της κόψης του εργαλείου. Δημιουργία ψευδοακμής. Φθορά εργαλείου. Τρόπος σχηματισμού του αποβλήτου. Επίδραση γαλβανικών επεξεργασιών.
5 ^η	Φύση μετάλλου	Τρόπος κρυσταλλώσεως μετάλλου. Ανωμαλίες επιφάνειας λόγω χημικών επιδράσεων. Φαινόμενα διάβρωσης.
6 ^η	Κρυσταλλικός σχηματισμός μετάλλου	Φυσικές-χημικές μεταβολές κατά τη λεπτή δομή του υλικού. Παραμορφώσεις του κρυσταλλικού ιστού (παραμένουσες τάσεις, ολισθήσεις κρυστάλλων).

Πίνακας 4-2: Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας κατά DIN 4760

Η τραχύτητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου εξαρτάται από:

- Το υλικό του αντικειμένου.
- Το υλικό και την ποιότητα των κοπτικών εργαλείων.
- Τη γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.
- Τη χρήση των παραμέτρων κοπής.
- Το μέγεθος των κατεργασμένων επιφανειών.
- Τη μέθοδο κατεργασίας.
- Τις εργαλειομηχανές στις οποίες πραγματοποιήθηκε η κατεργασία.

Οι απαιτήσεις των σύγχρονών μηχανουργικών κατασκευών σε ότι αφορά την τραχύτητα συναρμοζόμενων επιφανειών, συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία :

- Στον προσδιορισμό του βαθμού τραχύτητας της επιφάνειας που απαιτείται για κάθε εφαρμογή, ούτως ώστε να συμβιβάζεται η αποδοτική λειτουργία της θεωρούμενης επιφάνειας με την προϋπόθεση ελαχιστοποίησης του κόστους και του χρόνου της κατεργασίας.
- Στη γνώση του βαθμού της τραχύτητας, τον οποίο μπορούν να αποδώσουν οι χρησιμοποιούμενες στην πράξη κατεργασίες κοπής.
- Στην προτυποποίηση χαρακτηριστικών (αντιπροσωπευτικών) μεγεθών της τραχύτητας, όπως και μεθόδων και συναφών οργάνων για τη μέτρηση ή τον έλεγχο αυτών των μεθόδων.
- Επιπροσθέτως πρέπει να καταβάλλεται προσπάθεια, ούτως ώστε να συσχετίζεται, κατά το δυνατόν περισσότερο, ο βαθμός της τραχύτητας της επιφάνειας με τον ελάχιστο αναγκαίο για την αποδοτική λειτουργία της θεωρούμενης επιφάνειας, υπο την προϋπόθεση ότι θα ελαχιστοποιείται με αυτόν τον τρόπο ο χρόνος και το κόστος κατεργασίας. Κατεργασμένες επιφάνειες με υψηλότερο βαθμό τραχύτητας από το απαιτούμενο για την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, έχουν υψηλότερο κόστος

χωρίς κανένα επιπλέον πλεονέκτημα, ενώ αντίστοιχες επιφάνειες με χαμηλότερο από τον αναγκαίο βαθμό τραχύτητας παρουσιάζουν διάφορες λειτουργικές ανωμαλίες.

Η τραχύτητα επιφάνειας μετράται συνήθως με προφιλόμετρα (πλέον και φορητά) για τραχύτητα από 0.02 έως 5 μm . Η αρχή λειτουργίας του είναι παρόμοια με αυτή της βελόνας πικάπ που παράγει σήμα V ανάλογο της κατακόρυφης μετατόπισης μιας βελόνας διαμαντιού η οποία ακολουθεί το προφίλ. Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζεται παραμένει ακίνητη και το στέλεχος της ακίδας κινείται ευθύγραμμα με σταθερή ταχύτητα. Η ακίδα, κατά την κίνηση του στελέχους, εφάπτεται συνεχώς στην προς εξέταση επιφάνεια. Η κίνηση της ακίδας πολλαπλασιάζεται με ηλεκτρικό τρόπο είτε με μεταβολή της επαγωγής είτε της χωρητικότητας είτε πιεζοηλεκτρικά είτε φωτογραφικά. Η συνεχής αυτή μέτρηση καταγράφεται σε χαρτί, από το οποίο δύναται να μετρηθεί η τραχύτητα της επιφάνειας, κατά το πέρας της εργαστηριακής δοκιμής. Άλλος τρόπος άμεσης μέτρησης είναι με οπτικούς αναλυτές (μικροσκόπιο) για τραχύτητα μεταξύ 0.8 και 80 μm .

Επίσης, η τραχύτητα μετράται και έμμεσα είτε με σύγκριση με πλακίδια τυποποιημένης δεδομένης τραχύτητας (υποκειμενικός τρόπος), είτε με εκμετάλλευση της επίδρασης της τραχύτητας επιφάνειας στη ροή του αέρα που διέρχεται από κατάλληλο διάκενο, στη χωρητικότητα πυκνωτή του οποίου ο ένας οπλισμός είναι η μετρούμενη επιφάνεια, αλλά κυρίως στην ένταση του ανακλώμενου από την επιφάνεια φωτός.

Υπερβολικά χαμηλή τραχύτητα επιφάνειας εκτός του αυξημένου κόστους που απαιτείται για την επίτευξη της οδηγεί σε αμφίβολο αποτέλεσμα, επειδή με την λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες η επιφάνεια πιθανά αποκτά έτσι ή αλλιώς μία μέση τραχύτητα που μπορεί να είναι αρκετά υψηλότερη από την αρχική. Ας σημειωθεί επίσης ότι χαμηλή τραχύτητα μειώνει τον κίνδυνο κόπωσης λόγω μικρότερων «εγκοπών» και για αυτό το λόγο στροφαλοφόροι άξονες, δίσκοι τουρμπίνων κλπ υφίστανται λείανση μετά την κοπή. Επίσης η «στιβαρότητα» της

επαφής αυξάνει με τη μείωση της τραχύτητας : για επιφάνεια από λείανση με 2.5-8 μm ύψος ανωμαλιών η επιφάνεια επαφής είναι το 10% της φαινομένης, για επιφάνεια προερχόμενη από κοπή με διαμάντι η επιφάνεια αυξάνει σε 63% της φαινομένης και για αποπεράτωση με διαμάντι σε 80-90%.

Τυπικές τιμές επιτυγχανόμενης τραχύτητας επιφάνειας Ra από διάφορες κατεργασίες αποβολής υλικού είναι οι παρακάτω : για τόννευση ή φρεζάρισμα η εκχόνδριση αντιστοιχεί σε 12.5 μm , ενώ η αποπεράτωση σε 1.25-2.5 μm . Η διάτρηση επιτυγχάνει τραχύτητα 2.5-6.3 μm . Η γλύφανση, που ακολουθεί τη διάτρηση επιτυγχάνει 0.32-1.25 μm . Η λείανση κυμαίνεται σε τιμές από 0.08 (lapping) έως 0.63 μm .

Στις μέρες μας, η τυποποίηση της ποιότητας μιας κατεργασμένης επιφάνειας ως προς το μέγιστο βάθος τραχύτητας (για τέσσερις σειρές βαθμού τραχύτητας) ακολουθεί την προδιαγραφή (DIN 3141/1960 και DIN 150 1302) με βάση τον συμβολισμό των αντεστραμμένων τριγώνων (Πίνακας 4-3)

Επιφάνεια	Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή R _{max} σε μm				Παραγωγή	
	Σειρά 1 DIN 150 132	Σειρά 2 DIN 150 132	Σειρά 3 DIN 150 132	Σειρά 4 DIN 150 132		
1					Κατεργασμένη επιφάνεια που προκύπτει από την επεξεργασία της χύτευσης συμπαγούς και ακατεργαστή επιμεταλλωμένη επιφάνεια (που προκύπτει από καθαρή χύτευση καθαρή κοπή εν θερμώ)	
2		R _{max} ≤ 250				
3		160/25	100/12,5	63/6,3	25/3,2	Κατεργασίες εκχρόνισης (αυλακώσεις από το κοπτικό εργαλείο είναι ορατές και αισθητές με το γέφυ)
4		40/6,3	25/3,2	16/1,6	10/1,6	Κατεργασίες εξουδεύσεως (αυλακώσεις μπορούν να διακρίνονται με γυμνό μάτι)
5		16/1,6	6,3/0,8	4/0,4	2,5/0,2	Κατεργασίες λείανσης (αυλακώσεις δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι)
6			1/0,1	1/0,1	0,4/0,025	Κατεργασίες ιδιαίτερης βελτίωσης με εξαιρετική ομοιομορφία και λείανση (ελεγχόμενες πινακίδες)
7		<ol style="list-style-type: none"> Μέση αριθμητική τιμή τραχύτητας Ra σε μm ή κατηγορία τραχύτητας N1 – N12 Συμβολισμός για το είδος της επιφάνειας (κατά DIN 4761) και μέθοδος κατασκευής Άλλα μέτρα τραχύτητας (κατά DIN 4762) 				

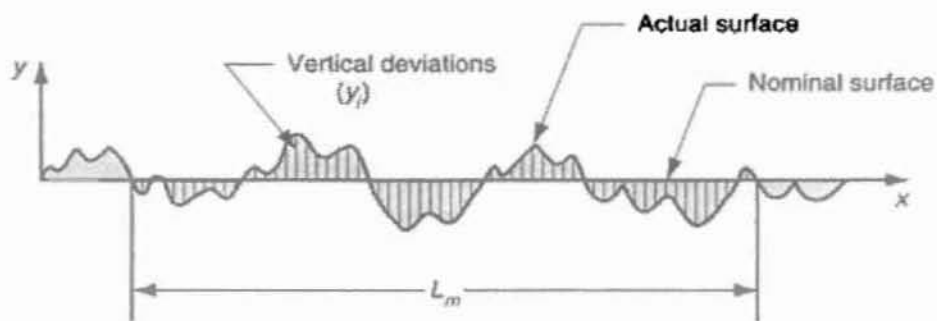
Πίνακας 4-3: Τυποποίηση της ποιότητας μιας κατεργασμένης επιφάνειας ως προς το μέγιστο βάθος τραχύτητας κατά την προδιαγραφή (DIN 3141/1960 και DIN 150 1302)

4.4 Μέτρηση Τραχύτητας επιφάνειας (Προφίλομετρία)

Υπάρχουν δύο συστήματα προτυποποίησης της τραχύτητας, το σύστημα E ή σύστημα περιβάλλουσας και το σύστημα M ή σύστημα κεντρικής γραμμής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η μέτρηση της τραχύτητας της επιφάνειας γίνεται με προφίλομετρο στυλίσκου και η προτυποποίησή της με το σύστημα M [28].

Το σύστημα M ή σύστημα Μέσης Γραμμής (Mean Line System) είναι μια κατά κύριο λόγο ποσοτική μέθοδος έκφρασης της τραχύτητας των επιφανειών και βασίζεται στην ανάπτυξη των τραχυμέτρων, δηλαδή σε όργανα μέτρησης του μεγέθους και του σχήματος των επιφανειακών ανωμαλιών με τη βοήθεια ειδικής μηχανικής μετρικής ακίδας.

Βασικό μέγεθος του συστήματος M αποτελεί η λεγόμενη κεντρική γραμμή, που ορίζεται ως η παράλληλη προς τη γενική κατεύθυνση του περιγράμματος ευθεία, η οποία ισομοιράζει τα πάνω και τα κάτω εμβαδά του δειγματοληπτικού μήκους L (Σχήμα 4-11). Η κεντρική αυτή γραμμή υλοποιείται μηχανικά από το πέδιλο των τραχυμέτρων τύπου στυλίσκου. Παράλληλα προς την κεντρική γραμμή βρίσκονται άλλες δυο γραμμές αναφοράς, η γραμμή La η οποία εφάπτεται της ανώτερης ανωμαλίας, και η γραμμή Lk που εφάπτεται της κατώτερης ανωμαλίας.



Σχήμα 4-11. Χαρακτηριστικά στοιχεία της τραχύτητας επιφάνειας κατά το σύστημα M (κεντρικής γραμμής)

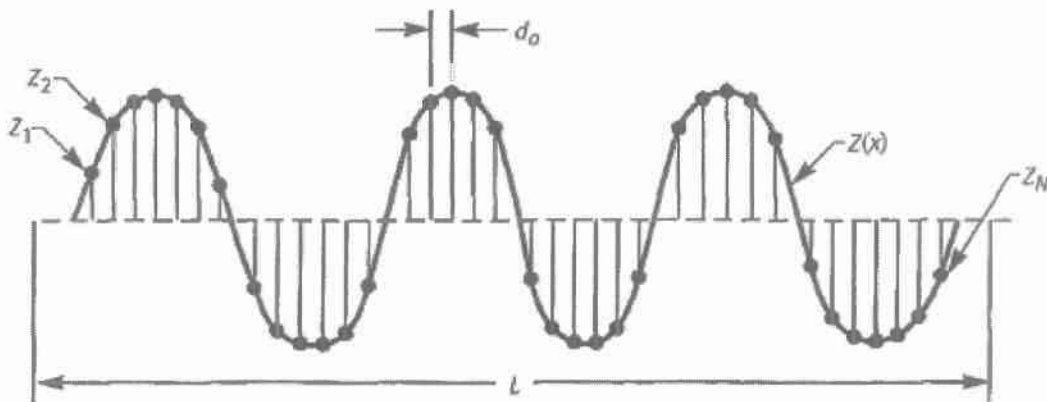
Για τον πλήρη καθορισμό της γεωμετρικής μορφής μιας επιφάνειας, όπως αυτή παρουσιάζεται από το πραγματικό περίγραμμά της, είναι απαραίτητο να μετρηθούν πολλά μεγέθη, είτε κατά βάθος (κάθετα δηλαδή) της κεντρικής γραμμής, είτε κατά μήκος αυτής. Λόγω, λοιπόν, της πολυπλοκότητας και της δυσκολίας της παραπάνω διαδικασίας των μετρήσεων, έχουν επιλεγεί κάποια βασικά μεγέθη της τραχύτητας, τα οποία σε συνδυασμό με το είδος της κατεργασίας από την οποία προέρχεται η επιφάνεια, χαρακτηρίζουν ικανοποιητικά την τραχύτητα των επιφανειών.

Διάφορα τέτοια χαρακτηριστικά μεγέθη της τραχύτητας για το σύστημα κεντρικής γραμμής είναι τα παρακάτω :

- Η τραχύτητα κεντρικής γραμμής ή μέση αριθμητική τραχύτητα R_a , η οποία ορίζεται από τη σχέση :

$$R_a = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |Z(x)| dx \quad \text{ή} \quad R_n = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |Z(x)| dx \quad (4.2)$$

Το μέγεθος αυτό εκφράζει τη μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων του πραγματικού περιγράμματος από την κεντρική γραμμή, μέσα στο δεδομένο μήκος δειγματοληψίας. Υπολογίζεται από το πηλίκο του εμβαδού της σκιαγραφημένης περιοχής προς το μήκος L (Σχήμα 4-12) (ASME B46.1-2002)[28].



Σχήμα 4-12. Υπολογισμός τραχύτητας R_a

- Το βάθος οριζοντίωσης R_p , το οποίο ορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$R_p = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L h(x) dx \quad (4.3)$$

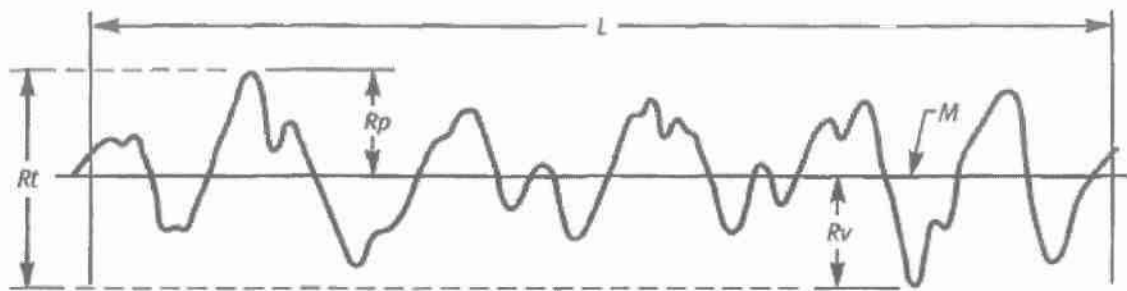
Το μέγεθος αυτό εκφράζει το μέσο βάθος του πραγματικού περιγράμματος από την περιβαλλουσα επαφής και θεωρείται ότι περιγράφει καλύτερα από κάθε άλλη παράμετρο την

τριβική ποιότητα της επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει διότι το συγκεκριμένο μέγεθος ουσιαστικά δείχνει την απόσταση των κορυφών των ανωμαλιών από τη μέση στάθμη της επιφάνειας.

- Το μέγιστο ύψος R_t , που ορίζεται από τη σχέση :

$$R_t = R_p + R_v \quad (4.4)$$

Το μέγεθος αυτό εκφράζει την υψομετρική διαφορά μεταξύ της υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών (R_p) και της βαθύτερης κοιλάδας (R_v) (Σχήμα 4-13) (ASME B46.1-2002).. Παρόλο που το μέγιστο βάθος μετριέται σχετικά εύκολα έχει το μειονέκτημα να παρουσιάζει ευαισθησία σε τοπικές ανωμαλίες που τυχαίνει να βρίσκονται στο μήκος της δειγματοληψίας.



Σχήμα 4-13. Σχηματική απεικόνιση των R_p , R_t και R_v .

- Το μέσο βάθος R_z , που ορίζεται από τη σχέση :

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{i=1}^n \beta_i}{n} \quad (4.5)$$

Στην παραπάνω σχέση τα α και β είναι οι αποστάσεις των γραμμών L_a και L_k αντίστοιχα από την κεντρική γραμμή.

Το συγκεκριμένο μέγεθος R_z , εκφράζει το μέσο βάθος ή διαδοχικών επιφανειακών ανωμαλιών.

Σε περιπτώσεις ανωμαλιών μεγάλου ύψους, κατά τις οποίες η μέση τραχύτητα R_a δεν μας παρέχει αρκετά σαφείς ενδείξεις, χρησιμοποιούμε άλλες παραμέτρους οι οποίες προέρχονται από τη στατιστική ανάλυση της γεωμετρίας των επιφανειών. Οι σημαντικότερες από αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

- Καμπύλη φέρουσας επιφάνειας και κατανομή κορυφών

Είναι η καμπύλη που εκφράζει την αθροιστική συχνότητα εμφάνισης ύψους ανωμαλίας μεγαλύτερου από δεδομένη στάθμη, και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{(y>h)} = \int_h^{\infty} p(y) dy \quad (4.6)$$

Ως $p(y)$ ορίζεται η συνάρτηση κατανομής των υψών που δείχνει την πιθανότητα το ύψος κάποιου σημείου στην επιφάνεια να βρίσκεται μεταξύ y και dy . Η σχέση που μας δίνει την συνάρτηση $p(y)$ είναι η εξής :

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-y^2}{2\sigma^3}} \quad (4.7)$$

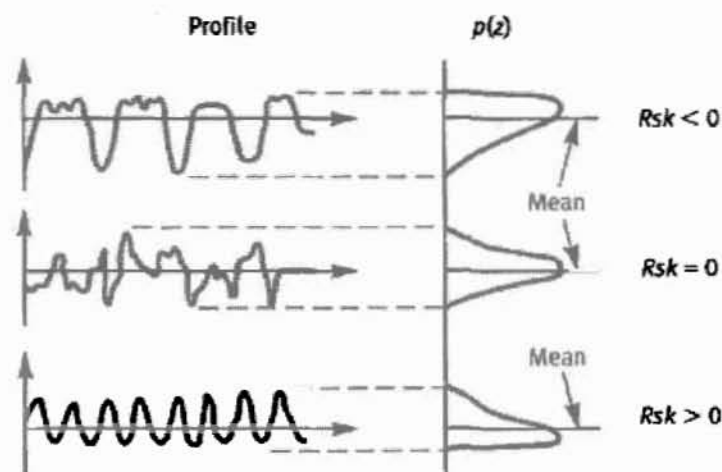
όπου το σ είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος.

Η συνάρτηση κατανομής των υψών, $p(y)$, χαρακτηρίζει τη γεωμετρική φύση της επιφάνειας και μεταβάλλεται όταν η επιφάνεια φορτίζεται, φθείρεται κ.α. Η καμπύλη φέρουσας επιφάνειας δίνει σημαντικές πληροφορίες για την πραγματική επιφάνεια επαφής δυο σωμάτων (ο αριθμός των πραγματικών σημείων επαφής).

- Τρίτη κεντρική ροπή R_{sk} (λοξότητα). Η σχέση που μας δίνει την τρίτη κεντρική ροπή είναι η παρακάτω :

$$R_{sk} = \int_{-\infty}^{\infty} p(y)^3 dy \quad (4.8)$$

Το μέγεθος αυτό εκφράζει την τυπική απόκλιση των αποστάσεων των κορυφών από τη κεντρική γραμμή (Σχήμα 4-14) [28].



Σχήμα 4-14. Τρεις χαρακτηριστικές επιφάνειες με διαφορετικές τιμές λοξότητας R_{sk}

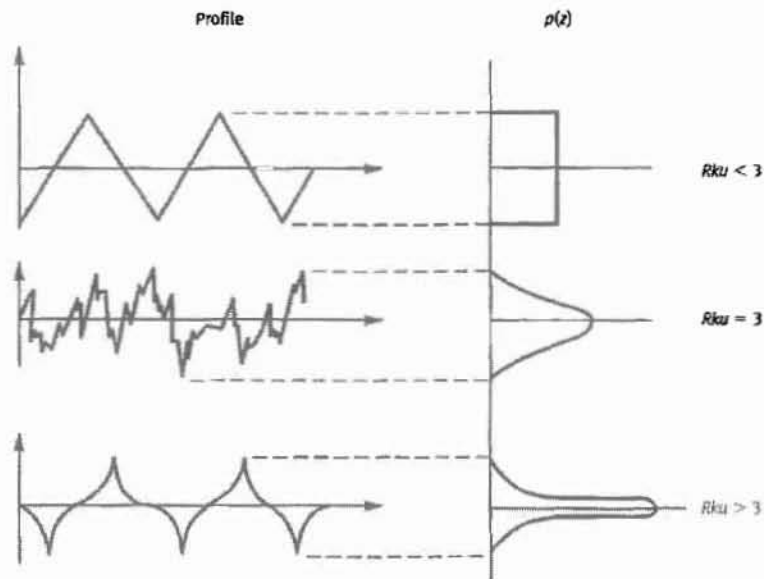
- Τέταρτη κεντρική ροπή R_{ku} (κύρτωση), που δίνεται από τη παρακάτω σχέση και απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 4-15 [28]:

$$R_{ku} = \int_{-\infty}^{\infty} p(y)^4 dy \quad (4.9)$$

Αυτά τα μεγέθη χρησιμοποιούνται για να προσδώσουν μια εκτίμηση για την κυματομορφή της επιφάνειας ή να την χαρακτηρίσουν στην περίπτωση ανωμαλιών μεγάλου



ύψους οπότε η Ra σαν μέσος όρος δε δίνει αρκετά σαφή ένδειξη ύπαρξης τέτοιων επιφανειακών ανωμαλιών.



Σχήμα 4-15. Τρεις χαρακτηριστικές επιφάνειες με διαφορετικές τιμές κύρτωσης Rku

Κεφάλαιο 5 Πειραματική μεθοδολογία

«Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου είναι α) να παρουσιάσει το υλικό μελέτης, την μεθοδολογία και τις πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας β) να παρουσιάσει τις πειραματικές σειρές που διεξήχθησαν για τον προσδιορισμό της επίδρασης της διάβρωσης στην τοπογραφία της επιφάνειας κράματος χαλκού/κασσίτερου/κασσίτερου CuSn12 καθώς και για την μελέτη των πιθανών μηχανισμών που προκαλούν την επίδραση αυτή.»

5.1 Εισαγωγή

Για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας δοκίμια κράματος χαλκού/κασσίτερου εκτέθηκαν σε εργαστηριακό διαβρωτικό περιβάλλον που προσομοιάζει θαλάσσιες συνθήκες (G44-94 κατά ASTM) [29]. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εν λόγω δοκιμές οργανώθηκαν και πραγματοποιήθηκαν τόσο η μελέτη των επιφανειών διάβρωσης όσο και οι μετρήσεις τραχυμέτρησης. Στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά το υλικό μελέτης, η μεθοδολογία και οι αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας

5.2 Μέθοδοι και υλικά

5.2.1 Υλικό

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε για το κράμα χαλκού-κασσίτερου CuSn12, το οποίο κυρίως χρησιμοποιείται σε μηχανουργικές εφαρμογές του κατασκευαστικού-βιομηχανικού κλάδου. Το κράμα αυτό του χαλκού ανήκει στην σειρά C9XXXX (κατά UNS)

που περιλαμβάνει κυρίως τις χυτές δομές του κραματικού συστήματος χαλκού-κασσίτερου (Cu-Sn). Στον πίνακα 5-1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κυριότερες τυποποιήσεις/πιστοποιήσεις του κράματος CuSn12 σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, αντίστοιχα.

Εθνικές Πιστοποιήσεις		
Γερμανία	DIN	G-CuSn12 / 2.1052
Γαλλία	NF	CuSn12 / CuSn12 P UE12P
Μεγάλη Βρετανία	BS	PB2
Ιταλία	UNI	CuSn12
Σουηδία	SS	CuSn12
Ελβετία	SNV	5465
Ισπανία	UNE	CuSn12

Χώρα	Πιστοποίηση	Κατηγορία
Ευρώπη	EN	CuSn12-C / CC483KK
Η.Π.Α	ASTM(UNS)	C90800
Ιαπωνία	JIS	PBC2C
Διεθνώς	ISO	CuSn12

Πίνακας 5-1: Τυποποιήσεις κράματος CuSn12 σε εθνικό και διεθνές επίπεδο

Η χημική σύσταση καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος CuSn12 δίνονται στους Πίνακες 5-2 και 5-3, αντίστοιχα. Στους ίδιους πίνακες παρατίθενται τα αντίστοιχα όρια προδιαγραφών των προαναφερθέντων δεδομένων βάσει πιστοποίησης.

Χημικά Στοιχεία (%)												
	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Al	Si	Mn	P	S	Sb
X.A	87.79	11.17	0.31	0.48	0.03	0.14	-	-	-	0.05	0.01	0.01
Πιστοποίηση κατά UNS/ASTM/EN												
Min	85.0	11.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	88.5	13.0	0.7	0.5	0.2	2.0	0.01	0.01	0.2	0.6	0.05	0.15

Πίνακας 5-2: Χημική σύσταση δοκιμίων CuSn12 (κατά βάρος %) με βάση τις χημικές αναλύσεις (X.A) και τις αντίστοιχες προδιαγραφές πιστοποίησης

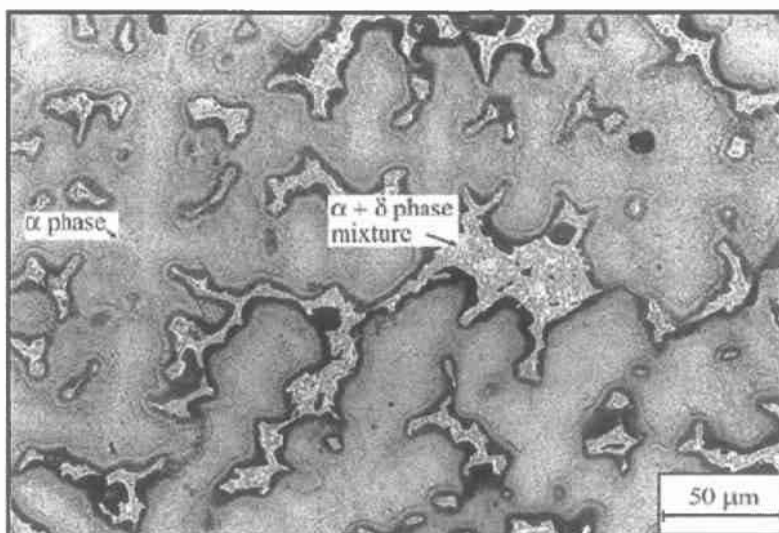
Μηχανικές ιδιότητες					
	Σκληρότητα κατά Brinell	Όριο θραύσης (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Παραμόρφωση (%)	Πυκνότητα (g/cm ³)
	94	-	-	-	-
Ελάχιστες απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες κατά UNS/ASTM/EN					
Min	95-110	275-320	145-170	6-15	8.8

Πίνακας 5-3: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων CuSn12 με βάση τον προμηθευτή και τις αντίστοιχες προδιαγραφές πιστοποίησης

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του, το κράμα CuSn12 διαθέτει πολύ καλές φυσικές και χημικές ιδιότητες (θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα), μεγάλη δυνατότητα συγκόλλησης και υψηλή αντοχή στη διάβρωση (Πίνακας 5-2). Ωστόσο, βασικό χαρακτηριστικό των κραμάτων αυτής της σειράς αποτελεί η αντίσταση τους στην τριβή ως αποτέλεσμα της μεγάλης περιεκτικότητας που διαθέτουν σε κασσίτερο [30-31]. Επιπλέον παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλη ικανότητα να επιδέχονται μεγάλες φορτίσεις κάτω από την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών. Έτσι τα κράματα CuSn (με 10-12% περιεκτικότητα σε Sn)

χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή μηχανικών εξαρτημάτων, ως εξαρτήματα αντοχής σε οξείδωση όπως έλικες πλοίων, εξαρτήματα χημικών βιομηχανιών κ.λ.π.

Τέλος, στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται η τυπική μικροδομή του χυτού κράματος CuSn12 σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM [32]. Στις περιπτώσεις το κράμα CuSn12 είναι διφασικό και αποτελείται από την πλειοψηφούσα α -φάση που αναπτύσσεται δενδριτικά και την μειοψηφούσα ευκτηκτοειδή ($\alpha+\delta$) φάση (βλέπε Κεφάλαιο 3).



Σχήμα 5-1: Τυπική μικροδομή του χυτού κράματος CuSn12 σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM [31].

5.2.2 Προετοιμασία δοκιμίων

Το κράμα χαλκού/κασσίτερου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα παραλείφθηκε υπό μορφή μπιγιέτας (ράβδος), κυκλικής διατομής διαμέτρου 120 mm, μήκους 1.0 m και πάχους 15mm αντίστοιχα.

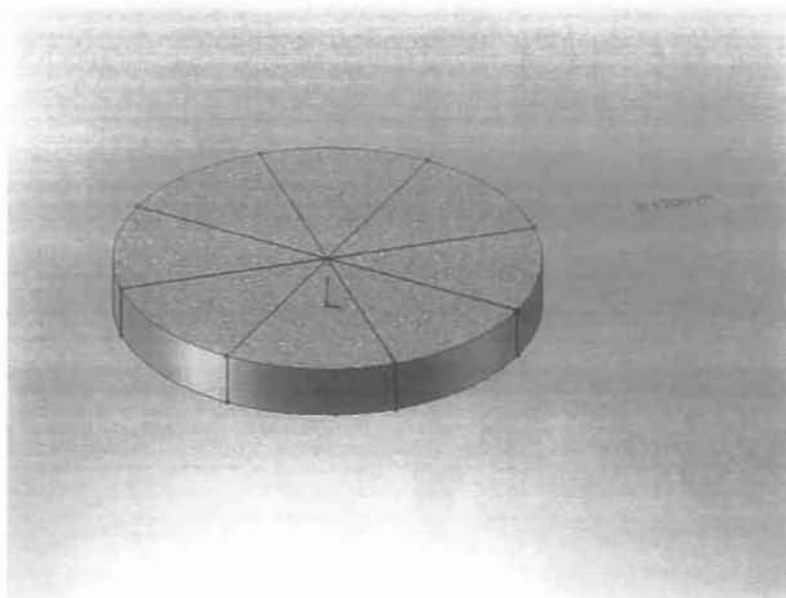
Ακολούθησε πειραματική κοπή των μπιγιετών στο εργαστήριο Εργαστηρίου Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας με χρήση τόρνου. Όλες οι κοπές έγιναν με τις ίδιες συνθήκες κατεργασίας, με τα ίδια εργαλεία και στο ίδιο κέντρο κατεργασίας για διάφορες τιμές ταχυτήτων κοπής, βάθους κοπής και

προώσεως. Οι αναλυτικές τιμές των τεσσάρων διαφορετικών πειραματικών συνθηκών τόνρευσης που χρησιμοποιήθηκαν στο κράμα χαλκού/κασσίτερου που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και από τις οποίες προέκυψαν αντίστοιχα οι τέσσερις διαφορετικές επιφάνειες που θα χρησιμοποιηθούν στις περαιτέρω διαδικασίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4.

Σειρά κοπής δοκιμίων	Συνθήκες κοπής κατά την κατεργασία τόνρευσης			
	Αριθμός τεμαχίων	Βάθος a (mm)	Πρόωση s (mm/rev)	Ταχύτητα v (mm/min)
1	6	0.5	0.4	0.156
2	6	0.5	0.2	0.156
3	6	0.5	0.4	0.186
4	6	0.5	0.2	0.039

Πίνακας 5-4. Συνθήκες κατεργασίας τόνρευσης των τεσσάρων ληφθέντων επιφανειών

Στην συνέχεια, ακολούθησε ο τεμαχισμός του κάθε τόνρευμένου φύλλου σε 8 ίσα τεμάχια (δοκίμια) (Σχήμα 5-1), σύνολο 32 δοκίμια, με χρήση του μικροτομογράφου του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας τύπου Struers Accutom-5.



Σχήμα 5-2. Διάταξη κοπής και διαστάσεις δοκιμίων διάβρωσης

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκίμια ανά σειρά κοπής δηλαδή συνολικά 24 δοκίμια. Για την διερεύνηση της επίδρασης της μηχανουργικής αφαίρεσης υλικού στην διάβρωση αυτών μελετήθηκαν 4 διαφορετικές σειρές κοπής τórνευσης δοκιμίων. Τα έξι δοκίμια της κάθε σειράς κοπής αντιστοιχούν σε έξι διαφορετικούς χρόνους διάβρωσης και ταξινομούνται σύμφωνα με τον Πίνακα 5-5.

Σειρά κοπής δοκιμίων	Διάρκεια Πειραματικής Διαδικασίας (Ημέρες)					
	15	30	45	60	75	90
1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6

Πίνακας 5-5: Πίνακας ταξινόμησης των δοκιμίων κράματος χαλκού/κασσίτερου για τα πειράματα διάβρωσης

Τα υπόλοιπα 16 δοκίμια ή ένα δοκίμιο ανά σειρά κοπής (αντίδειγμα) δεν χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή διαδοχικών εμβαπτίσεων και παρέμειναν ως δοκίμια ασφαλείας σε περίπτωση λάθους ή πιθανούς αστοχίας της πειραματικής διαδικασίας. Στην συνέχεια, ανοίχθηκαν οπές στα υπόλοιπα μεταλλικά δοκίμια με χρήση δραπάνου τύπου IBARMIA 1B-35-P έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η ολική εμβάπτισή τους εντός των διαβρωτικών διαλυμάτων κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων πειραμάτων διάβρωσης.

Στην συνέχεια απομακρύνθηκαν τα παραχθέντα προϊόντα κοπής και διάτρησης που ήταν προσκολλημένα στις ακμές και τα δοκίμια αφού ταξινομήθηκαν, καθαρίστηκαν επιμελώς για την απομάκρυνση τυχόν λιπαντικών ακαθαρσιών και τελικώς ζυγίστηκαν. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε τραχυμέτρηση της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων για να προσδιορισθούν κατάλληλα οι κυριότεροι παράμετροι της τραχύτητας των επιφανειών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Για την δοκιμή τραχυμέτρησης χρησιμοποιήθηκε προφιλόμετρο τύπου στυλίσκου της εταιρίας Taylor-Hobson® (Surtronic 3+) που βρίσκεται στο χώρο του Εργαστηρίου Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας ενώ η πολυκριτηριακή επεξεργασία των αποτελεσμάτων τραχυμέτρησης που προέκυψαν πραγματοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με χρήση του εμπορικά διαθέσιμου λογισμικού πακέτου Talysurf.

Τέλος, πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια στερεοσκοπική ανάλυση των επιφανειών τους έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της κατάστασης των επιφανειών πριν και μετά το πέρας των πειραμάτων διάβρωσης τους.

5.3 Πειράματα διάβρωσης

Για τον ακριβή προσδιορισμό της ικανότητας αντίστασης των μετάλλων και των κραμάτων τους σε διάφορα είδη διάβρωσης, έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα διάφορα

πρότυπα επιταχυνόμενης διάβρωσης σε εργαστηριακό επίπεδο. Τα πρότυπα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο από τις κατασκευαστικές όσο και από άλλες βιομηχανίες. Σκοπός των ελέγχων διάβρωσης είναι:

- Να επιτρέψουν πιθανή πρόβλεψη/αστοχία της συμπεριφοράς του υλικού κατά τη διάρκεια ζωής του.
- Να καθορίζουν τις ιδιότητες του υλικού όπως π.χ. η αντοχή σε περικρυσταλλική διάβρωση και σε κατάρρευση με διάβρωση λόγω επιβολής τάσεων.
- Να κάνουν συγκρίσεις της αντοχής σε διάβρωση υπό διαφορετικές συνθήκες.
- Να διευκρινίζουν τη προέλευση των αντιδράσεων διάβρωσης.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για την εργαστηριακή προσομοίωση της διάβρωσης γίνεται συνήθως εμπειρικά. Μια επιταχυνθείσα δοκιμή διάβρωσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστη όταν επιταχύνει κατά το ίδιο ποσοστό όλες τις διεργασίες οι οποίες υποβαθμίζουν το υλικό. Ο γενικός κανόνας για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου είναι το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η επιταχυνθείσα διάβρωση να προσομοιώνει όσον το δυνατόν πιστότερα το περιβάλλον λειτουργίας του υπό εξέταση υλικού.

Οι κυριότερες δοκιμές πειραμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης που εφαρμόζονται επιτυχώς μέχρι σήμερα είναι:

(α) η τεχνική της διάβρωσης αποφλοιώσεως (*Exfoliation Corrosion test*),

(β) η τεχνική της αλατονέφωσης (*Salt Spray test*),

(γ) η τεχνική της εναλλακτικής εμβάπτισης/εμβύθισης (*Alternate Immersion test*),

(δ) η τεχνική της κυκλικής έκθεσης σε όξινη αλατονέφωση (*Cyclic Acidified Salt Fog*),

(ε) η τεχνική της περικρυσταλλικής διάβρωσης (*Intergranular Corrosion*).

5.3.1 Λοκιμή εναλλακτικής εμβάπτισης/εμβύθισης (*Alternate Immersion test*)

Στην παρούσα εργασία, για την διάβρωση των δοκιμίων του κράματος του χαλκού επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη εργαστηριακή δοκιμή της εναλλακτικής εμβάπτισης. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε για δύο κυρίως λόγους α) με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση βρέθηκε ότι η δοκιμή αυτή προσομοιώνει με ικανοποιητικό τρόπο στο εργαστήριο την φυσική διάβρωση των κραμάτων χαλκού, κυρίως σε ότι αφορά στα χαρακτηριστικά της διαβρωμένη επιφάνεια διάβρωσης σε θαλάσσιο περιβάλλον και β) επιτυγχάνεται ομοιόμορφη και ισότροπη διάβρωση καθ'όλη την εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων.

Έτσι, οι εργαστηριακές δοκιμές επιταχυνθείσας διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας σύμφωνα με την προδιαγραφή G44-94 κατά ASTM [33]. Εφαρμόζεται κυρίως σε κράμματα αλουμινίου και χάλυβα αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα μεταλλικά υλικά. Η δοκιμή προσομοιάζει πραγματικά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση σκοπός της δοκιμής ήταν να προσδιοριστεί η αντοχή στη διάβρωση της διαβρωμένης επιφάνειας του κράματος χαλκού/κασσίτερου CuSn12 σε θαλασσινό περιβάλλον και η σχέση της με τις επιφανειακές τοπογραφίες των δοκιμίων όπως διαμορφώθηκαν από τις διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας/αποβολής υλικού.

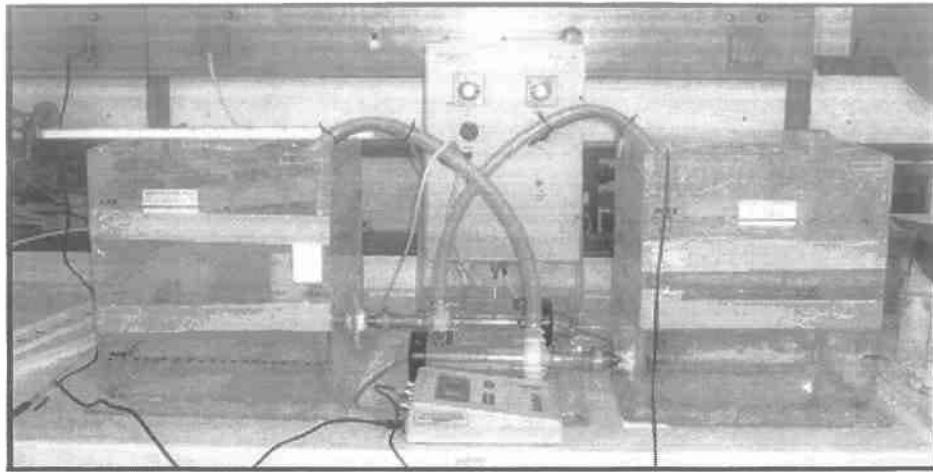
5.3.2 Πειραματική διάταξη

Το πείραμα της επιταχυνόμενης διάβρωσης με διαδοχικές εμβάπτισεις πραγματοποιείται κάτω από συνεχείς συνθήκες καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δυο δεξαμενές διαστάσεων (cm) 310x360x360 έκαστης χωρητικότητας 30 L (Σχήμα 5-3). Οι δεξαμενές αυτές είναι κατασκευασμένες από αδρανές plexiglass ώστε να μην προκύπτουν περαιτέρω προϊόντα αναδιάλυσης τα οποία

μπορεί να επηρεάσουν την πειραματική διαδικασία. Στο μέσο των δεξαμενών υπάρχουν επίσης δυο ειδικές αντλίες μεταφοράς των διαβρωτικών διαλυμάτων, τύπου IWAKI Magnet pump ο ρόλος των οποίων είναι να μεταφέρουν το διαβρωτικό διάλυμα από τη μία δεξαμενή στην άλλη υπό συνεχείς συνθήκες με χρήση δύο χρονοδιακοπών. Η δεξαμενή που περιέχει τα δοκίμια παραμένει γεμάτη για 10 λεπτά και η άλλη για 50 λεπτά ώστε να πραγματοποιείται ο επαναλαμβανόμενος κύκλος του πειράματος. Το άδειασμα και το γέμισμα των δεξαμενών πραγματοποιείται σε διάστημα λιγότερο των 2 λεπτών από τη στιγμή που τα δοκίμια καλύπτονται ή απομακρύνονται από το νερό. Σε κάθε δεξαμενή υπάρχουν αισθητήρες που διακόπτουν τη λειτουργία της αντλίας που αδειάζει τη δεξαμενή όταν το διάλυμα φτάσει σε μια ελάχιστη στάθμη έτσι ώστε να μην εισέρχεται αέρας στην αντλία και να μην υπερχειλίζει η άλλη δεξαμενή.

Τα 24 δοκίμια συγκρατούνται στη μια δεξαμενή με μη μεταλλικά στηρίγματα, και δένονται με μεσινέζα σε πλαστικές ράβδους που στηρίζονται στην κορυφή της δεξαμενής. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η συνολική επαφή με το διάλυμα των δοκιμίων, δεν εμποδίζεται η ροή του αέρα με αποτέλεσμα να μην αργούν να στεγνώσουν τα δοκίμια και επίσης δεν διατηρούνται σταγόνες διαλύματος πάνω στα δοκίμια εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την επαφή των δοκιμίων μεταξύ τους και με τη δεξαμενή.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων η θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερή στους $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ενώ η υγρασία του αέρα κυμάνθηκε σε ουδέτερα επίπεδα ($45 \pm 10\%$).



Σχήμα 5-3: Πειραματική διάταξη

5.3.3 Πειραματική Διαδικασία

Το πείραμα της επιταχυνόμενης διάβρωσης με διαδοχικές εμβαπτίσεις είναι συνεχόμενο και περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενους κύκλους διάρκειας μιας ώρας εντός της οποίας υπάρχει μια περίοδος 10min κατά την οποία τα δοκίμια είναι εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3.5% NaCl και μια περίοδος 50 λεπτών κατά την οποία τα δοκίμια στεγνώνουν σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Ο παραπάνω κύκλος επαναλαμβάνεται όλο το εικοσιτετράωρο για χρονικό διάστημα έως 90 ημέρες ή και περισσότερες αν χρειαστεί, ανάλογα με το προς διάβρωση υλικό, τις συνθήκες του διαλύματος και του αέρα του περιβάλλοντος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το πείραμα διήρκησε συνολικά 90 ημέρες, διάστημα που κρίθηκε άκρως ικανοποιητικό για τη μελέτη της συμπεριφοράς της διαβρωμένης επιφάνειας στο συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της προδιαγραφής που χρησιμοποιήθηκε .

Προετοιμασία διαλύματος εργασίας. Το διάλυμα του χλωριούχου νατρίου χρησιμοποιήθηκε ως διαλύτης για την προετοιμασία των υδατικών διαλυμάτων προσομοίωσης θαλάσσιου περιβάλλοντος. Το διάλυμα αυτό άλατος παρασκευάστηκε διαλύοντας 3.5 μέρη κατ. όγκον

χλωριούχου νατρίου (NaCl) σε 96.5 μέρη απεσταγμένου ύδατος. Το pH του παραγόμενου διαλύματος ρυθμίστηκε να λαμβάνει τιμές από 6.4-7.2. Η ρύθμιση του pH πραγματοποιήθηκε με την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας αναλυτικών αντιδραστηρίων υψηλής καθαρότητας κατά περίπτωση. Η αναλογία μεταξύ της επιφάνειας των δοκιμίων και της ποσότητας του διαλύματος παρέμενε συνεχώς σταθερή καθ'όλη την διάρκεια των πειραμάτων διάβρωσης έτσι ώστε να λαμβάνει τιμή ίση με 35 mL/cm². Κατά περιόδους επιβάλλονταν ρύθμιση/ανανέωση του συνολικού όγκου από πιθανές απώλειες λόγω εξάτμισης.

Καθαρισμός δοκιμίων. Για τον καθαρισμό των δοκιμίων από τα προσκολλημένα προϊόντα της διάβρωσης ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται από την προδιαγραφή G1-90 της ASTM. Σύμφωνα με την προδιαγραφή αυτή, αρχικά γίνεται αφαίρεση των προϊόντων της διάβρωσης με τη χρήση μη μεταλλικής βούρτσας και στη συνέχεια τα δοκίμια εμβαπτίζονται σε διάλυμα 10% HNO₃ θερμοκρασίας 60°C για χρόνο 20 min.

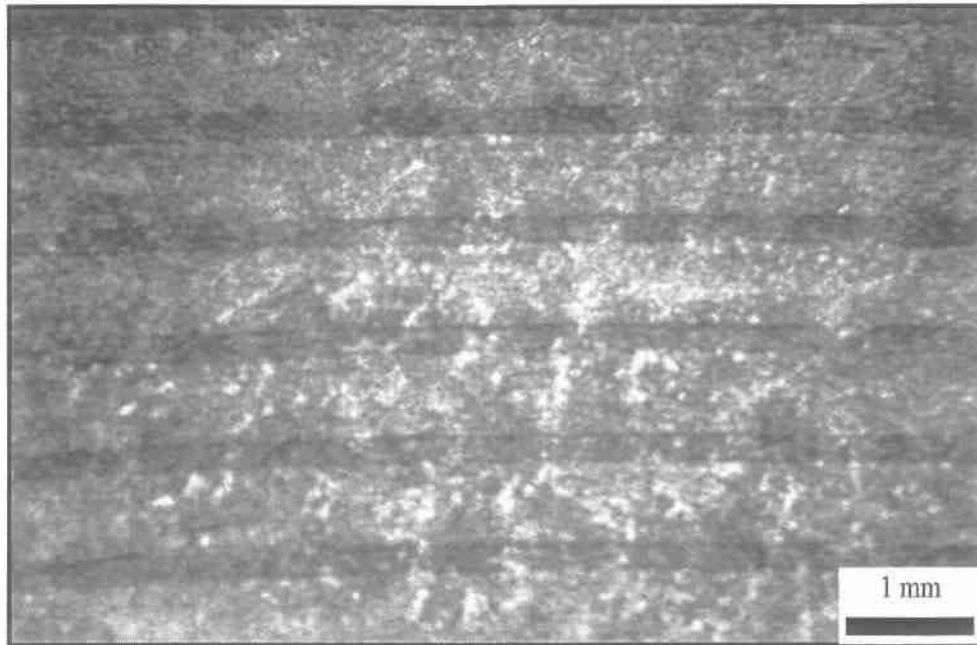
5.3.4 Αποτίμηση διάβρωσης

Για την αποτίμηση της προκληθείσας διάβρωσης λόγω έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον (NaCl 3.5%), δοκίμια του τυποποιημένου κράματος CuSn12, εκτέθηκαν στο περιβάλλον αυτό για 6 διαφορετικές χρονικές περιόδους (15, 30, 45, 60, 75 και 90 μέρες). Κατά την αφαίρεση των δοκιμίων από την πειραματική διάταξη μετά το πέρας των πειραμάτων, ακολουθεί κατά σειρά καθαρισμός, ζύγιση, τραχυμέτρηση και αρχειοθέτηση αυτών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια μακροσκοπικός έλεγχος με χρήση στερεοσκοπίου τύπου Leica WILD M3Z του Εργαστηρίου Υλικών και ψηφιακή απεικόνιση με χρήση φωτογραφικής μηχανής τύπου Leica DC 300. Κατά την απομάκρυνση των δοκιμίων από την πειραματική διάταξη λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα εκκένωση συγκεκριμένης ποσότητας υδατικού διαλύματος έτσι ώστε να επιτυγχάνονται σταθερές συνθήκες καθ'όλη τη

διάρκεια του πειράματος. Στη συγκεκριμένη δοκιμή η ζύγιση των δοκιμίων έγινε με χρήση ηλεκτρονικού ζυγού του Εργαστηρίου Υλικών με ακρίβεια μέτρησης δύο δεκαδικών ψηφίων.

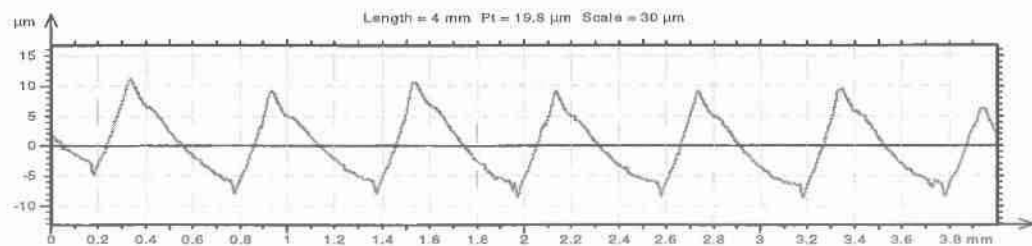
Κεφάλαιο 6 Πειραματικά αποτελέσματα

Δοκίμιο αναφοράς 1.0



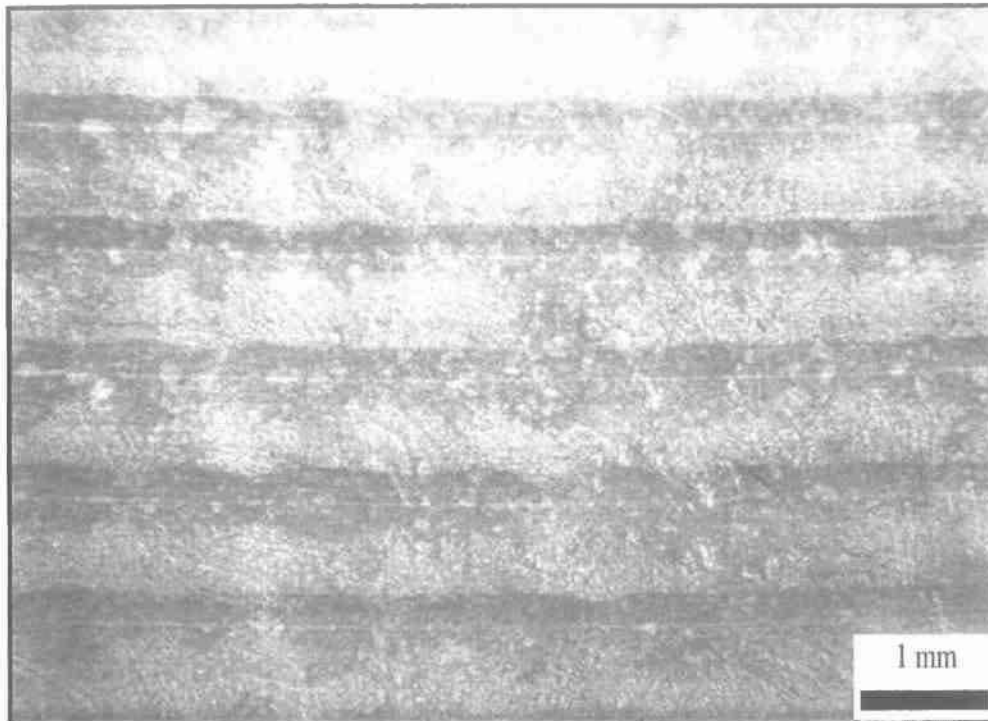
Σχήμα 6-1: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας μη διαβρωμένων δοκιμίων της σειράς 1.

Τραχυμέτρηση δοκιμίου αναφοράς 1.0



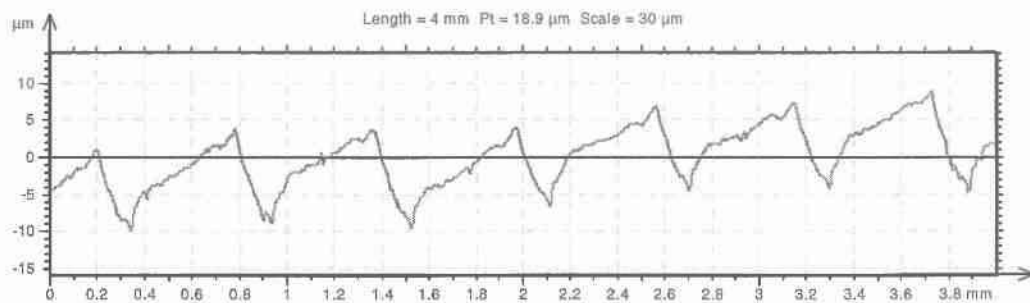
$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$RSm(\text{mm})$	$Wa(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
1.58	10.45	0.412	1.023	0.434	2.12

Δοκίμιο 1.1



Σχήμα 6-2: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 1 μετά από 15 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

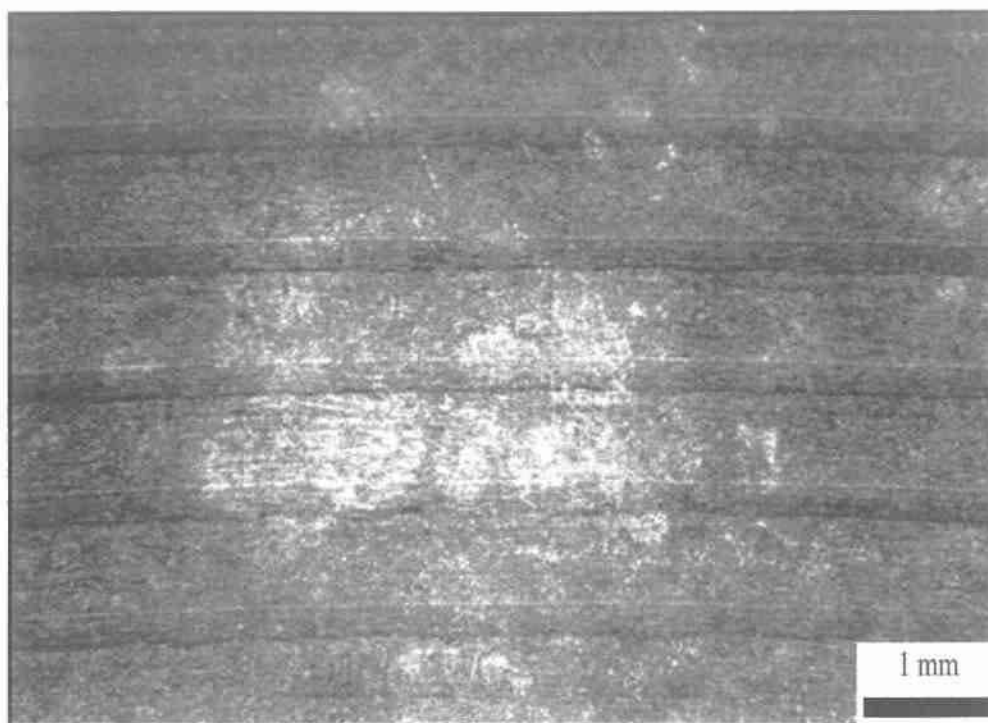
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 1.1



R_a (μm)	R_t (μm)	RSm(mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
2.02	10.05	0.462	1.168	0.415	2.33

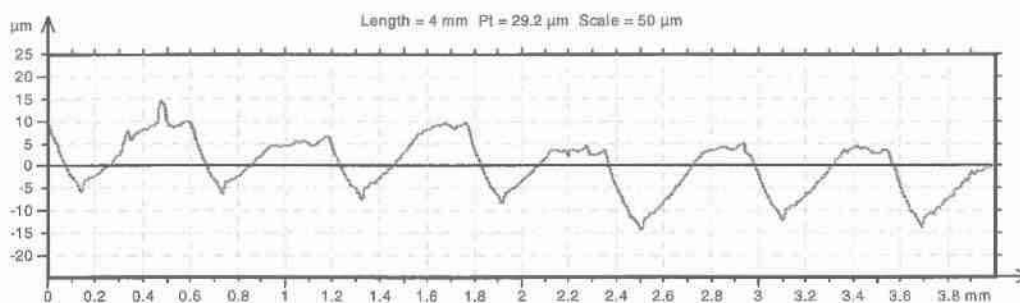
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
65.81	65.74	0.07	0.106

Δοκίμιο 1.2



Σχήμα 6-3: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 1 μετά από 30 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

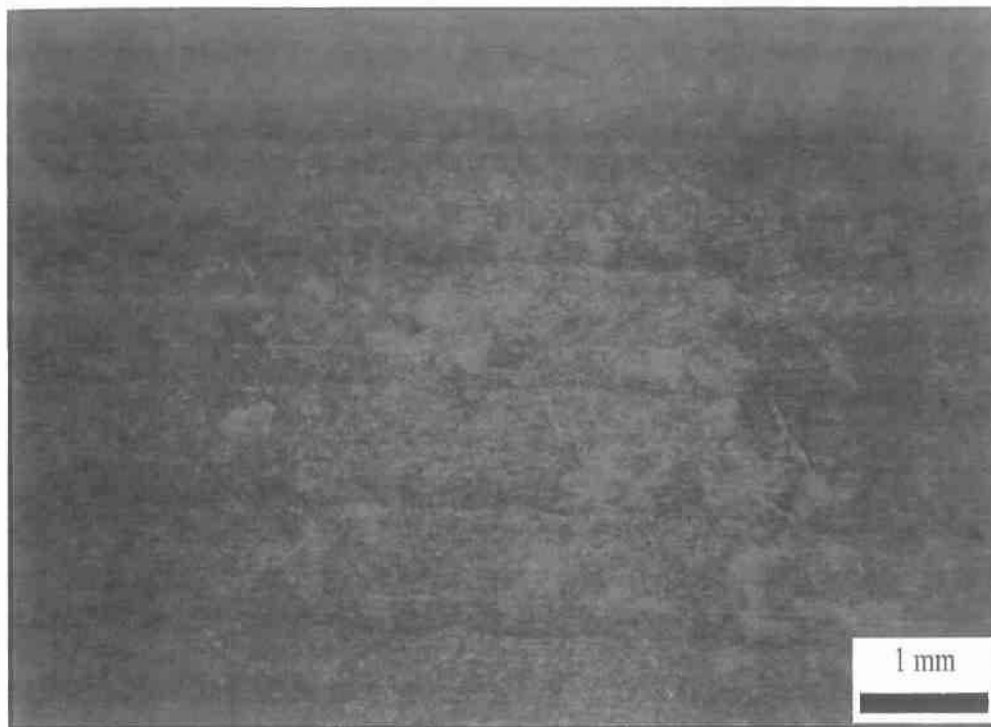
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 1.2



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
2.57	12.89	0.529	1.21	0.22	2.661

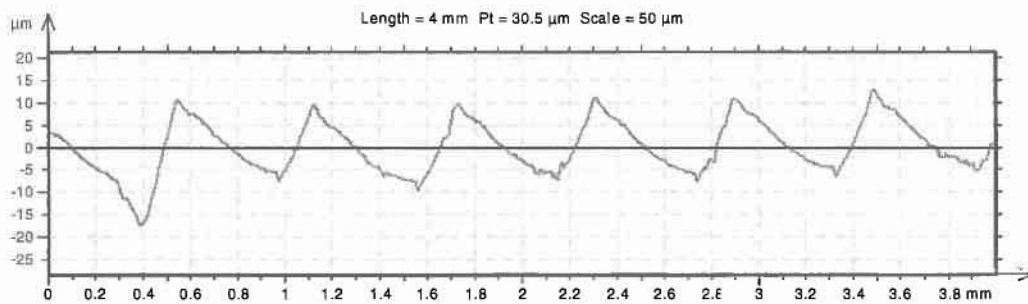
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
63.93	63.84	0.09	0.141

Δοκιμίο 1.3



Σχήμα 6-4: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 1 μετά από 45 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

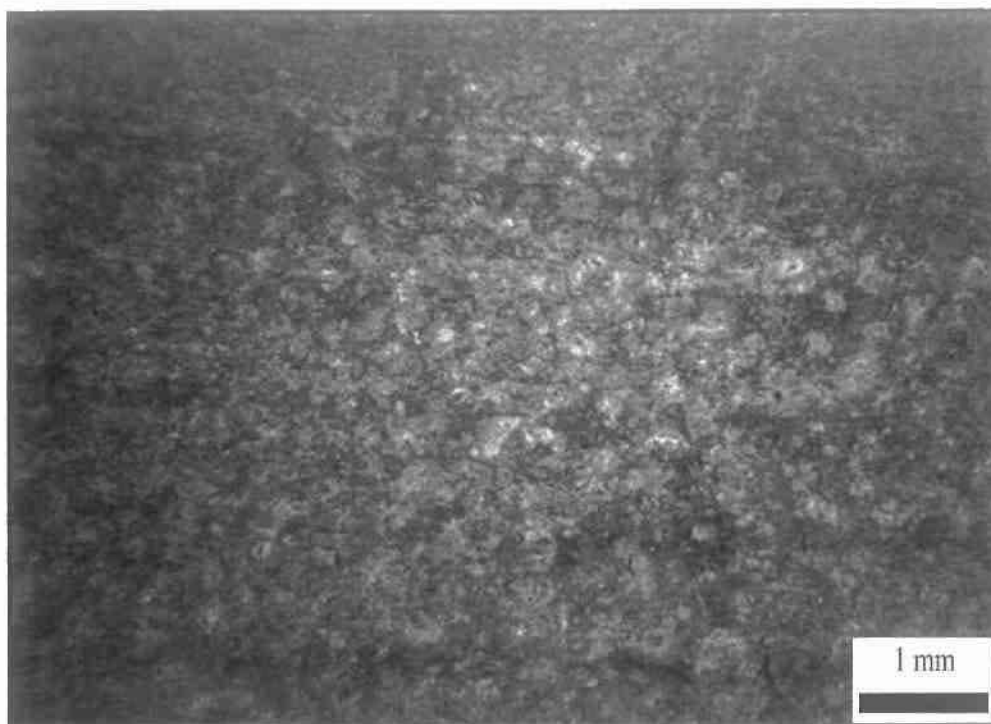
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 1.3



R_a (μm)	R_t (μm)	RSm (mm)	Wa (μm)	R_{sk}	R_{ku}
3.33	15.89	0.579	1.295	0.12	2.04

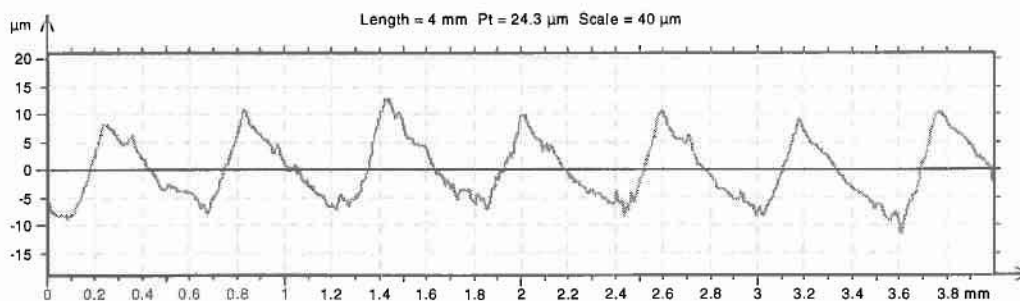
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
65.81	65.71	0.10	0.152

Δοκίμιο 1.4



Σχήμα 6-5: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 1 μετά από 60 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

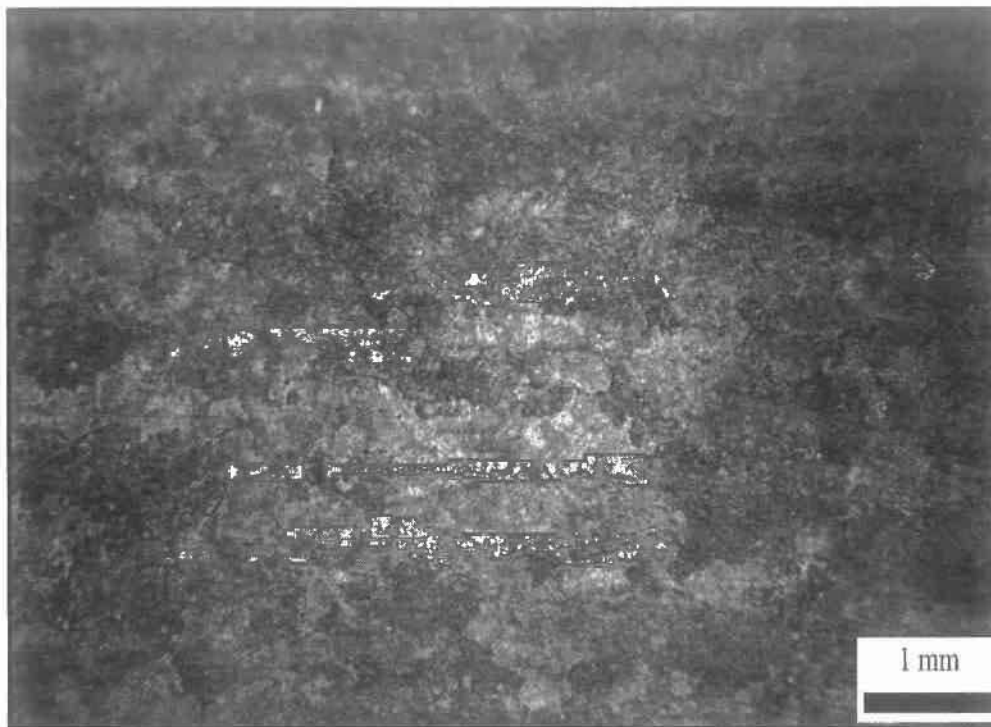
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 1.4



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$RSm(\text{mm})$	$W_{\text{avg}}(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
3.72	16.21	0.566	1.54	0.31	1.93

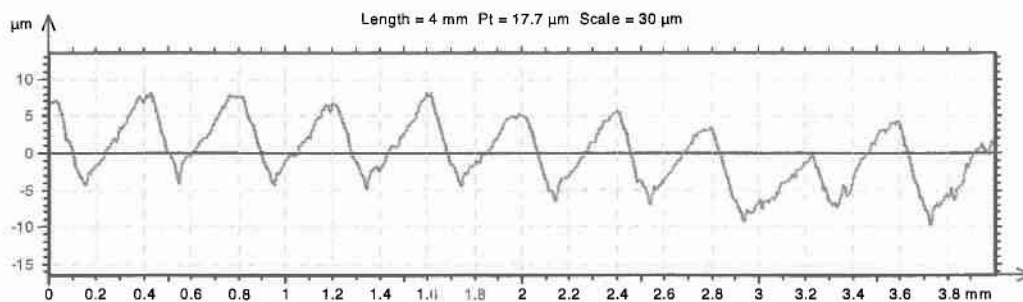
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
57.59	57.47	0.12	0.208

Δοκίμιο 1.5



Σχήμα 6-6: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 1 μετά από 75 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Τραχυμέτρηση δοκιμίου 1.5



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
3.92	16.60	0.587	1.69	0.28	1.87

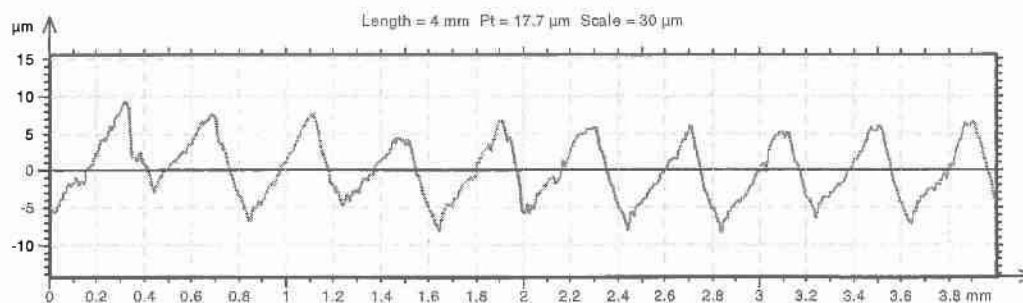
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
56.44	56.30	0.14	0.248

Δοκίμιο 1.6



Σχήμα 6-7: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 1 μετά από 90 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

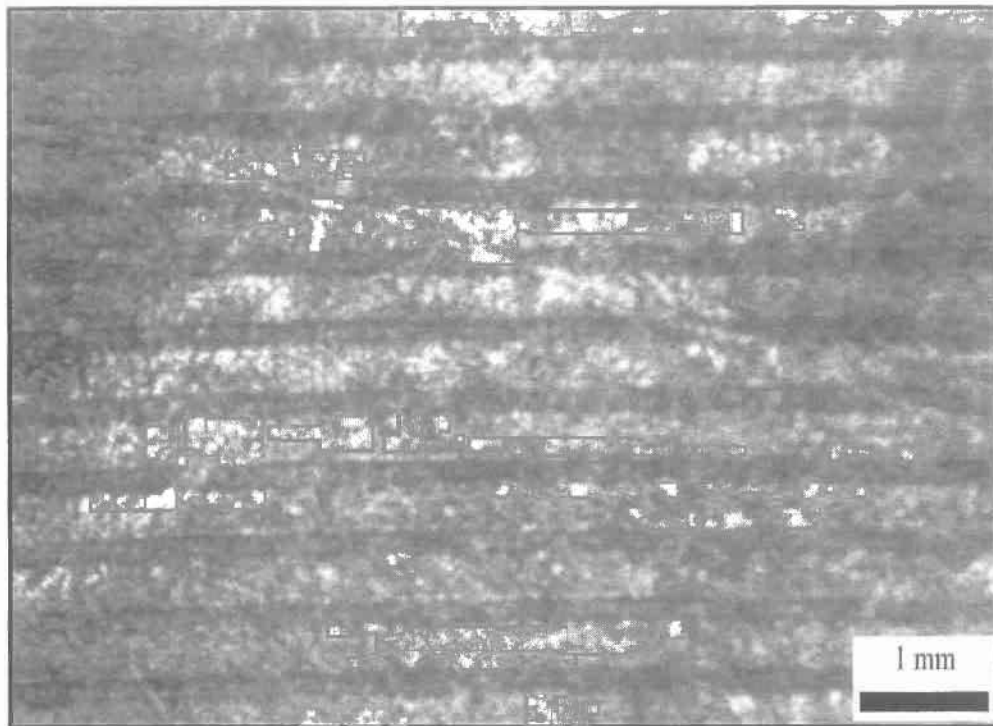
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 1.6



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
4.16	16.88	0.598	1.86	0.29	1.93

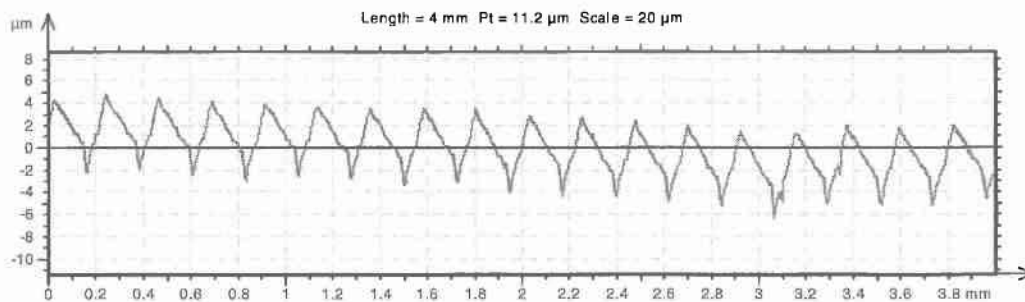
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
60.54	60.36	0.18	0.297

Δοκίμιο αναφοράς 2.0



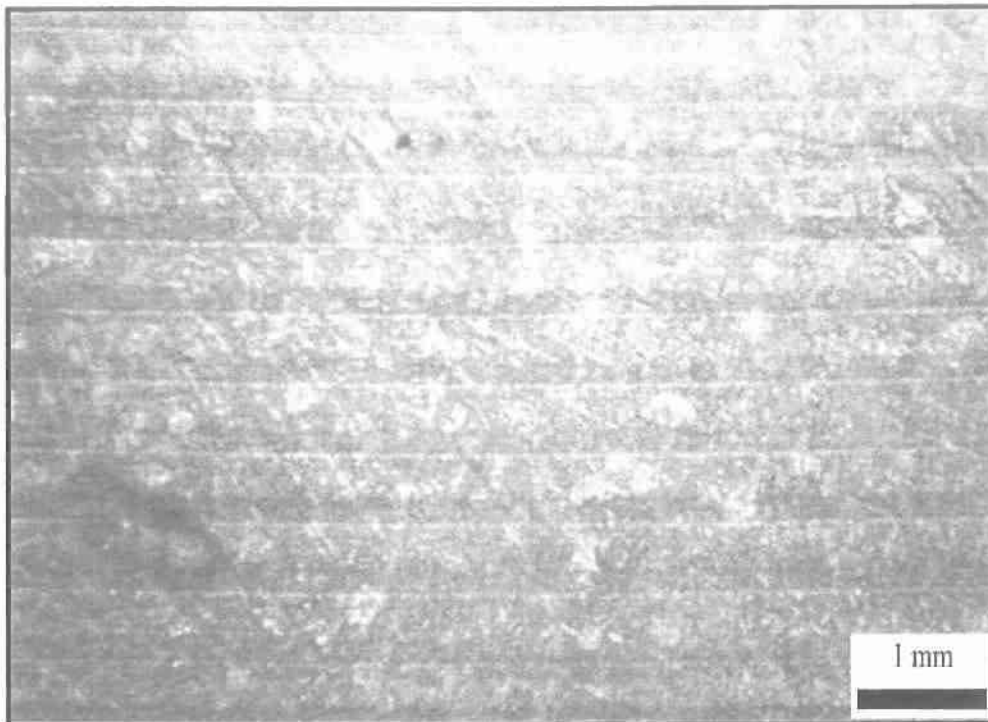
Σχήμα 6-8: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας μη διαβρωμένων δοκιμίων της σειράς 2.

Τραχυμέτρηση δοκιμίου αναφοράς 2.0



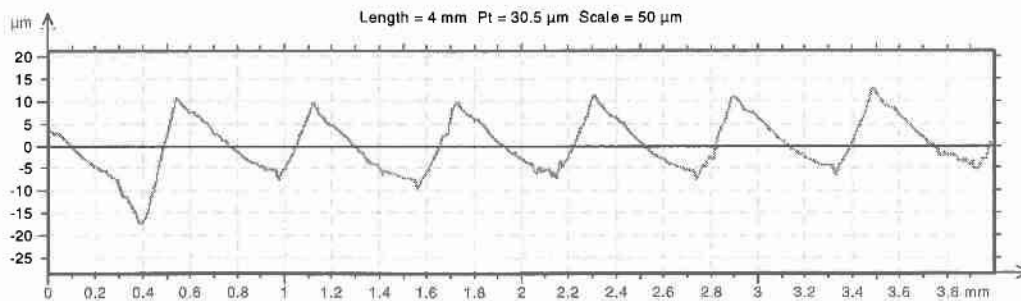
$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	K_{bn}
1.21	7.89	0.201	0.358	-0.18	2.12

Δοκίμιο 2.1



Σχήμα 6-9: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 2 μετά από 15 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

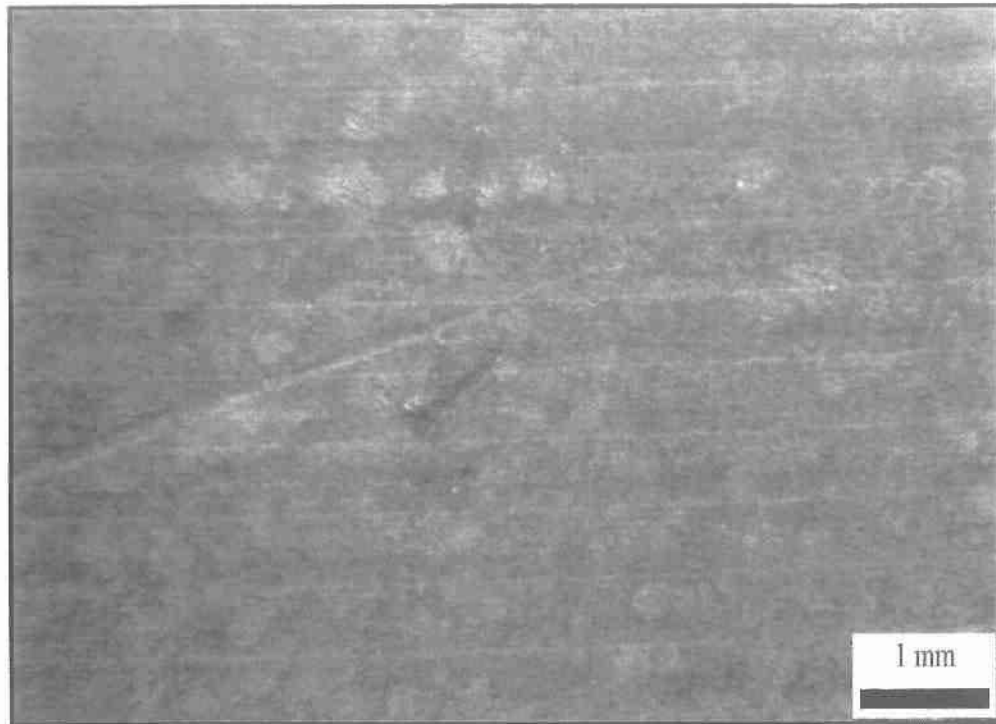
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 2.1



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$RSm(\text{mm})$	$Wa(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
1.43	8.01	0.214	0.374	-0.19	2.31

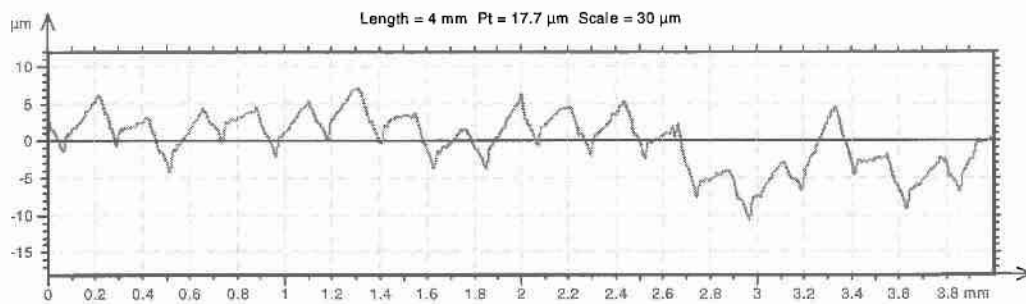
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
62.53	62.48	0.05	0.080

Δοκίμιο 2.2



Σχήμα 6-10: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 2 μετά από 30 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

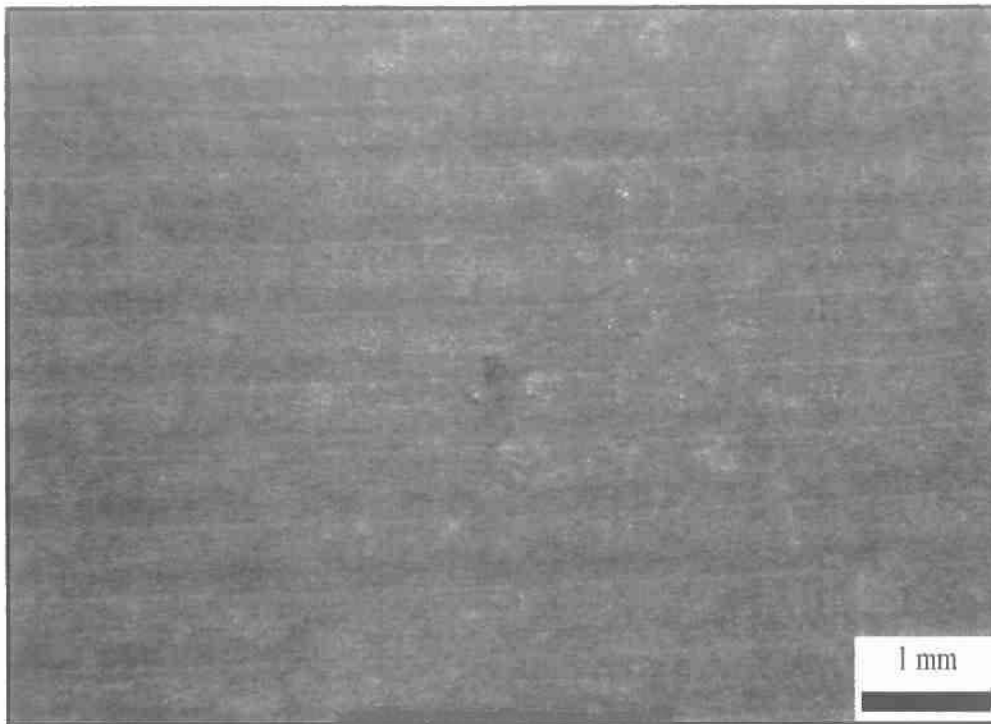
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 2.2



R_a (μm)	R_t (μm)	RSm (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
1.53	7.86	0.209	0.41	-0.24	2.3

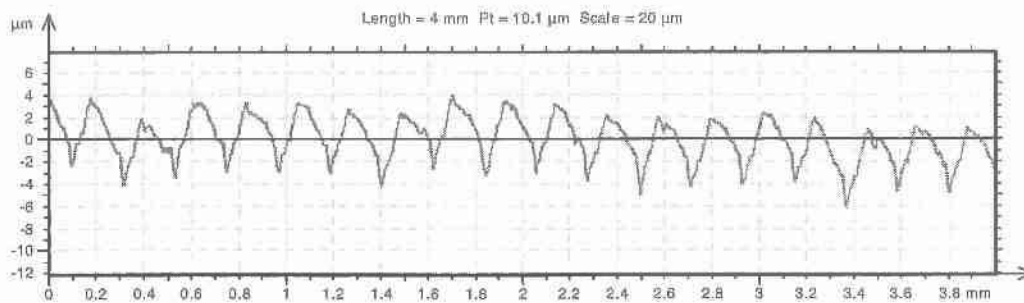
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
66.76	66.70	0.06	0.090

Δοκίμιο 2.3



Σχήμα 6-11: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 2 μετά από 45 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

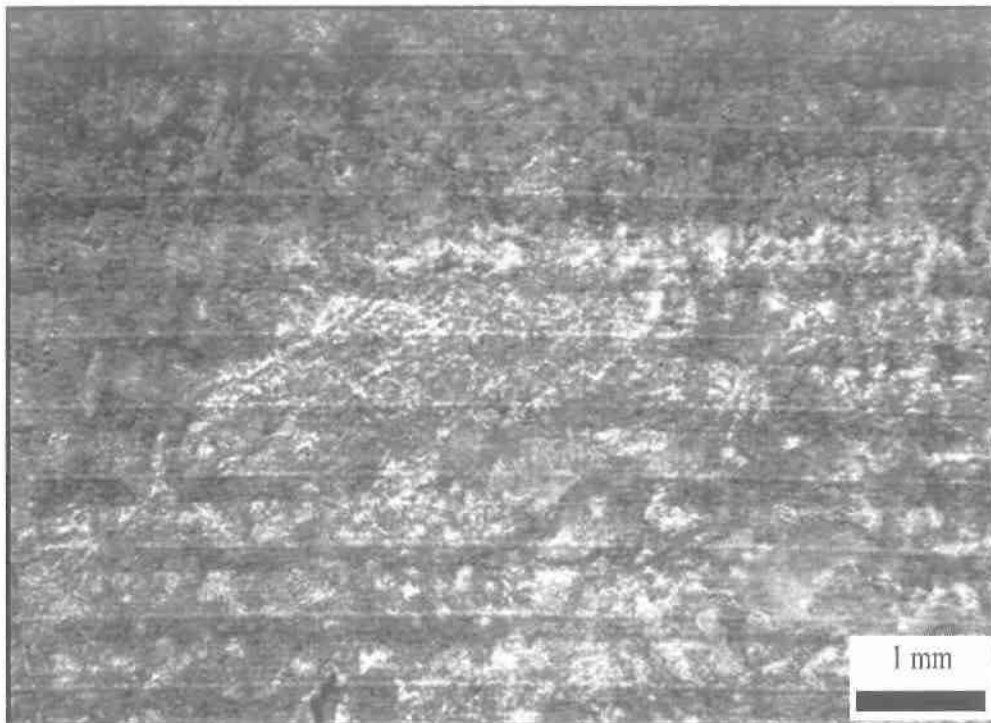
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 2.3



$R_a(\mu\text{m})$	$R_L(\mu\text{m})$	$RSm(\text{mm})$	$Wa_i(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
1.62	7.2	0.22	0.54	-0.41	2.31

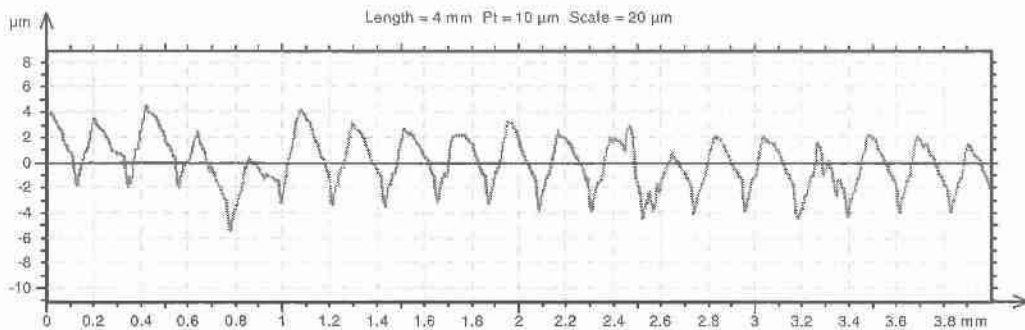
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
76.60	76.53	0.07	0.091

Δοκίμιο 2.4



Σχήμα 6-12: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 2 μετά από 60 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Τραχυμέτρηση δοκιμίων 2.4



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
1.7	7.75	0.217	0.52	-0.49	2.38

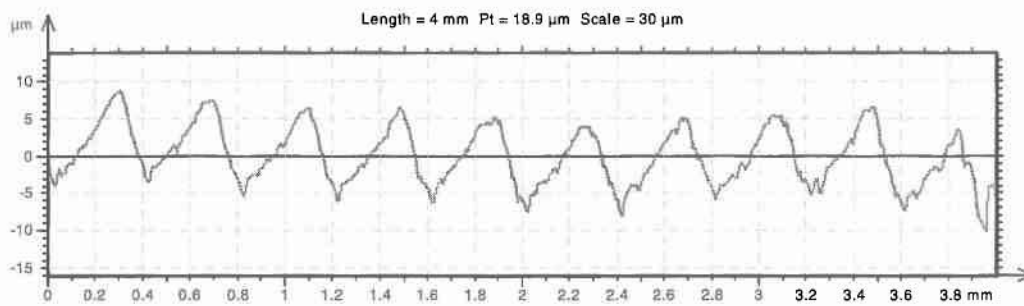
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
74.66	74.57	0.09	0.121

Δοκίμιο 2.5



Σχήμα 6-13: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 2 μετά από 75 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

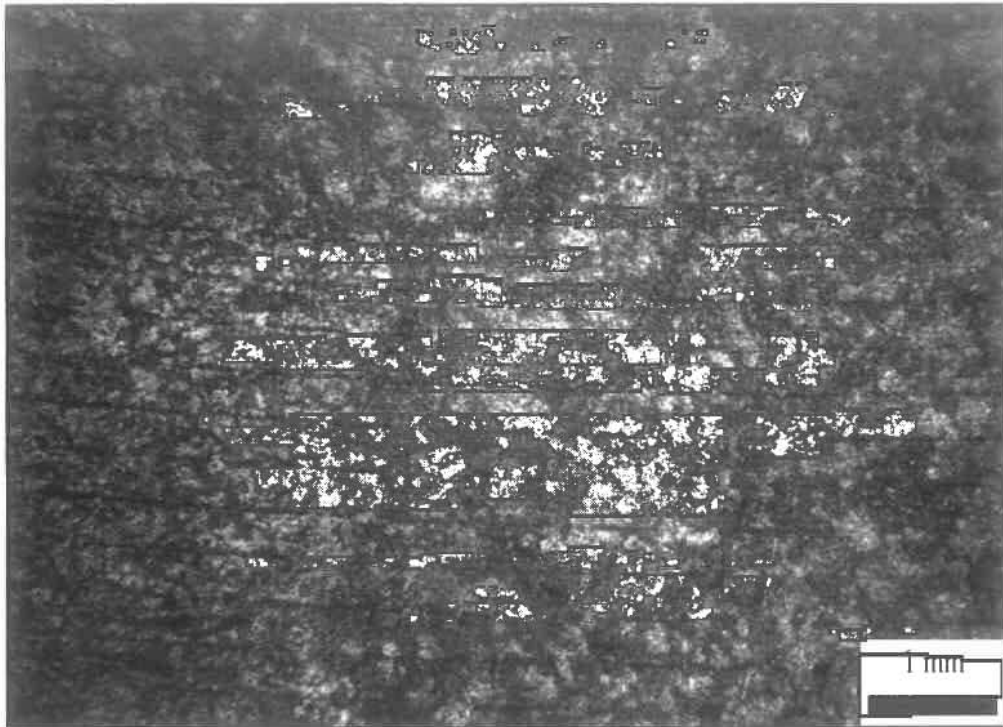
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 2.5



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
1.74	7.86	0.223	0.59	-0.48	2.59

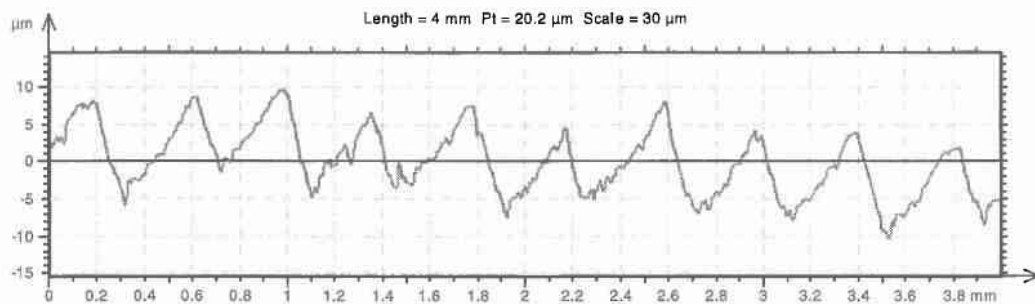
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
85.39	85.28	0.11	0.129

Δοκίμιο 2.6



Σχήμα 6-14: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 2 μετά από 90 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

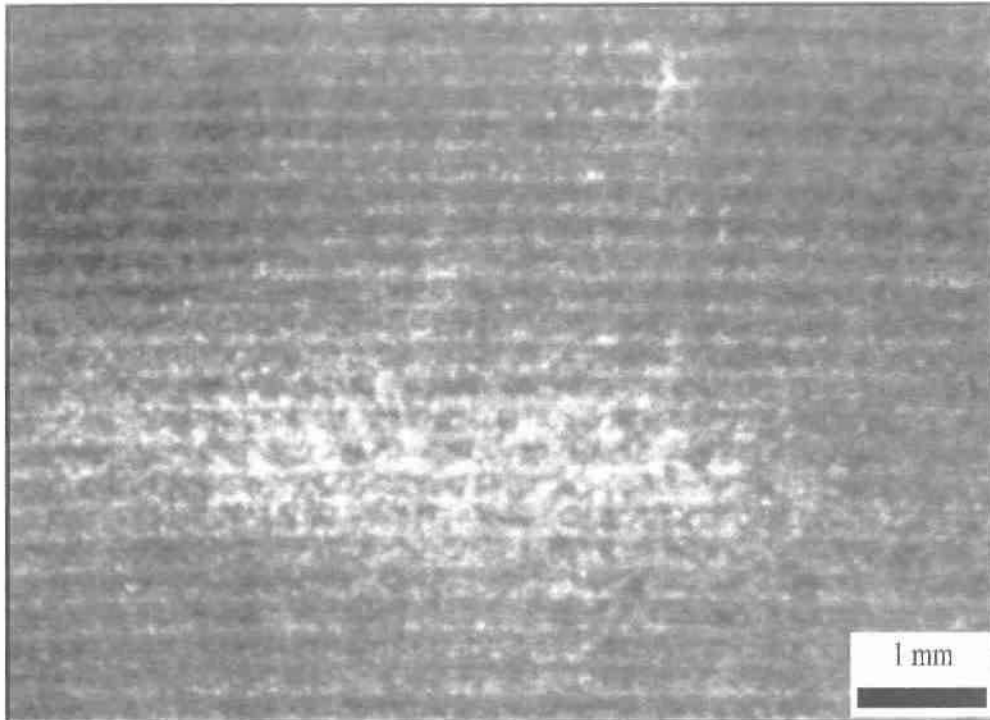
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 2.6



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
1.83	8.12	0.242	0.75	-0.52	2.67

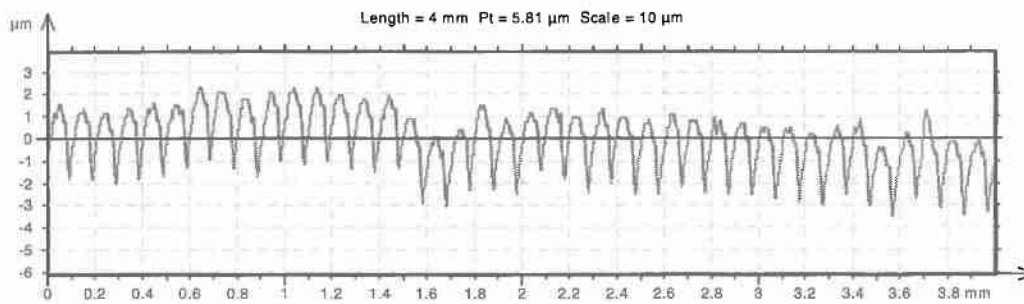
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
73.45	73.34	0.11	0.150

Λοκίμιο αναφοράς 3.0



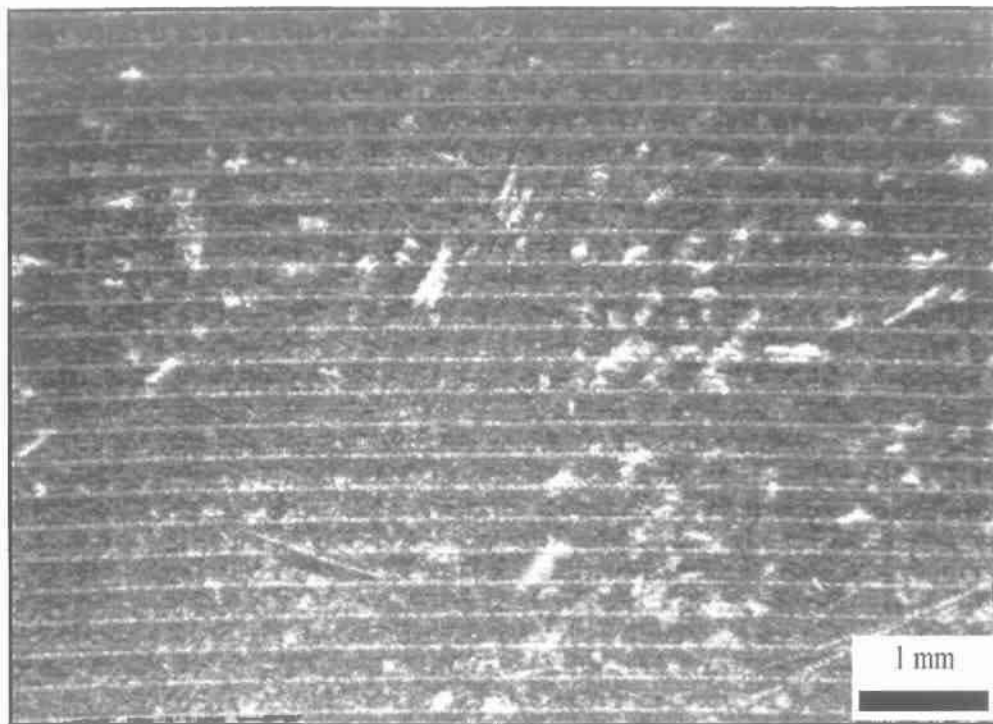
Σχήμα 6-15: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας μη διαβρωμένων δοκιμίων της σειράς 3.

Τραχυμέτρηση δοκιμίου αναφοράς 3.0



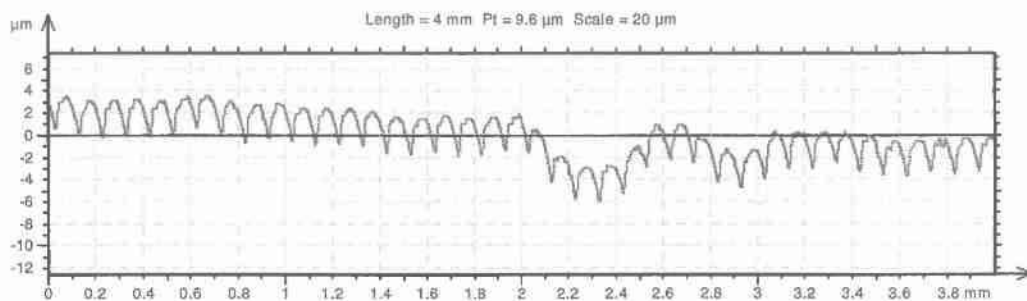
$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$RSm(\text{mm})$	$Wa(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
0.67	4.12	0.087	0.397	-0.7	2.11

Δοκίμιο 3.1



Σχήμα 6-16: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 3 μετά από 15 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

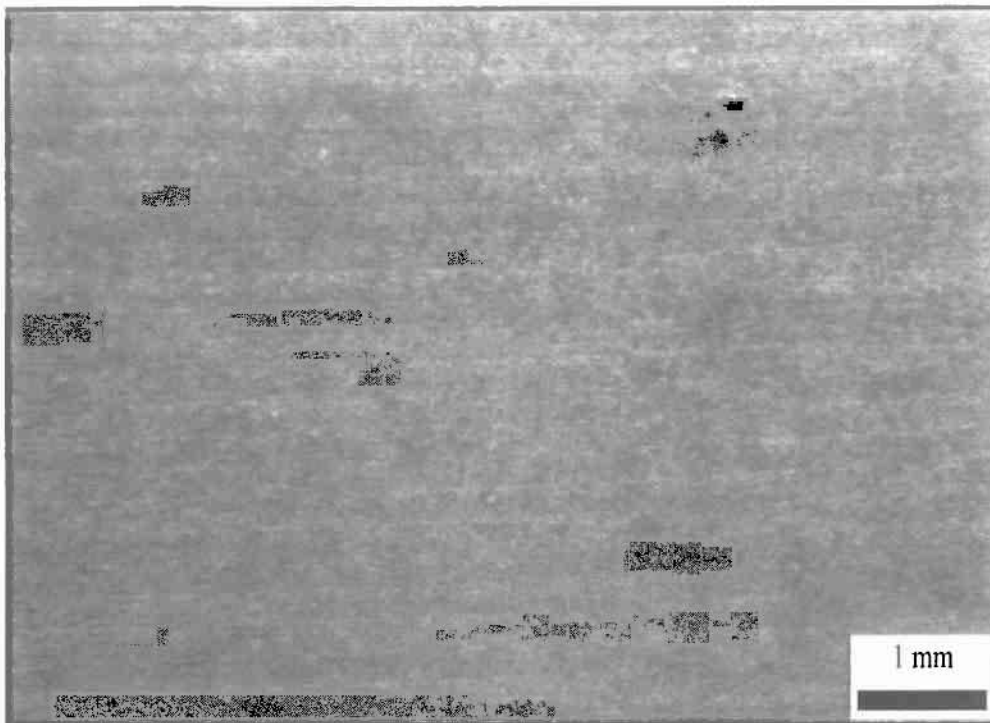
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 3.1



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
0.84	4.47	0.097	0.428	-0.6	2.62

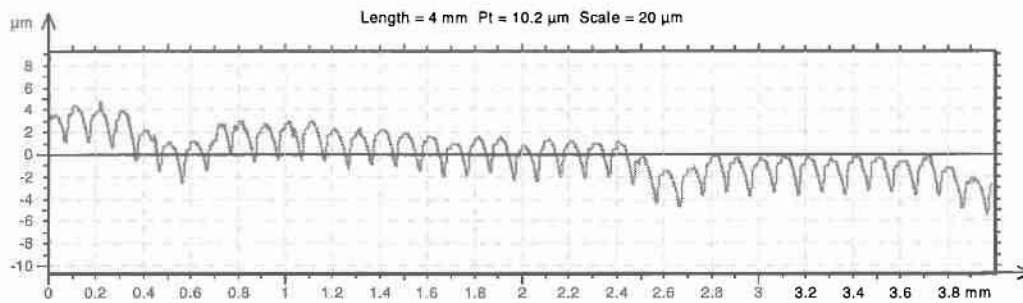
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
60.06	59.98	0.08	0.133

Δοκίμιο 3.2



Σχήμα 6-17: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 3 μετά από 30 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

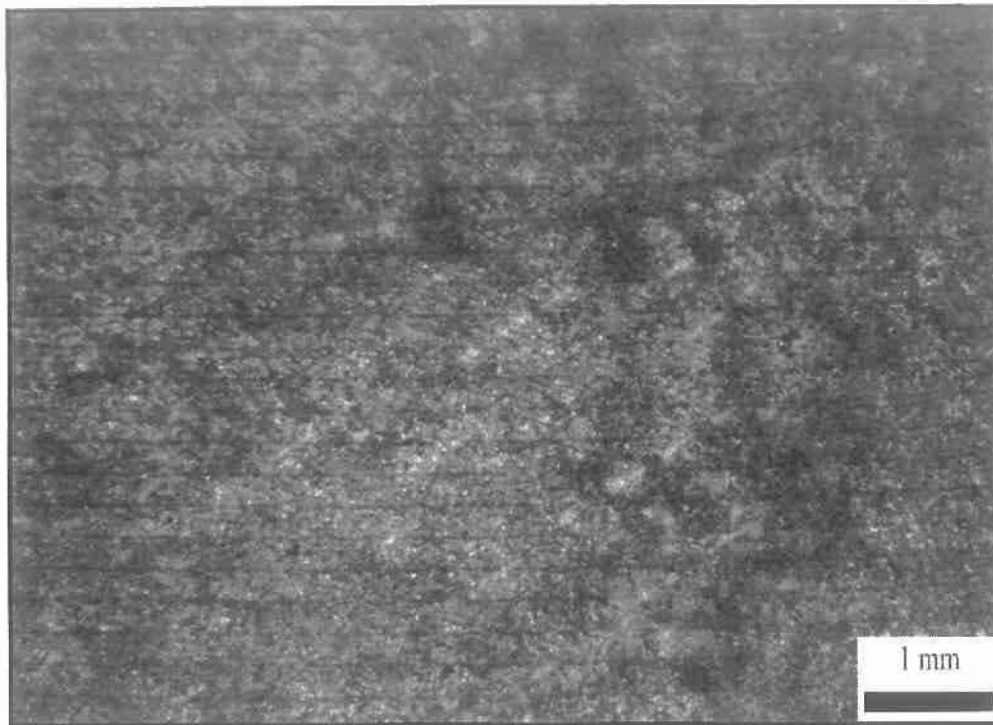
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 3.2



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
0.867	6.05	0.094	0.587	-0.62	3.28

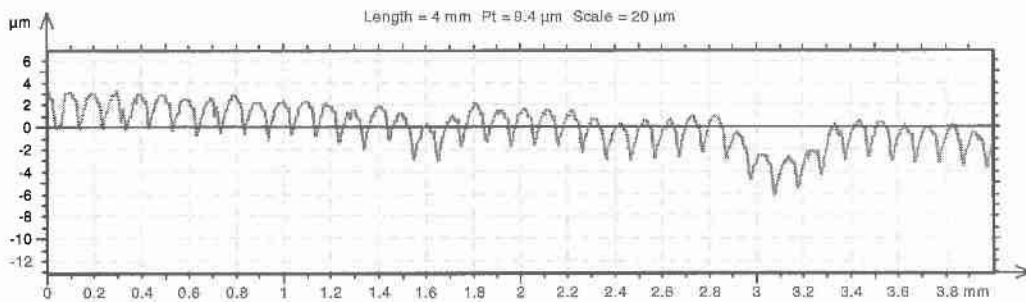
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
82.32	82.20	0.12	0.146

Δοκίμιο 3.3



Σχήμα 6-18: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 3 μετά από 45 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

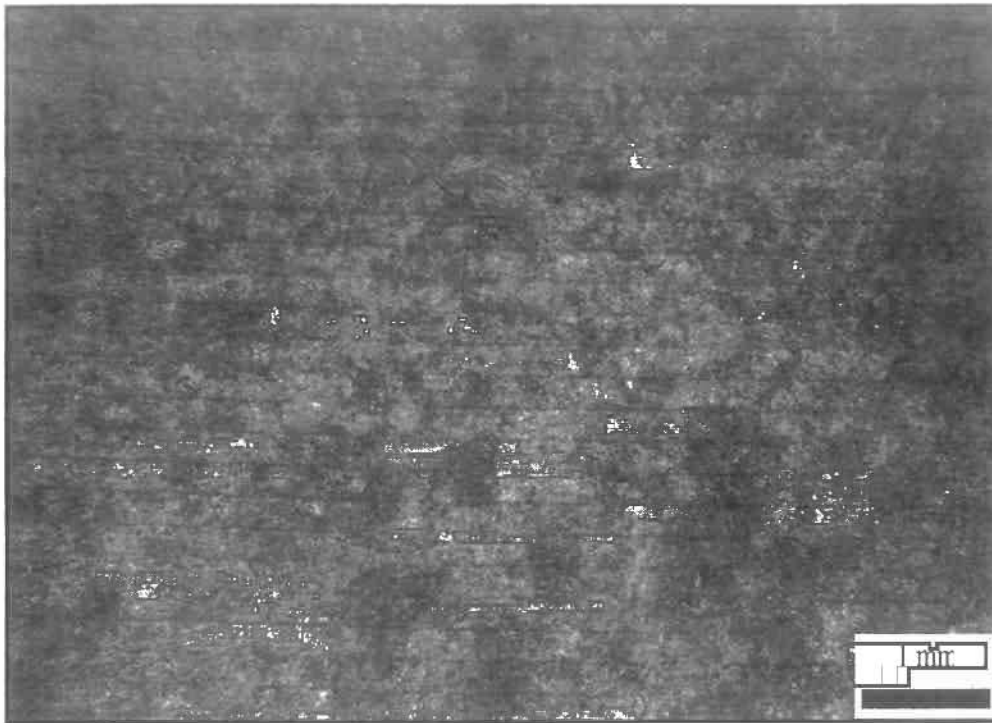
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 3.3



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{Sk}	R_{ku}
0.865	5.23	0.0977	0.72	-0.698	2.97

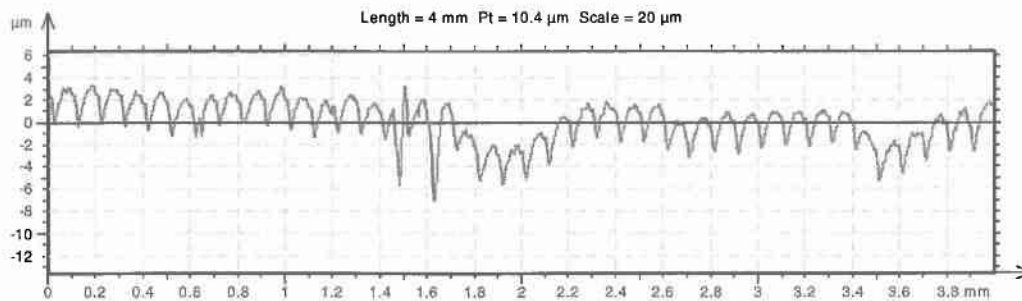
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
58.71	58.62	0.09	0.153

Δοκίμιο 3.4



Σχήμα 6-19: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 3 μετά από 60 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

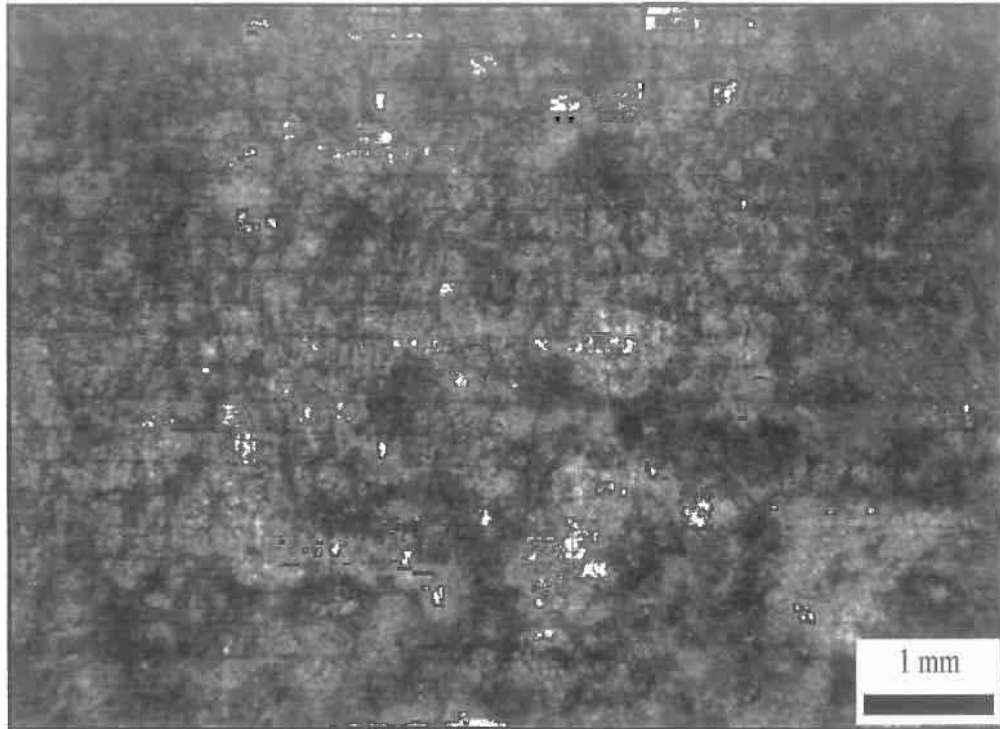
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 3.4



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
0.865	5.48	0.102	0.717	-0.726	2.62

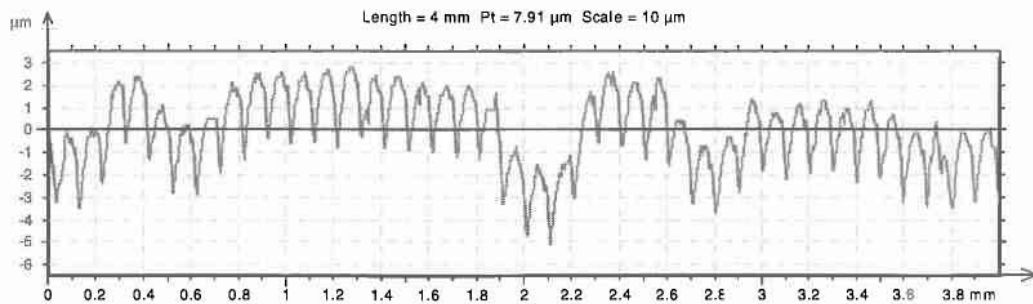
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
73.32	73.20	0.12	0.164

Δοκίμιο 3.5



Σχήμα 6-20: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 3 μετά από 75 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

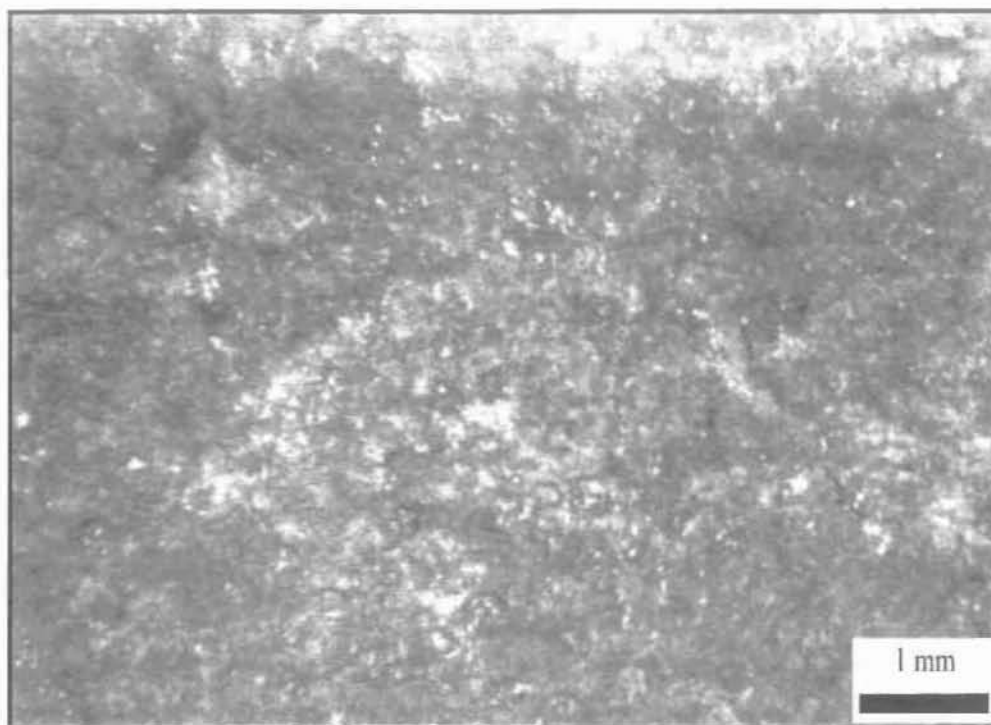
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 3.5



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$RSm(\text{mm})$	$Wa(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
0.902	5.65	0.103	0.723	-0.758	2.75

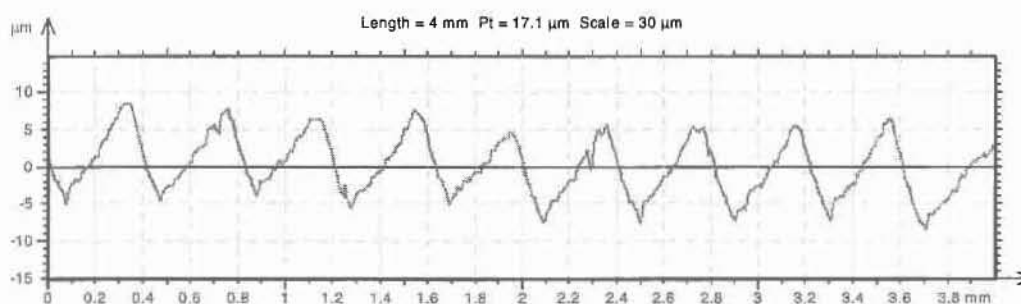
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
53.73	53.64	0.11	0.168

Δοκίμιο 3.6



Σχήμα 6-21: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 3 μετά από 90 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

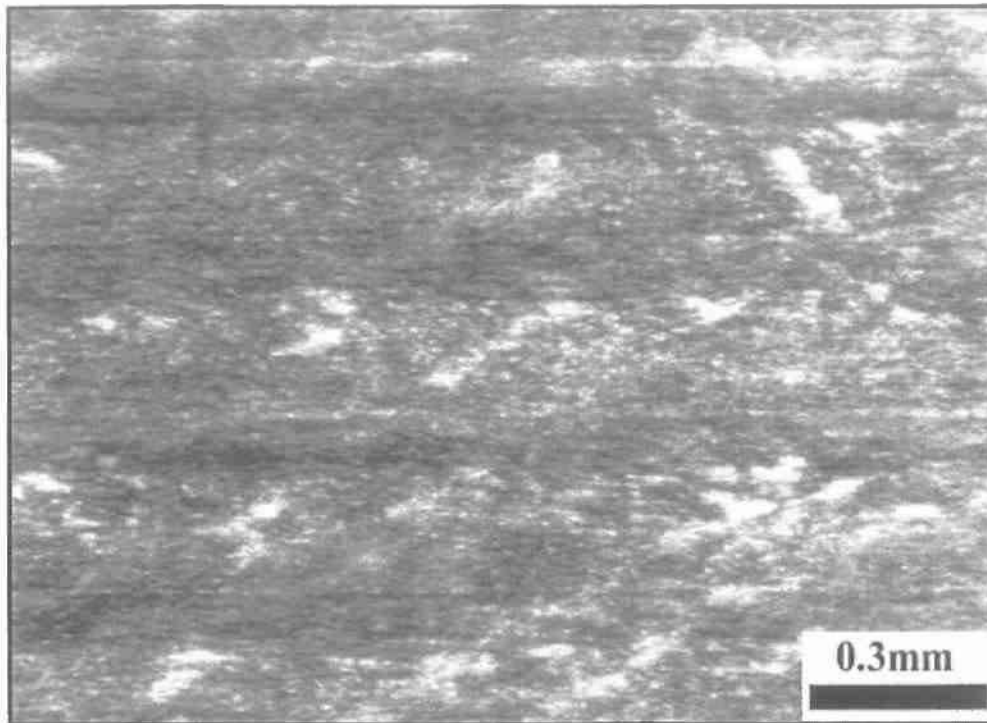
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 3.6



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
0.993	6.39	0.108	0.778	-0.636	3.50

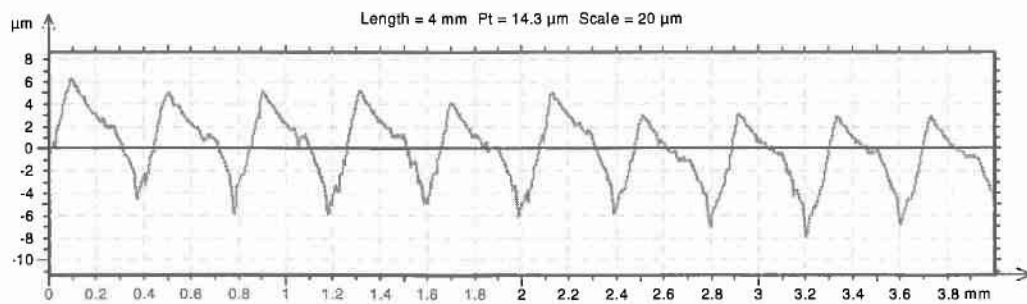
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
94.13	93.97	0.16	0.170

Ιοκίμιο αναφοράς 4.0



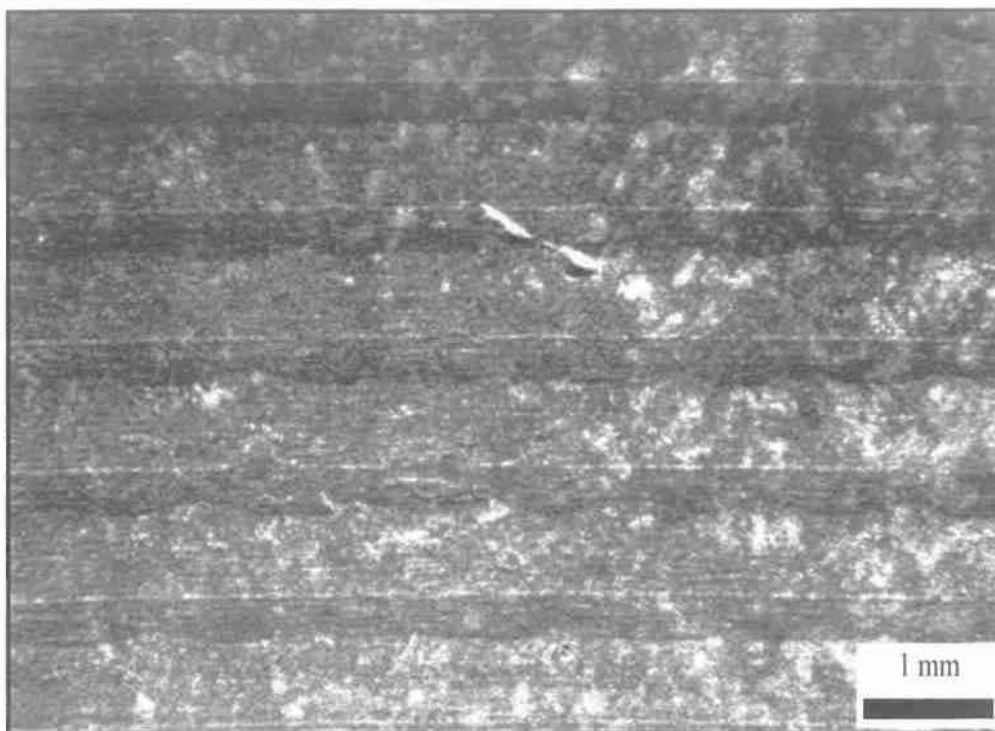
Σχήμα 6-22: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας μη διαβρωμένων δοκιμών της σειράς 1.

Τραχυμέτρηση δοκιμίου αναφοράς 4.0



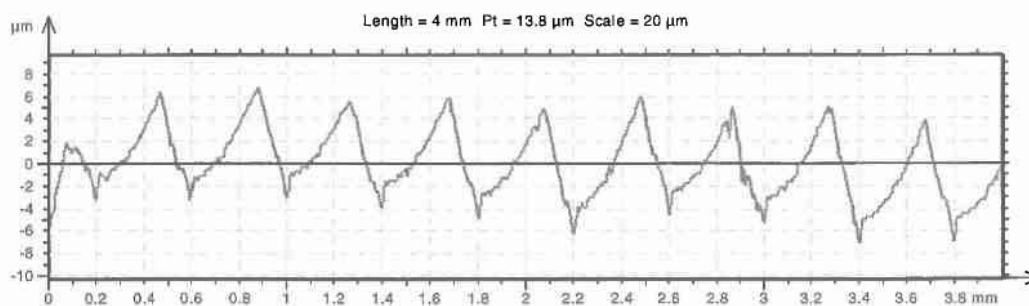
R_a(μm)	R_t(μm)	R_{Sm}(mm)	W_a(μm)	R_{sk}	R_{ku}
1.87	12.12	0.304	0.495	0.254	2.3

Δοκίμιο 4.1



Σχήμα 6-23: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 15 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

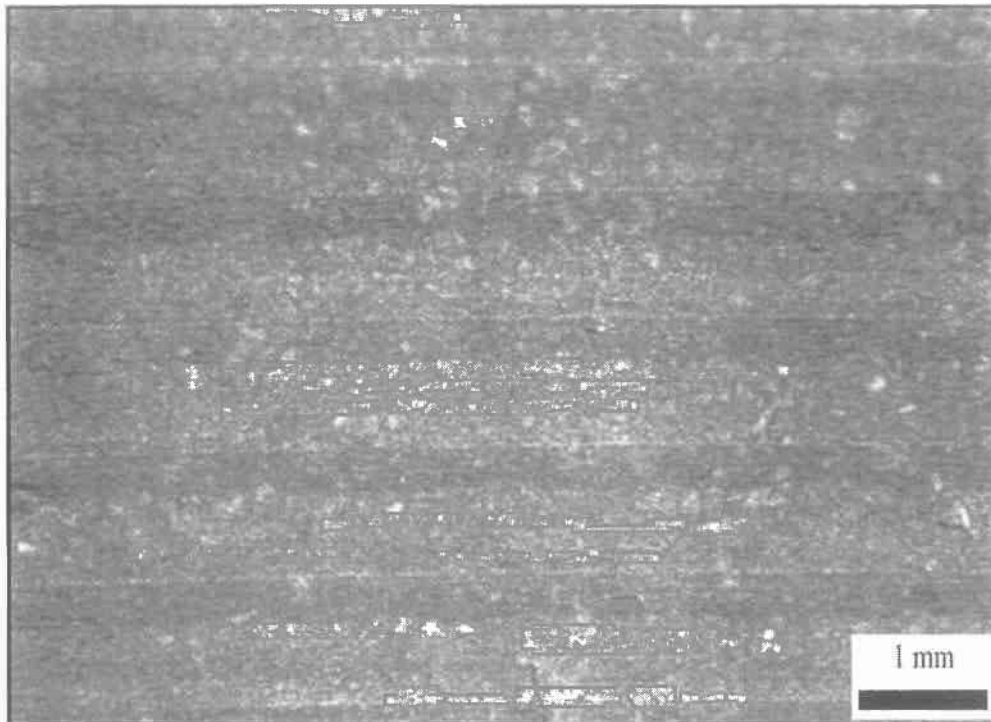
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 4.1



R_a(μm)	R_t(μm)	R_{Sm}(mm)	W_a(μm)	R_{sk}	R_{ku}
2.06	14.37	0.313	0.575	0.209	2.4

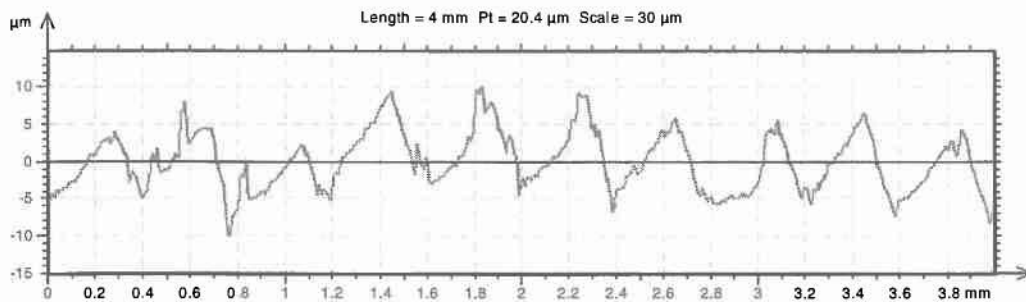
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
65.95	65.87	0.08	0.121

Δοκίμιο 4.2



Σχήμα 6-24: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 30 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

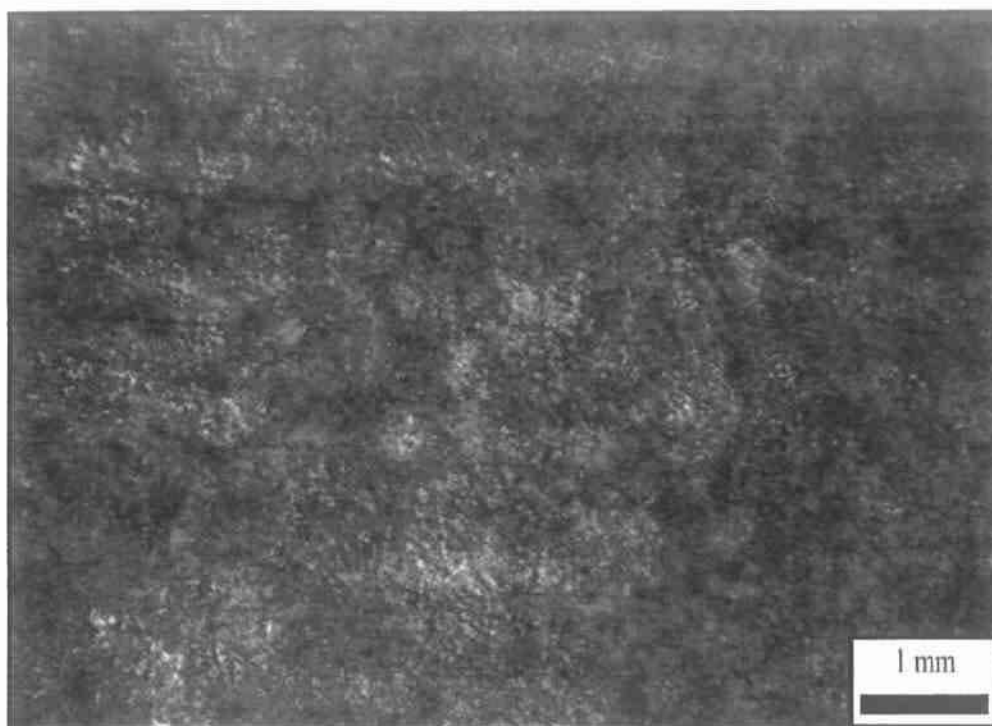
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 4.2



R_a (μm)	R_t (μm)	RSm (mm)	Wa (μm)	R_{sk}	R_{ku}
2.7	15.47	0.388	0.657	0.14	1.99

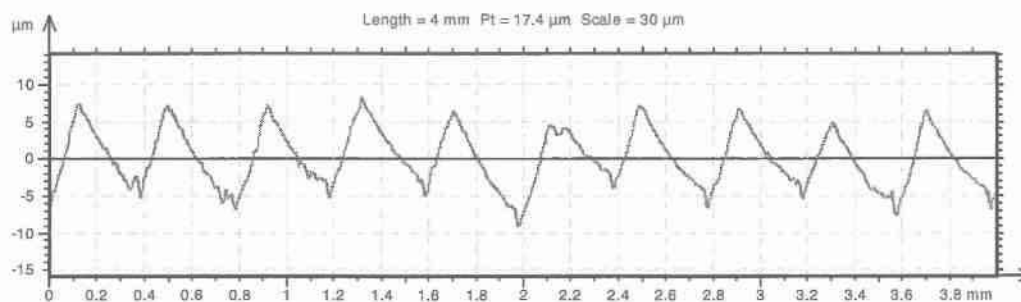
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
64.34	64.21	0.13	0.202

Δοκίμιο 4.3



Σχήμα 6-25: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 45 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

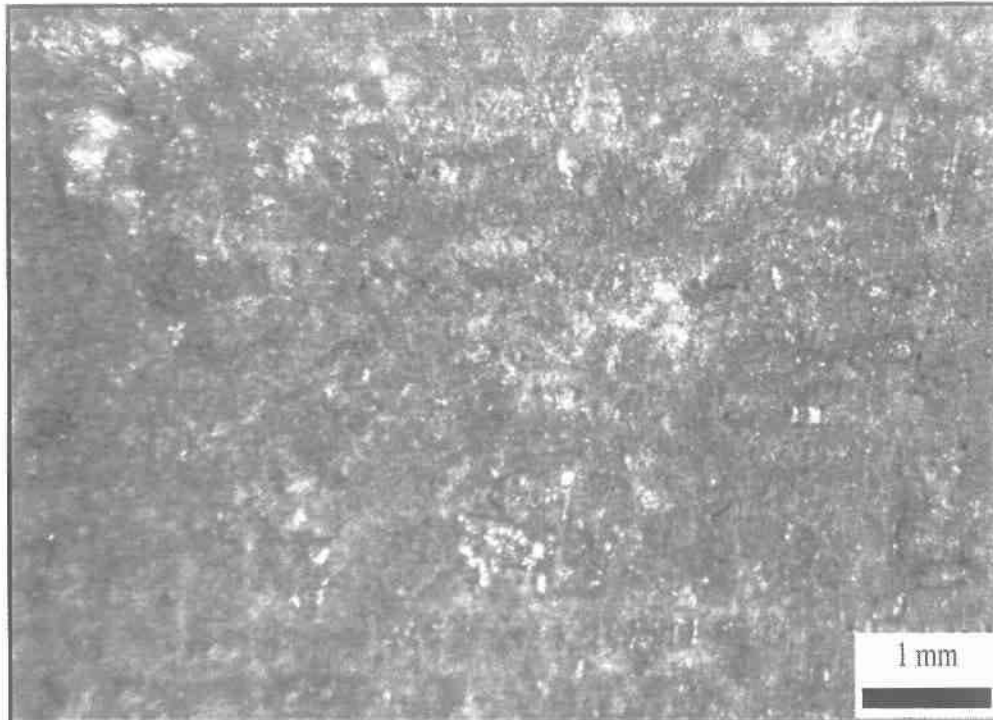
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 4.3



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
3.67	18.05	0.364	0.805	0.044	2.02

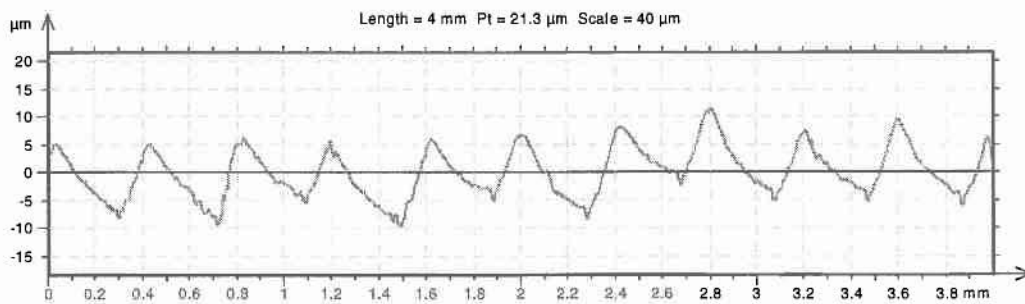
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
75.00	74.84	0.16	0.213

Δοκίμιο 4.4



Σχήμα 6-26: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 60 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

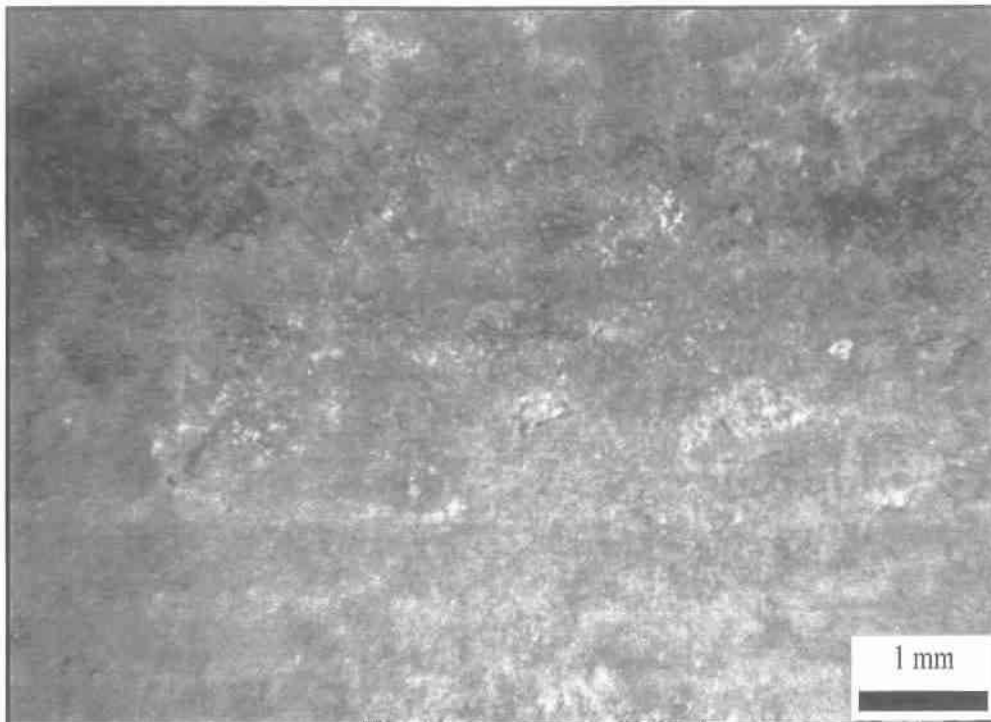
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 4.4



R_a (μm)	R_t (μm)	R_{Sm} (mm)	W_a (μm)	R_{sk}	R_{ku}
4.28	18.53	0.36	0.786	0.13	1.98

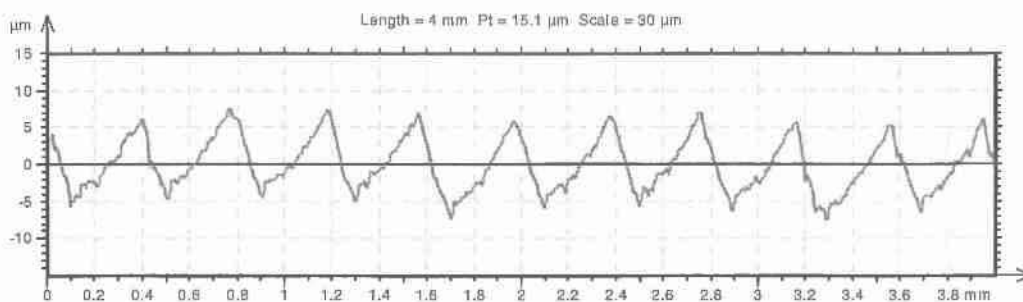
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
51.65	51.53	0.12	0.232

Δοκίμιο 4.5



Σχήμα 6-27: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 75 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

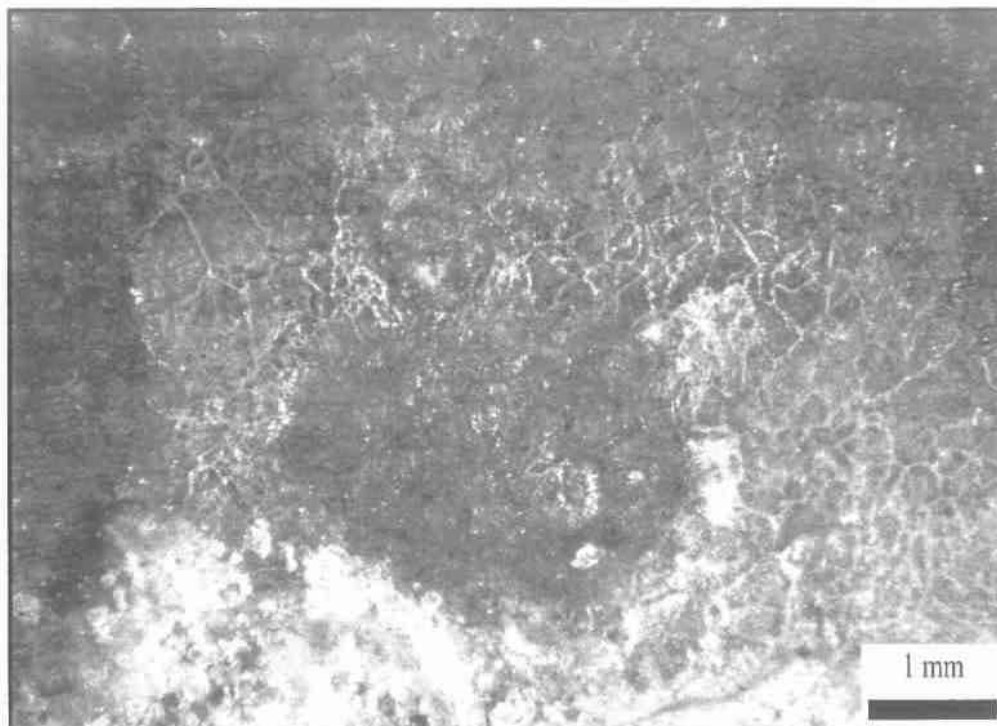
Τραχυμέτρηση δοκιμίου 4.5



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
4.45	19.86	0.381	0.980	0.21	1.95

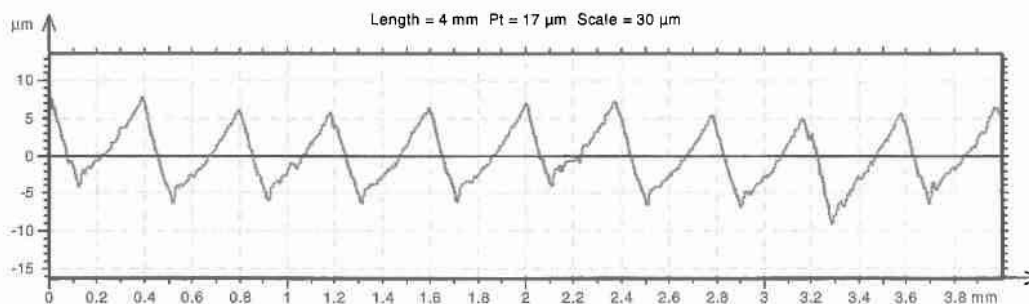
Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
73.10	72.92	0.18	0.246

Δοκίμιο 4.6



Σχήμα 6-28: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της επιφάνειας δοκιμίων της σειράς 4 μετά από 60 μέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .

Τραχυμέτρηση δοκιμίου 4.6



$R_a(\mu\text{m})$	$R_t(\mu\text{m})$	$R_{Sm}(\text{mm})$	$W_a(\mu\text{m})$	R_{sk}	R_{ku}
4.98	21.23	0.392	1.25	0.25	1.88

Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Ποσοστιαία Μεταβολή Βάρους (%)
88.42	88.17	0.25	0.283

Κεφάλαιο 7 Ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων επιταχυνόμενης διάβρωσης

«Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές στα διαβρωμένα δοκίμια του κράματος χαλκού/κασσίτερου CuSn12. Το κεφάλαιο χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους υποκεφάλαια. Το πρώτο αφορά την αποτίμηση της διάβρωσης μέσω της απώλειας βάρους σε δοκίμια τα οποία είχαν υποβληθεί σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό. Το δεύτερο αφορά την εκτίμηση της προηγηθείσας διάβρωσης βάσει του ρυθμού διάβρωσης, στο τρίτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής μελέτης των διαβρωμένων υλικών, ενώ στο τέταρτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών τραχυμέτρησης».

7.1 Εισαγωγή

Η παρούσα ενότητα περιλαμβάνει συγκριτική μελέτη αποτίμησης της υποβάθμισης των διαβρωμένων δοκιμίων του κράματος χαλκού/κασσίτερου ανά σειρά κοπής με βάση α) την απώλεια βάρους β) την στερεοσκοπία και γ) τις μετρήσεις τραχυμέτρησης τους. Τόσο ο χαρακτηρισμός των επιφανειών διάβρωσης όσο και ο υπολογισμός των αντίστοιχων ρυθμών διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να υποστηρίξουν επικουρικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων διάβρωσης.

7.2 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω της απώλειας βάρους

Η διερεύνηση μεταβολής της-τοπογραφίας τόσο του μη διαβρωμένου όσο και του διαβρωμένου υλικού πραγματοποιήθηκε σε προζυγισμένα δοκίμια ονομαστικού βάρους. Αρχικά η επίδραση της διάβρωσης εκτιμήθηκε ποσοτικά μέσω της ποσοστιαίας απώλειας

βάρους (Δm) των δοκιμίων μετά το πέρας των πειραμάτων σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\Delta m = \frac{(m_0 - m_t) \times 100}{m_0} \quad (7.1)$$

όπου m_0 το αρχικό βάρος του μη διαβρωμένου δοκιμίου και m_t το τελικό βάρος του διαβρωμένου δοκιμίου για χρόνο παραμονής t στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Πειραματική σειρά δοκιμίων 1

Στον παρακάτω πίνακα (7-1) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής απώλειας βάρους Δm (%) των δοκιμίων της πρώτης σειράς κοπής μετά το πέρας του πειράματος της επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.

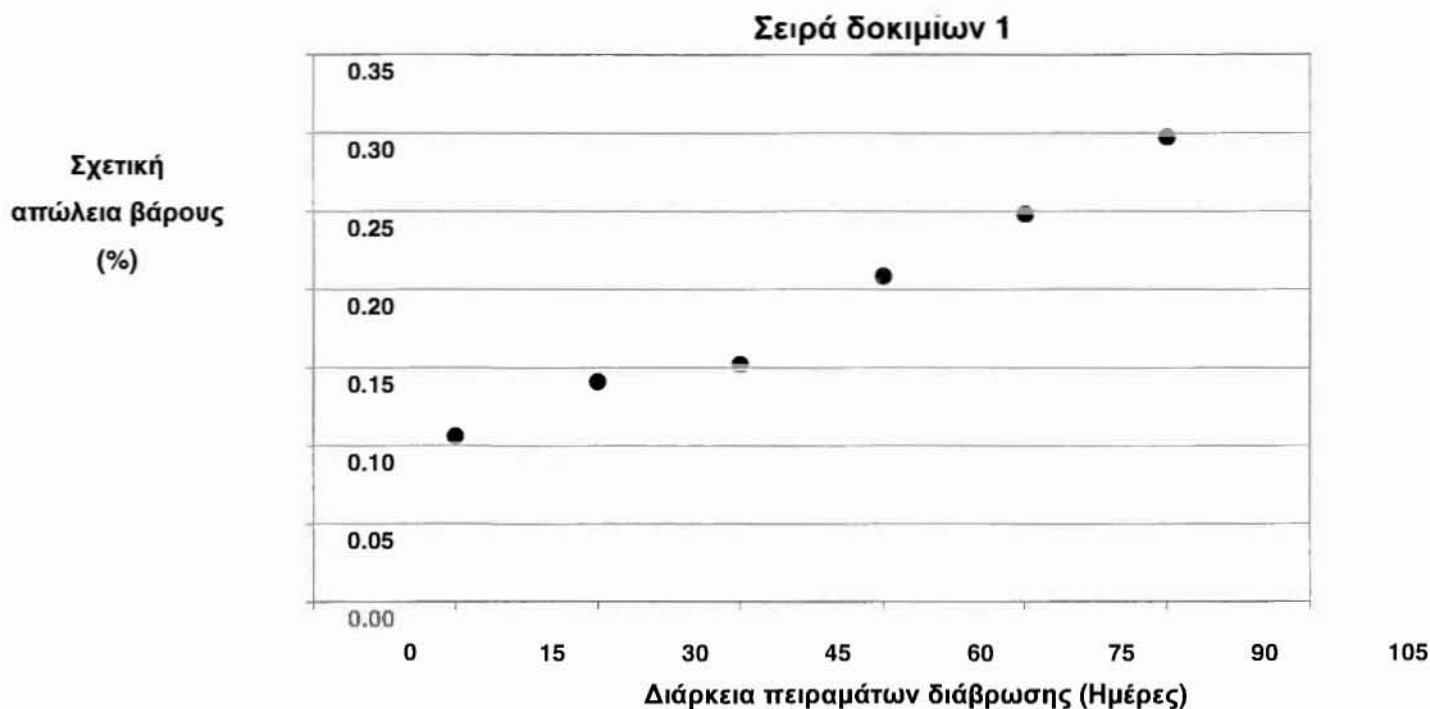
Ταξινόμηση Δοκιμίου	Διάρκεια εναλλακτικών εμβαπτίσεων (Ημέρες)	Αρχικό βάρος m_0 (g)	Τελικό βάρος m_t (g)	Απώλεια βάρους ($m_0 - m_t$)(g)	Σχετική απώλεια βάρους (%)
1.1	15	65.81	65.74	0.07	0.106
1.2	30	63.93	63.84	0.09	0.141
1.3	45	65.81	65.71	0.10	0.152
1.4	60	57.59	57.47	0.12	0.208
1.5	75	56.44	56.30	0.14	0.248
1.6	90	60.54	60.36	0.18	0.297

Πίνακας 7-1: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας δοκιμίων πρώτης πειραματικής σειράς 1

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι οι τιμές της απώλειας βάρους λόγω διάβρωσης των δοκιμίων της πρώτης σειράς, κυμαίνονται από 0.106% έως 0.297%. Η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους κατά τη διάρκεια των εναλλακτικών εμβαπτίσεων

μετά από 15, 30, 45, 60, 75 και 90 ημέρες είναι αντίστοιχα 32.4%, 42.9%, 95.9%, 100.6% και 125.7%. Είναι χαρακτηριστικό επίσης ότι η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους μεταξύ των δοκιμίων 1.1 και 1.6 είναι 125.7%.

Στο Σχήμα 7-1 παρουσιάζεται η εξάρτηση της απώλειας βάρους των δοκιμίων πρώτης πειραματικής σειράς δοκιμίων από τον χρόνο έκθεσης στο υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 7-1: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων πρώτης πειραματικής σειράς ($\alpha=0.5 \text{ mm}$, $s=0.4 \text{ mm/rev}$, $v=0.156 \text{ m/min}$)

Πειραματική σειρά δοκιμίων 2

Στον παρακάτω πίνακα (7-2) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής απώλειας βάρους Δm (%) των δοκιμίων της δεύτερης πειραματικής σειράς II μετά το πέρας του πειράματος της επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.

Ταξινόμηση Δοκιμίου	Διάρκεια εναλλακτικών εμβαπτίσεων (Ημέρες)	Αρχικό βάρος m_0 (g)	Τελικό βάρος m_1 (g)	Απώλεια βάρους ($m_0 - m_1$)(g)	Σχετική απώλεια βάρους (%)
2.1	15	62.53	62.48	0.05	0.080
2.2	30	66.76	66.7	0.06	0.090
2.3	45	76.6	76.53	0.07	0.091
2.4	60	74.66	74.57	0.09	0.121
2.5	75	85.39	85.28	0.11	0.129
2.6	90	73.45	73.34	0.11	0.150

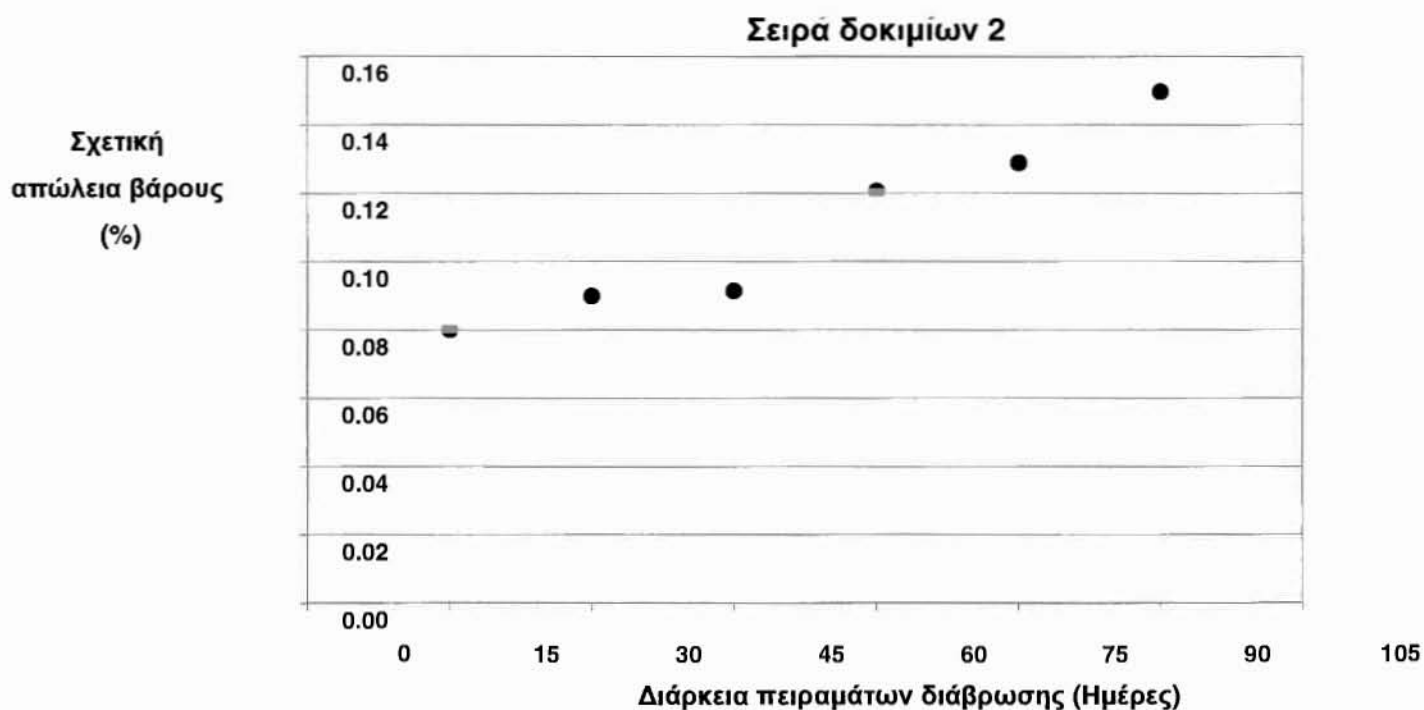
Πίνακας 7-2: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας των δοκιμίων δεύτερης πειραματικής σειράς ($\alpha=0.5 \text{ mm}$, $s=0.2 \text{ mm/rev}$, $v=0.156 \text{ m/min}$)

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι οι τιμές της απώλειας βάρους λόγω διάβρωσης των δοκιμίων της δεύτερης σειράς, κυμαίνονται από 0.080% έως 0.150%. Η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους κατά τη διάρκεια των εναλλακτικών εμβαπτίσεων μετά από 15, 30, 45, 60, 75 και 90 ημέρες είναι αντίστοιχα 12.4%, 14.3%, 50.8%, 61.1% και 87.3%. Είναι χαρακτηριστικό επίσης ότι η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους μεταξύ των δοκιμίων 2.1 και 2.6 είναι 87.3%.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα του Πίνακα 7-2 αλλά και από το Σχήμα 7-2 παρατηρείται ανάπτυξη των προϊόντων διάβρωσης σε αυτή τη σειρά δοκιμίων με αυξανόμενο ρυθμό σε σχέση με τον χρόνο έκθεσης στο υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον. Ωστόσο, μεταξύ

των 30 και 45 ημερών παρατηρείται μια μείωση στο ρυθμό αύξησης της μεταβολής της σχετικής απώλειας βάρους, η οποία παύει να υφίσταται μετά τις 45 ημέρες και μέχρι το πέρας της πειραματικής διαδικασίας (90 ημέρες). Μεταξύ του χρονικού διαστήματος των 30 και 45 ημερών, ο ρυθμός της σχετικής απώλειας βάρους παρουσιάζεται σταθερά αυξητικός.

Στο Σχήμα 7-2 παρουσιάζεται η εξάρτηση της απώλειας βάρους των δοκιμίων δεύτερης πειραματικής σειράς από τον χρόνο έκθεσης στο υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 7-2: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων δεύτερης πειραματικής σειράς ($\alpha=0.5$ mm, $s=0.2$ mm/rev, $v=0.156$ m/min)

Πειραματική σειρά δοκιμίων 3

Στον παρακάτω πίνακα (7-3) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής απώλειας βάρους Δm (%) των δοκιμίων της τρίτης πειραματικής σειράς μετά το πέρας του πειράματος της επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.

Ταξινόμηση Δοκιμίου	Διάρκεια εναλλακτικών εμβαπτίσεων (Ημέρες)	Αρχικό βάρος m_0 (g)	Τελικό βάρος m_t (g)	Απώλεια βάρους $(m_0 - m_t)$ (g)	Σχετική απώλεια βάρους (%)
3.1	15	60.06	59.98	0.08	0.133
3.2	30	82.32	82.20	0.12	0.146
3.3	45	58.71	58.62	0.09	0.153
3.4	60	73.32	73.20	0.12	0.164
3.5	75	53.73	53.67	0.09	0.168
3.6	90	94.13	93.97	0.16	0.170

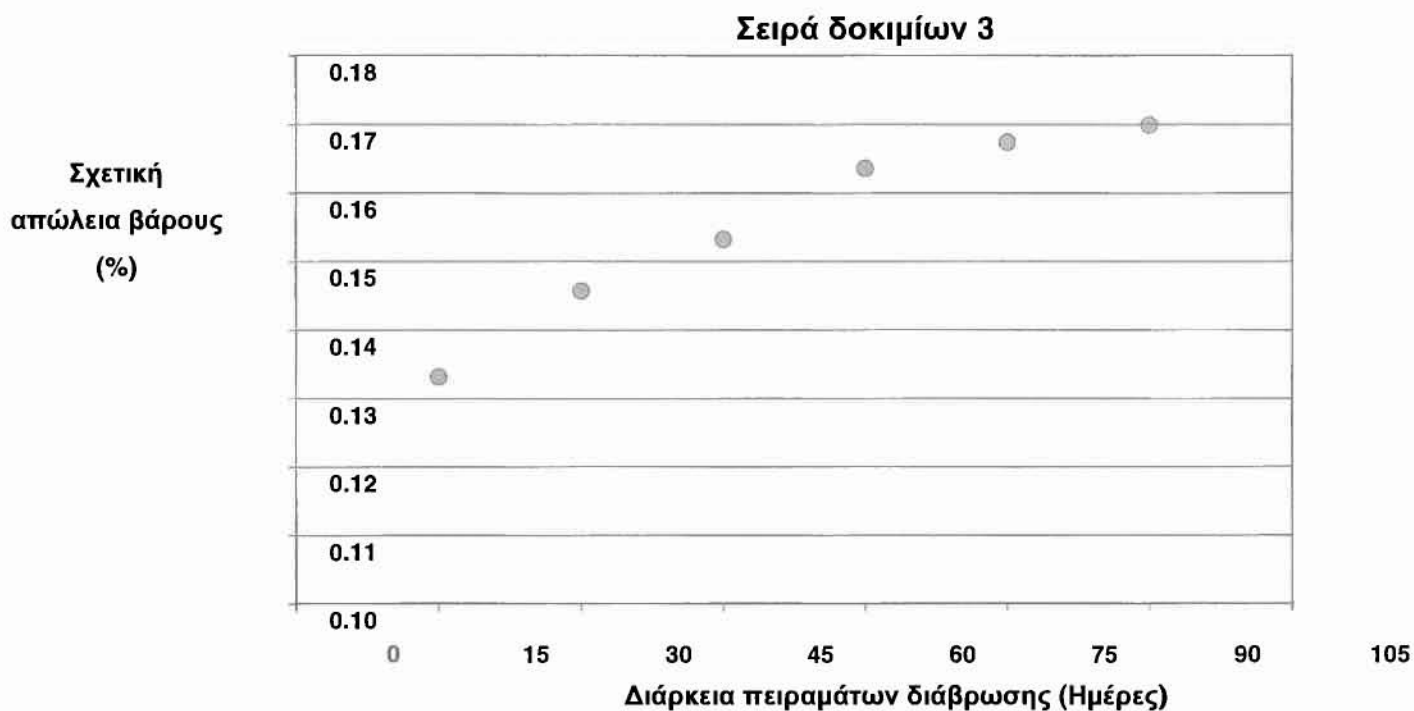
Πίνακας 7-3: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας των δοκιμίων τρίτης πειραματικής σειράς

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι οι τιμές της απώλειας βάρους λόγω διάβρωσης των δοκιμίων της τρίτης πειραματικής σειράς, κυμαίνονται από 0.133% έως 0.170%. Η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους κατά τη διάρκεια των εναλλακτικών εμβαπτίσεων μετά από 15, 30, 45, 60, 75 και 90 ημέρες είναι αντίστοιχα 9.4%, 15.1%, 22.9%, 25.8% και 27.6%. Είναι χαρακτηριστικό επίσης ότι η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους μεταξύ των δοκιμίων 3.1 και 3.6 είναι μόλις 27.6%.

Στη συγκεκριμένη σειρά δοκιμίων και συγκριτικά με τις δυο προηγούμενες σειρές δοκιμίων, είναι φανερή επίσης η παρατήρηση ότι το σχετικά μικρό εύρος των τιμών της

σχετικής απώλειας βάρους, η οποία αφενός μεν παρουσιάζει αυξητικό ρυθμό, αφετέρου δε, ο ρυθμός αυτός είναι σαφέστατα μικρότερος από τους αντίστοιχους των επιφανειών δοκιμίων σειράς 1 και 2.

Στο Σχήμα 7-3 παρουσιάζεται η εξάρτηση της απώλειας βάρους των δοκιμίων τρίτης πειραματικής σειράς από τον χρόνο έκθεσης στο υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 7-3: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων τρίτης πειραματικής σειράς ($a=0.5\text{ mm}$, $s=0.4\text{ mm/rev}$, $v=0.186\text{ m/min}$)

Πειραματική σειρά δοκιμίων 4

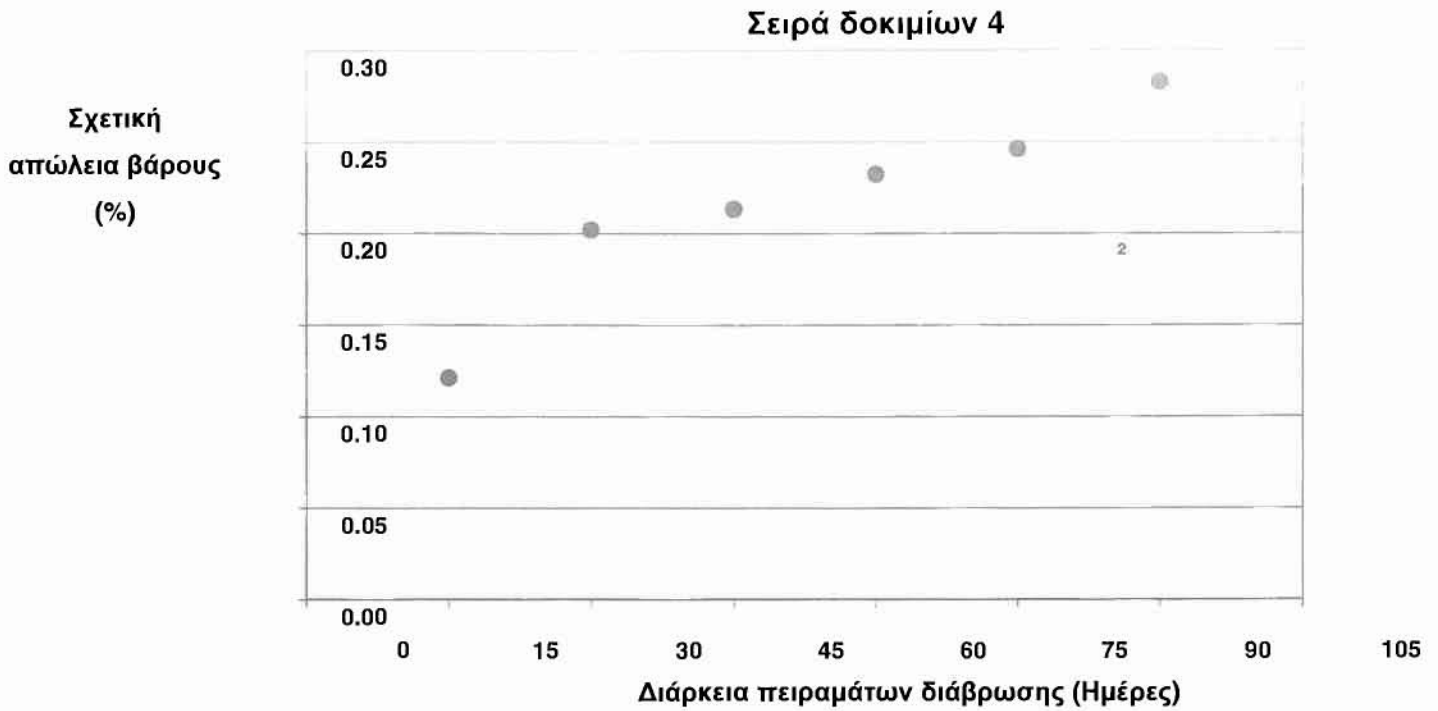
Στον πίνακα (7-4) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχετικής απώλειας βάρους Δm (%) των δοκιμίων της τέταρτης πειραματικής σειράς μετά το πέρας του πειράματος της επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.

Ταξινόμηση Δοκιμίου	Διάρκεια εναλλακτικών εμβαπτίσεων (Ημέρες)	Αρχικό βάρος m_0 (g)	Τελικό βάρος m_t (g)	Απώλεια βάρους ($m_0 - m_t$)(g)	Σχετική απώλεια βάρους (%)
4.1	15	65.95	65.87	0.08	0.121
4.2	30	64.34	64.21	0.13	0.202
4.3	45	75	74.84	0.16	0.213
4.4	60	51.65	51.53	0.12	0.232
4.5	75	73.10	72.92	0.18	0.246
4.6	90	88.42	88.17	0.25	0.283

Πίνακας 7-4: Απώλεια βάρους και σχετική απώλεια βάρους επιφάνειας των δοκιμίων της τέταρτης πειραματικής σειράς

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι οι τιμές της απώλειας βάρους λόγω διάβρωσης των δοκιμίων της πρώτης σειράς, κυμαίνονται από 0.121% έως 0.310%. Η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους κατά τη διάρκεια των εναλλακτικών εμβαπτίσεων μετά από 15, 30, 45, 60, 75 και 90 ημέρες είναι αντίστοιχα 66.6%, 75.9%, 91.5%, 103.0% και 133.1%. Είναι χαρακτηριστικό επίσης ότι η διακύμανση της σχετικής απώλειας βάρους μεταξύ των δοκιμίων 4.1 και 4.6 είναι 133.1%.

Στο Σχήμα 7-4 παρουσιάζεται η εξάρτηση της απώλειας βάρους των δοκιμίων τέταρτης σειράς κοπής από τον χρόνο έκθεσης στο υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 7-4: Μεταβολή της σχετικής απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων τέταρτης πειραματικής σειράς ($\alpha=0.5$ mm, $s=0.3$ mm/rev, $v=0.039$ m/min)

7.3 Αποτίμηση της διάβρωσης μέσω του ρυθμού διάβρωσης

Η τελική υποβάθμιση ενός κράματος χαλκού/κασσίτερου λόγω διάβρωσης μπορεί επίσης να εκτιμηθεί μέσω της απώλειας βάρους συναρτήσει της εξωτερικής επιφάνειας

έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Η αποτίμηση αυτή αποτελεί τον ευκολότερο και πιο βασικό τρόπο υπολογισμού του ρυθμού διάβρωσης P_w (mm/y) ενός υλικού και μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση [33-34]:

$$P_w = \frac{3.65 \times \Delta W}{\rho} \quad (7.2)$$

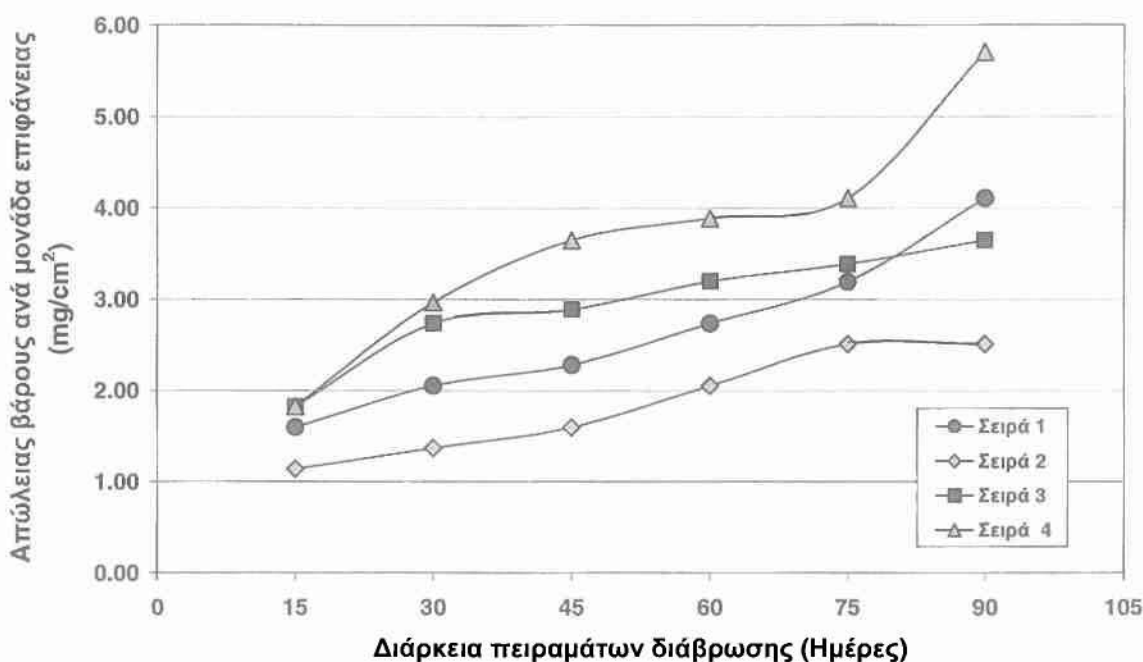
όπου ΔW (mg/cm²/d) είναι ο ρυθμός απώλειας βάρους του υλικού λόγω διάβρωσης και ρ η φυσική πυκνότητα του κράματος χαλκού/κασσίτερου (ήτοι 8.8 g/cm³)(βλέπε Πίνακα 5-3). Το συνολικό μέσο εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων υπολογίστηκε ίσο με 43.82 cm².

Στον Πίνακα που ακολουθεί 7-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας βάρους ανά μονάδα επιφάνειας των δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.

Ταξινόμηση Δοκιμίου	Απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας (mg/cm ²)			
	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 4
1	1.60	1.14	1.83	1.83
2	2.05	1.37	2.74	2.97
3	2.28	1.60	2.89	3.65
4	2.74	2.05	3.20	3.89
5	3.19	2.51	3.39	4.11
6	4.11	2.51	3.65	5.71

Πίνακας 7-5: Απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας των διαβρωμένων δοκιμίων

Η απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας παρατηρήθηκε να αυξάνει με αυξανόμενο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον για όλες τις πειραματικές σειρές των δοκιμίων (Σχήμα 7-5).



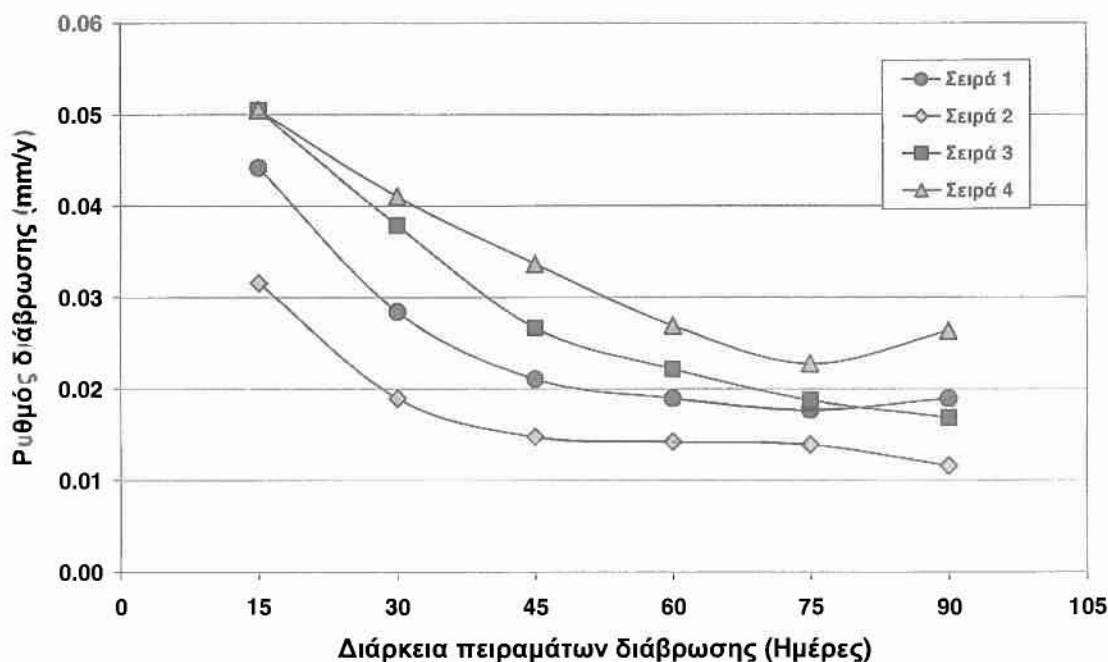
Σχήμα 7-5: Μεταβολή της απώλειας βάρους της επιφάνειας των δοκιμίων ανά πειραματική σειρά δοκιμίων

Ιδιαίτερα έντονη απώλεια βάρους παρατηρήθηκε στα δοκίμια της τέταρτης σειράς. Στην περίπτωση αυτή οι τιμές κυμάνθηκαν από 1.83 έως 5.71 mg/cm². Αντίθετα οι μικρότερες τιμές απώλειας βάρους ανά μονάδα επιφάνειας παρατηρήθηκαν στα δοκίμια της δεύτερης σειράς όπου και κυμάνθηκαν από 1.14 έως 2.51 mg/cm².

Με την πάροδο του χρόνου, η διάβρωση δημιουργεί ένα αδιαπέρατο στρώμα οξειδίων στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων με αποτέλεσμα την παθητικοποίηση του (Στερεοσκοπικές εικόνες – Κεφάλαιο 6). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σταδιακά στις τιμές του ρυθμού διάβρωσης που προέκυψαν βάσει υπολογισμών για όλες τις σειρές κοπής των δοκιμίων (Σχήμα 7-6). Αρχικά ο ρυθμός διάβρωσης λαμβάνει υψηλές τιμές (έως 0.05

mm/y) λόγω της ύπαρξης μεγάλης μη-υποβαθμισμένης εξωτερικής επιφάνειας έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Ωστόσο, η επιφάνεια αυτή ολοένα επικαλύπτεται από τα οξείδια του χαλκού και τελικώς υποβαθμίζεται μέσω της αθροιστικής συσσώρευσης ποσότητας τους. Έτσι εμποδίζεται η περαιτέρω διείσδυση των ιόντων του χλωρίου εντός του μεταλλικού υποστρώματος μέσω μηχανισμών διάχυσης και οι αντίστοιχοι ρυθμοί διάβρωσης μειώνονται σχεδόν γραμμικά και φτάνουν σε πολύ χαμηλές τιμές (0.012 mm/y). Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες οι τιμές του ρυθμού διάβρωσης ενός κράματος χαλκού/κασσίτερου σε συνθήκες ομοιόμορφης διάβρωσης χαρακτηρίζονται εντός προδιαγραφών για αξιόπιστη εφαρμογή όταν κυμαίνονται σε εύρος τιμών μεταξύ 0.013-0.016 mm/y [34].

Ένας δεύτερος λόγος γένεσης της διάβρωσης στο κράμα του χαλκού/κασσίτερου αποτελεί η ύπαρξη των ενεργών θέσεων ως αποτέλεσμα της σχηματισθείσας διαφοροποίησης ανάμεσα στην φάση-β και τους κόκκους του κασσίτερου. Οι ενεργές αυτές θέσεις πιθανόν να εμφανίστηκαν στις σειρές 1 και 4 όπου παρατηρήθηκε αυξημένη παθητικοποίηση των αντίστοιχων επιφανειών και μεγαλύτερη τραχύτητα έναντι των υπολοίπων σειρών [35].

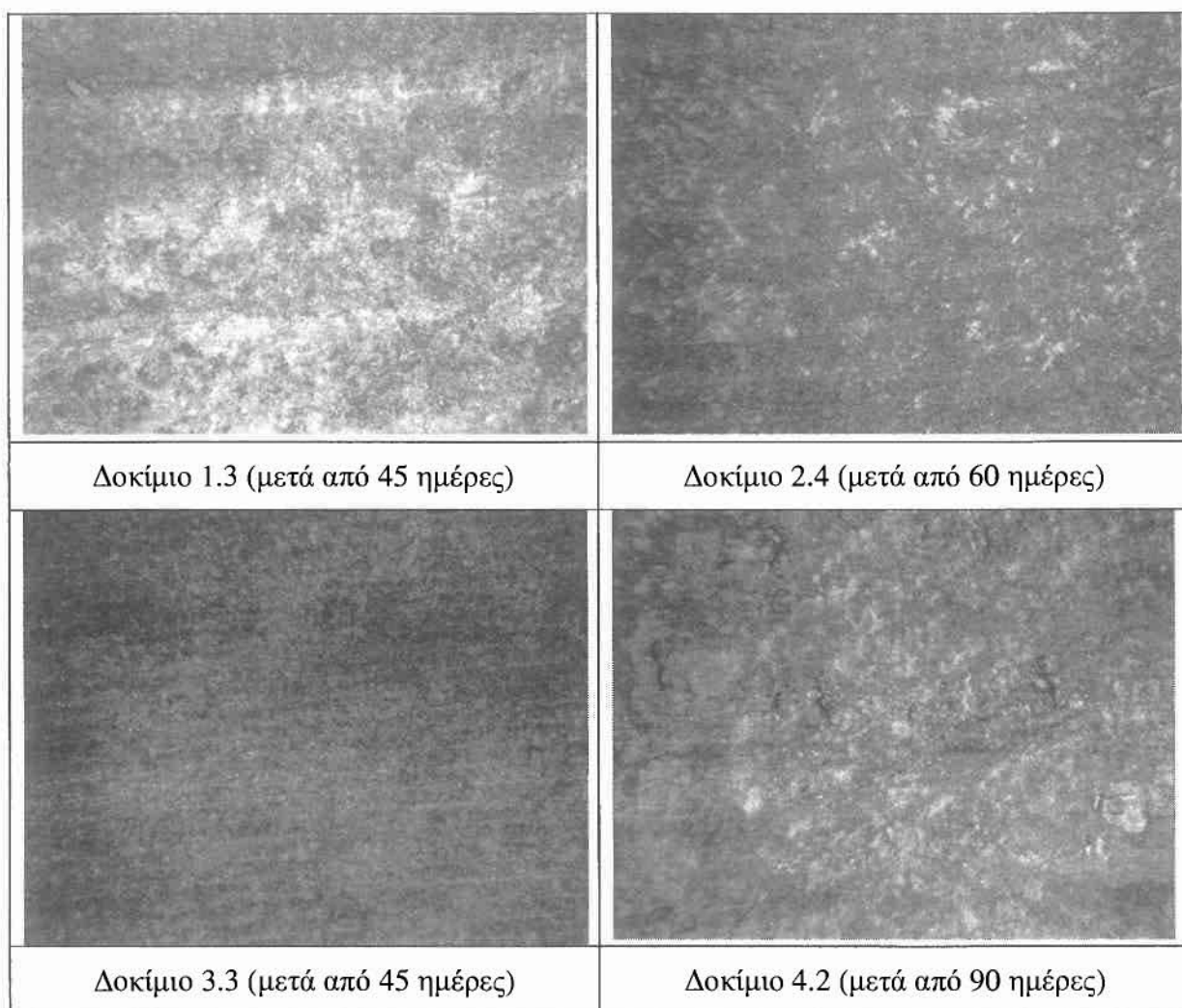


Σχήμα 7-6: Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης των δοκιμίων ανά πειραματική σειρά

Οι τελικές τιμές του ρυθμού διάβρωσης (P_w) του κράματος χαλκού/κασσίτερου που προέκυψαν από τα πειράματα διάβρωσης κρίνονται ιδιαίτερα χαμηλές σε σχέση με αντίστοιχες άλλων μη σιδηρούχων κραμάτων, υποδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο την σημαντική ικανότητα αντοχής του CuSn12 στο θαλάσσιο περιβάλλον και υποστηρίζοντας σαφώς την καταλληλότητα ομαλής χρήσης του για εφαρμογές πεδίου σε αντίστοιχες συνθήκες [36-37].

7.4 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω της στερεοσκοπίας

Όπως ήταν αναμενόμενο, το αποτέλεσμα της διάβρωσης παρατηρήθηκε να αυξάνει με αυξανόμενο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Η προκαλούμενη διάβρωση δημιουργεί ένα στρώμα οξειδίων χαλκού στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων. Αφαιρώντας το στρώμα αυτό παρατηρήθηκε έντονη διάβρωση με βελονισμούς/τρήματα (pitting corrosion) στην επιφάνεια του υλικού. Στο Σχήμα 7-7 συγκρίνονται χαρακτηριστικές στερεοσκοπικές φωτογραφίες από διαβρωμένα δοκίμια (μετά από έκπλυση αυτών) ανά σειρά κοπής μετά από 4 διαφορετικές ημέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον του NaCl (3.5 %).



Σχήμα 7-7: Μακροσκοπική άποψη της επιφάνειας τυπικών δοκιμίων CuSn12 μετά από έκθεση σε υδατικό περιβάλλον NaCl (3.5%) για συγκεκριμένες συνθήκες

Όπως προκύπτει από την παρατήρηση των στερεοσκοπικών φωτογραφιών, το κράμα χαλκού/κασσίτερου, μετά την έκθεσή του στο υδατικό διαβρωτικό περιβάλλον παρουσιάζει εκτεταμένη διάβρωση. Αρχικά τα διαβρωτικά τρήματα εμφανίζονται κατά τόπους και με την μορφή κόκκων. Στη συνέχεια οι κόκκοι αυτοί εξαπλώνονται σε ολόκληρη την εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων βάσει κυρίως του χρόνου εμβάπτισης των δοκιμίων στο διαβρωτικό διάλυμα του NaCl. Με αυξανόμενο χρόνο έκθεσης ο αριθμός και το βάθος των τρημάτων αυξάνεται αναλόγως. Μετά από 90 ημέρες έκθεσης η επιφάνεια των διαβρωμένων δοκιμίων έχει υποστεί βαριάς μορφής προσβολή ενώ επιπλέον τα τρήματα έχουν εισχωρήσει σε όλο το πάχος του υλικού. Γίνεται επίσης φανερό ότι η διάβρωση είναι σαφώς λιγότερο εντονότερη στην περίπτωση των δοκιμίων της τρίτης σειράς για τους ίδιους χρόνους έκθεσης, προφανώς λόγω των χαρακτηριστικών συνθηκών αποβολής του συγκεκριμένου υλικού [38].

Ο τύπος των τρημάτων του κράματος CuSn12 κατηγοριοποιήθηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM G46 [39] και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ανά πειραματική σειρά συνοψίζονται στον Πίνακα 7-6.

Σειρά κοπής δοκιμίων	Χρόνος Παραμονής (ημέρες)	Χαρακτηρισμός τρημάτων
1 ^η	90	κυρίως στενά και βαθιά – μερικώς υποσκαμμένα
2 ^η	90	κυρίως στενά και βαθιά – μερικώς υποσκαμμένα
3 ^η	90	πλατειά και ρηχά
4 ^η	90	κυρίως στενά και βαθιά – μερικώς υποσκαμμένα

Πίνακας 7-6: Χαρακτηρισμός των τρημάτων διάβρωσης ανά σειρά κοπής των δοκιμίων για το κράμα CuSn12

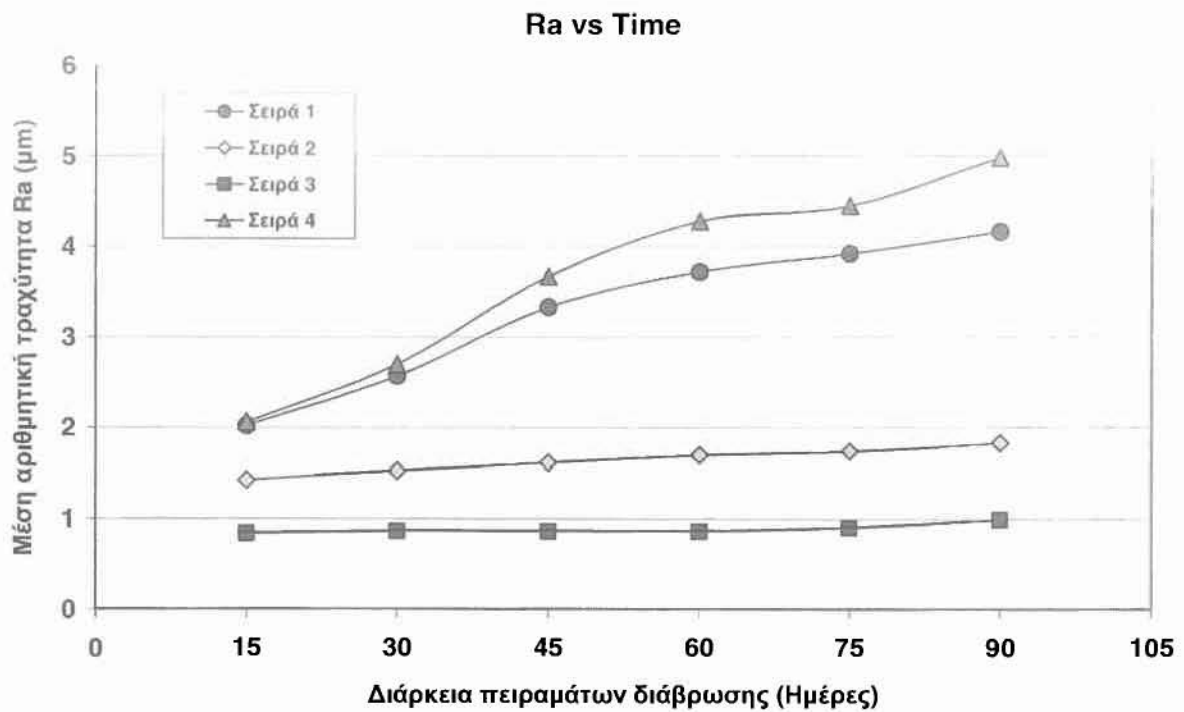
Από τις φωτογραφίες στερεοσκοπίας είναι επίσης φανερή η έντονη εμφάνιση πυκνών στρωμάτων οξειδίων άσπρο-γκρίζου χρώματος ακόμα και μετά τον καθαρισμό των

διαβρωμένων δοκιμίων. Τα στρώματα αυτά αποτελούνται κυρίως από τα αρχικώς παραχθέντα ιόντα του CuCl και μερικώς από τα δευτερεύοντα ιόντα του $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$. Προοδευτικά λοιπόν οι ενώσεις του μονοσθενούς χαλκού που σχηματίζονται αρχικά, καθώς το ουδέτερο άτομο χάνει ένα ηλεκτρόνιο, οξειδώνονται σε ενώσεις του δισθενούς χαλκού που συνιστά τη σταθερότερη μορφή του ιόντος [40].

7.5 Αποτίμηση διάβρωσης μέσω της προφίλομετρίας

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν συνολικά έξι αριθμητικές παράμετροι (R_a , R_t , R_{Sm} , W_a , R_{sk} και R_{ku}) για την περιγραφή της τοπογραφίας των διαβρωμένων δοκιμίων του κράματος χαλκού/κασσίτερου με την πάροδο του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

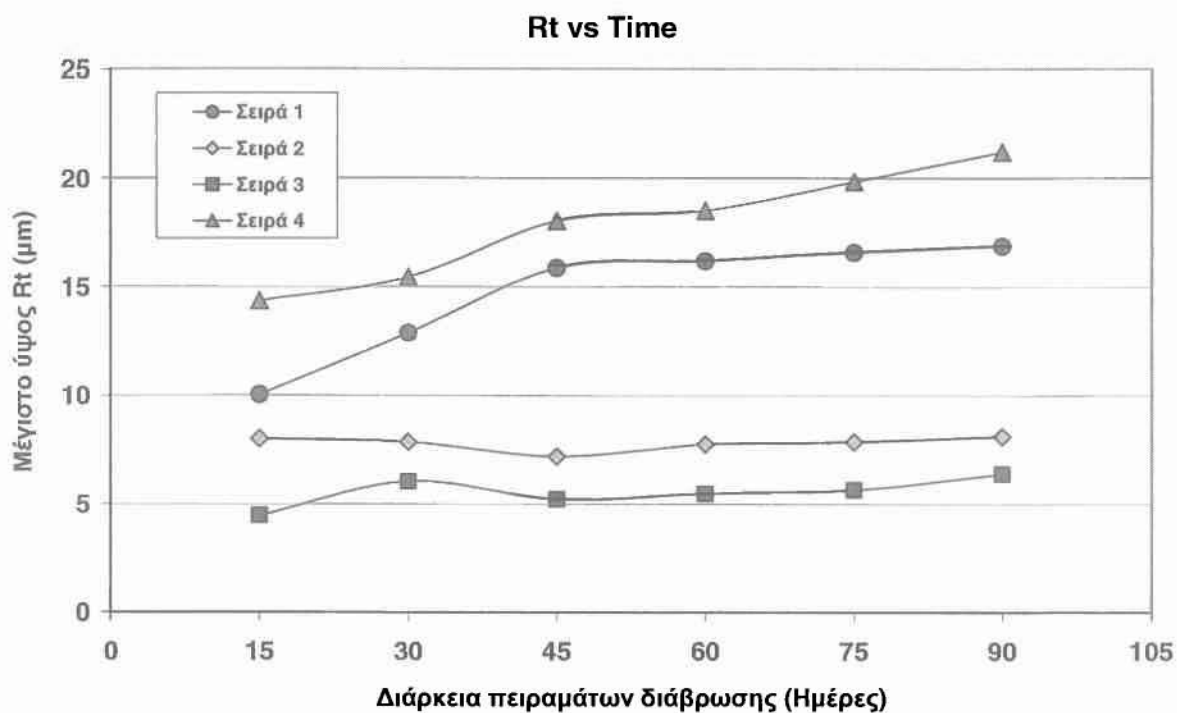
— **R_a (μm): αριθμητικός μέσος του ύψους της τραχύτητας.** Μολονότι παρουσιάζει κάποιους εγγενείς περιορισμούς, η μέτρηση της είναι σχετικά εύκολη και δίνει μια πάρα πολύ καλή απεικόνιση των χαρακτηριστικών ύψους των προφίλ τραχύτητας. Ουσιαστικά πρόκειται για την πλέον χρησιμοποιούμενη παράμετρο. Πρακτικά δίνει μία μέση τιμή της τραχύτητας, ορίζεται ως η μέση απόλυτη απόκλιση από την μέση γραμμή και αναφέρεται στην γραμμή – περιοχή η οποία μετράται. Η παράμετρος δεν λαμβάνει υπ' όψιν της περιστασιακά υψηλές κορυφές και βαθιές κοιλάδες. Στο Σχήμα που ακολουθεί 7-8 παρουσιάζονται ανά πειραματική σειρά τα αποτελέσματα μέτρησης της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm) της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων του CuSn12 μετά το πέρας του πειράματος επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.



Σχήμα 7-8: Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra (μm) των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά

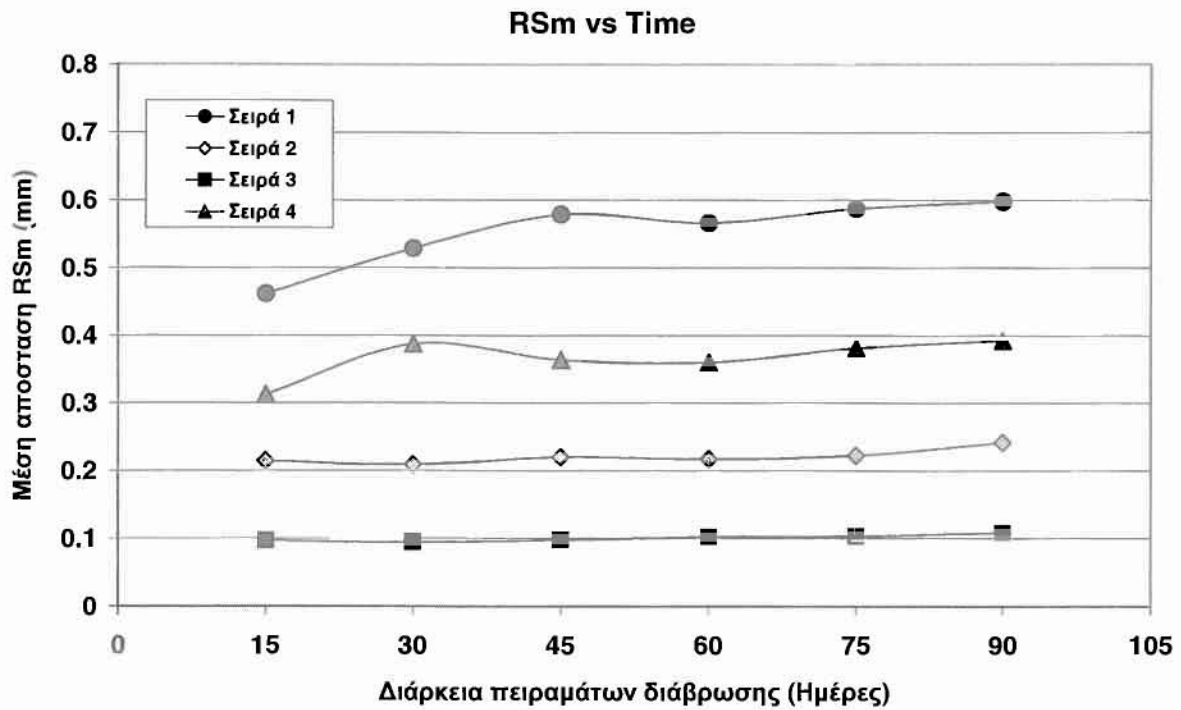
Η τιμή Ra δείχνει πως τα διαβρωμένα δοκίμια των σειρών κοπής 1 και 4 απέκτησαν τραχύτερη εξωτερική επιφάνεια. Και στις δύο σειρές κοπής, οι τιμές της Ra αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με αυξανόμενο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Αντίθετα σαφή ένδειξη παθητικοποίησης της εξωτερικής επιφάνειας των διαβρωμένων δοκιμίων των σειρών κοπής 2 και 3 παρατηρούνται καθ'όλη την διάρκεια των πειραμάτων διάβρωσης.

— R_t ή R_{max} (μm): μέγιστο ύψος μεταξύ μιας κοιλάδας και της αντίστοιχης κορυφής για την προσμετρώμενη επιφάνεια. Στο Σχήμα 7-9 παρουσιάζονται ανά σειρά κοπής τα αποτελέσματα μέτρησης του μέγιστου ύψους R_t (μm) της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων του CuSn12 μετά το πέρας του πειράματος της επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.



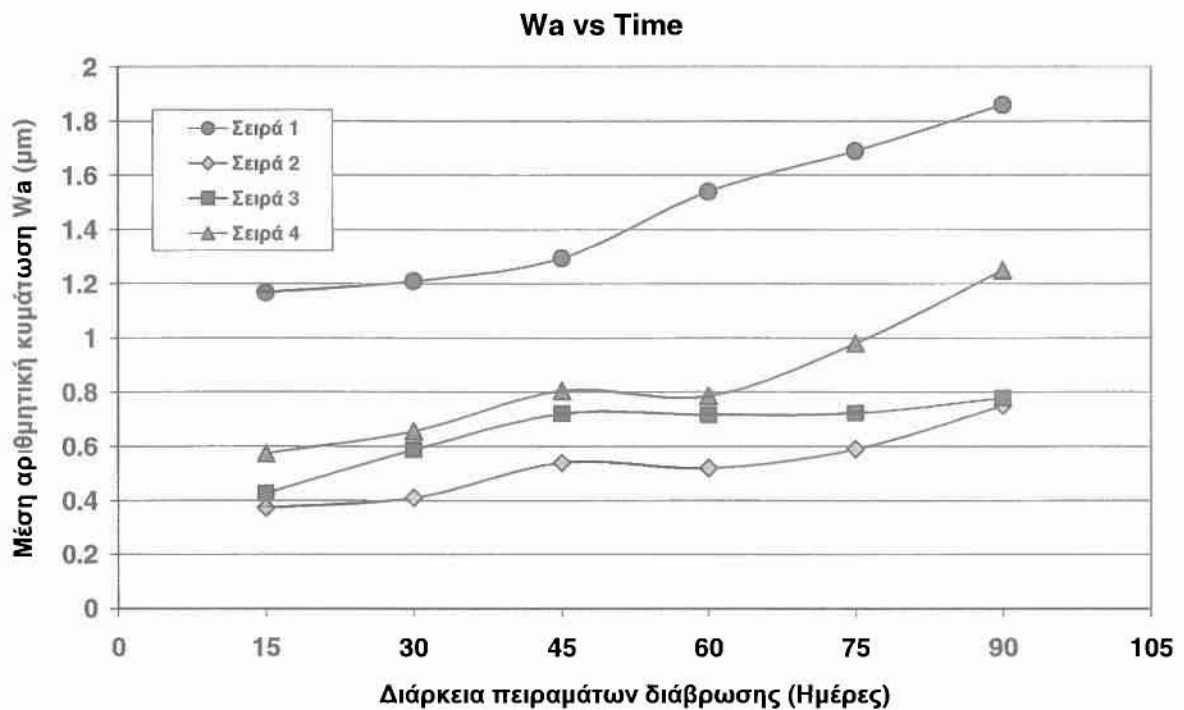
Σχήμα 7-9: Μεταβολή του μέγιστου ύψους R_t (μm) των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά

— RSm (mm): μέση απόσταση μεταξύ των κορυφών γύρω από την μέση γραμμή. Στο Σχήμα 7-10 παρουσιάζονται ανά σειρά κοπής τα αποτελέσματα μέτρησης της μέσης απόστασης RSm (mm) της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων του CuSn12 μετά το πέρας του πειράματος της επιταχυνόμενης διάβρωσης με εναλλακτικές εμβαπτίσεις.



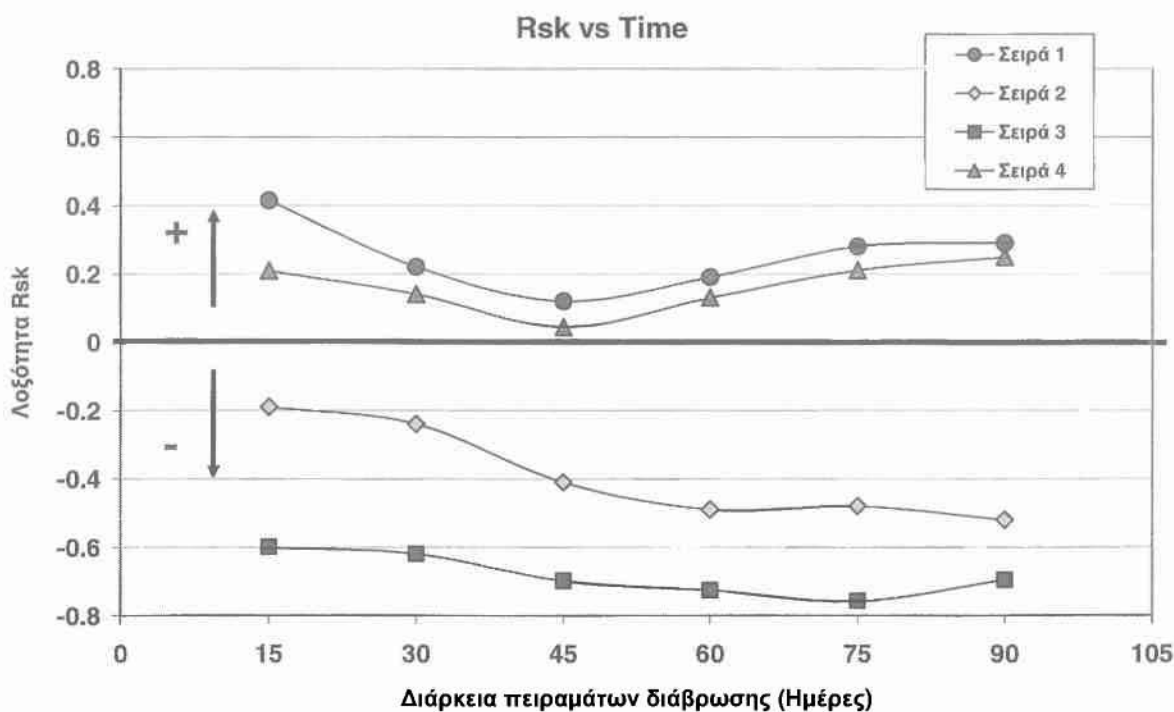
Σχήμα 7-10: Μεταβολή της μέσης απόστασης RSm των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά

— W_a (μm): αριθμητικός μέσος του ύψους της κυμάτωσης. Ουσιαστικά πρόκειται για την πλέον χρησιμοποιούμενη παράμετρο. Πρακτικά δίνει μία μέση τιμή της κυμάτωσης. Όπως και στην περίπτωση της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a , οι τιμές της W_a αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με αυξανόμενο χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον (Σχήμα 7-11). Μέγιστη κυμάτωση παρουσιάζουν τα διαβρωμένα δοκίμια της πρώτης σειράς κοπής για όλες τις πειραματικές συνθήκες.



Σχήμα 7-11: Μεταβολή της μέσης αριθμητικής κυμάτωσης W_a των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά

— *Rsk*: Η στατιστική λοξότητα του προφίλ της τραχύτητας. Πρακτικά αποτελεί ένα μέτρο της συμμετρίας του προφίλ γύρω από την μέση γραμμή. Περιγράφει την μορφή της κατανομής των κορυφών και κοιλάδων. Ίδιος αριθμός κοιλάδων και κορυφών συσχετίζεται με μηδενική τιμή *Rsk*. Επιφάνειες με περισσότερες κορυφές παρά κοιλάδες έχουν θετική τιμή *Rsk*. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η συνεισφορά των κοιλάδων στην τραχύτητα βαρύνει περισσότερο σε σχέση με εκείνη των κορυφών. Στο Σχήμα 7-12 παρουσιάζονται ανά σειρά τα αποτελέσματα μέτρησης του λοξότητας *Rsk* της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων του CuSn12 μετά το πέρας του πειράματος επιταχυνόμενης διάβρωσης.

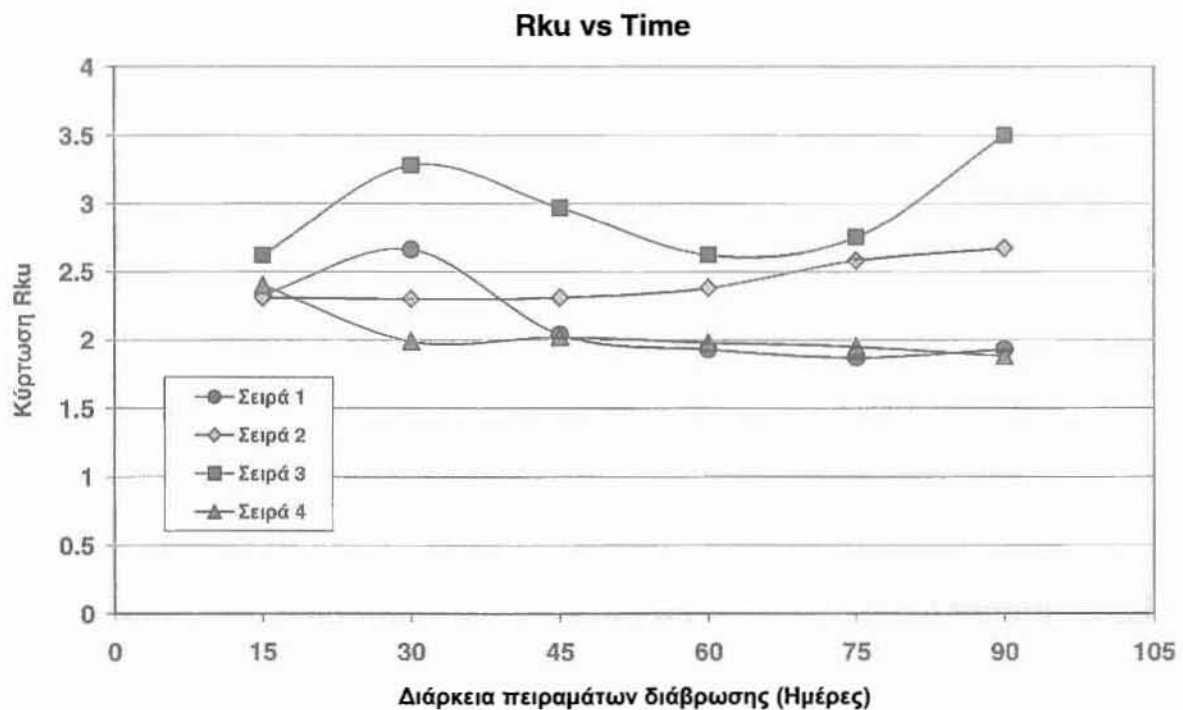


Σχήμα 7-12: Μεταβολή της λοξότητας *Rsk* των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η λοξότητα *Rsk* λαμβάνει μόνο θετικές τιμές για τα διαβρωμένα δοκίμια των σειρών κοπής 1 και 4. Αντίθετα αποτελέσματα παρατηρούνται για τις υπόλοιπες σειρές (αριστερή ασυμμετρία). Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το

συμπέρασμα της ύπαρξης έντονης διάβρωσης από βελονισμούς στα διαβρωμένα δοκίμια των σειρών κοπής 1 και 4.

— **Rku. Η στατιστική κύρτωση του προφίλ της τραχύτητας.** Πρακτικά αποτελεί ένα μέτρο της οξύτητας του προφίλ γύρω από την μέση γραμμή. Περιγράφει την μορφή της κατανομής των κορυφών και κοιλάδων. Ίδιος αριθμός κοιλάδων και κορυφών συσχετίζεται με μηδενική τιμή Rku. Επιφάνειες με περισσότερες κορυφές παρά κοιλάδες έχουν θετική τιμή Rku. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η συνεισφορά των κοιλάδων στην τραχύτητα βαρύνει περισσότερο σε σχέση με εκείνη των κορυφών. Τέλος, στο Σχήμα 7-13 παρουσιάζονται ανά πειραματική σειρά τα αποτελέσματα μέτρησης της κύρτωσης Rku της διαβρωμένης επιφάνειας των δοκιμίων του CuSn12 μετά το πέρας του πειράματος επιταχυνόμενης διάβρωσης.



Σχήμα 7-13: Μεταβολή της κύρτωσης Rku των διαβρωμένων δοκιμίων του CuSn12 ανά πειραματική σειρά

Οι τιμές κύρτωσης R_{ku} λαμβάνουν θετικές τιμές για όλες τις σειρές σε ένα στενό εύρος τιμών γύρω από την περιοχή 2-3 κοπής υποδεικνύοντας μεγαλύτερη κατανομή υψηλών κορυφών έναντι των χαμηλών κοιλάδων και λεπτόκυρτη εξωτερική επιφάνεια διάβρωσης.

Κεφάλαιο 8 Σύνοψη συμπερασμάτων

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας συστηματικής και εκτεταμένης έρευνας της τοπογραφίας διαβρωμένων κραμάτων χαλκού σε θαλάσσιο περιβάλλον. Για την έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια CuSn12 διαβρωμένα σε συνθήκες εργαστηριακής επιταχυνθείσας διάβρωσης. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων των διαβρωμένων επιφανειών του κράματος χαλκού/κασσίτερου CuSn12 προέκυψε μία γενική υποβάθμιση του υλικού.

- Τα χλωριόντα της δοκιμής εναλλακτικών εμβαπτίσεων προκάλεσαν διάβρωση με βελονισμούς (pitting). Για χρόνους έκθεσης στο υδατικό διάλυμα μέχρι 15 ημέρες, ο ρυθμός διάβρωσης λαμβάνει χαρακτηριστικά υψηλές τιμές. Μετά την αφαίρεση των προϊόντων διάβρωσης, οι βελονισμοί (pitting) στο κράμα χαλκού/κασσίτερου αφήνουν εσοχές, οι οποίες μπορεί να χαρακτηριστούν ως ενεργά κέντρα επιτάχυνσης της διάβρωσης. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, η διάβρωση δημιουργεί ένα στρώμα οξειδίων στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων το οποίο επιβραδύνει τη διαβρωτική διαδικασία. Έτσι επιβραδύνεται η περαιτέρω διείσδυση των ιόντων του χλωρίου εντός του μεταλλικού υποστρώματος μέσω μηχανισμών διάχυσης.
- Σημαντικό εύρημα της μελέτης αυτής, είναι η απώλεια μάζας των δοκιμίων εξ αιτίας της έκθεσης σε επιταχυνόμενο περιβάλλον ιόντων χλωριούχου νατρίου (3.5%). Η μείωση του βάρους με τον χρόνο διάβρωσης μετά από την παρέλευση μιας κρίσιμης χρονικής περιόδου, ακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό γραμμική σχέση σχεδόν για όλες τις σειρές κοπής. Από τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα είναι δυνατόν να

προβλεφθούν οι τιμές σχετικής απώλειας βάρους για διάφορους χρόνους σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

➤ Από την παρατήρηση των στερεοσκοπικών φωτογραφιών, τα διαβρωτικά τρήματα εμφανίζονται κατά τόπους και με την μορφή κόκκων. Στη συνέχεια οι κόκκοι αυτοί εξαπλώνονται σε ολόκληρη την εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων βάσει κυρίως του χρόνου εμφάνισης των δοκιμίων στο διαβρωτικό διάλυμα του NaCl. Με αυξανόμενο χρόνο έκθεσης ο αριθμός και το βάθος των τρημάτων αυξάνεται αναλόγως. Γίνεται επίσης φανερό ότι η διάβρωση είναι σαφώς λιγότερο έντονη στην περίπτωση των δοκιμίων της τρίτης σειράς για τους ίδιους χρόνους έκθεσης, προφανώς λόγω των χαρακτηριστικών συνθηκών αποβολής του συγκεκριμένου υλικού.

➤ Τα πειράματα προφίλομετρίας έδειξαν ότι οι κυριότερες χαρακτηριστικές παράμετροι της τοπογραφίας (τραχύτητα, κυμάτωση) των διαβρωμένων δοκιμίων του κράματος χαλκού/κασσίτερου μετά το πέρας των πειραμάτων διάβρωσης, παρουσιάζουν σημαντική υποβάθμιση υποστηρίζοντας σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την στερεοσκοπική ανάλυση τους. Τα διαβρωμένα δοκίμια των πειραματικών σειρών 1 και 4 απέκτησαν σαφώς τραχύτερη εξωτερική επιφάνεια σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο πειραματικές σειρές .

➤ Η μεγάλες τιμές πρόωσης καθώς και οι χαμηλές τιμές ταχύτητας κοπής, φαίνεται να οδηγούν σε μεγαλύτερη τραχύτητα και επομένως εντονότερη διάβρωση όπως φαίνεται από τις πειραματικές σειρές 1 και 4 και τη μελέτη των χαρακτηριστικότερων μεγεθών τις προφίλομετρίας τους. Αντιθέτα οι χαμηλές τιμές πρόωσης και οι υψηλές τιμές ταχύτητας κοπής δείχνουν να παραγουν λιγότερο τραχείς επιφάνειες που επιδεχονται μικροτερης διάβρωσης όπως φαίνεται από τις πειραματικές σειρές 2 και 3.

- Η αύξηση της τραχυτητας οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες βάρους και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερους βαθμούς διάβρωσης άρα και σε μειωμένη διάρκεια ζωής του αντίστοιχου υλικού.

Κεφάλαιο 9 Θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εγέρθηκαν κάποιες σκέψεις και διάφορα ερωτήματα, η επίλυση των οποίων ενδεχομένως θα συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της τοπογραφίας διαβρωμένων επιφανειών από χαλκό σε θαλάσσιο περιβάλλον. Ειδικότερα, προτείνεται για μελλοντική έρευνα:

- Η ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου πρόβλεψης της τοπογραφίας επιφάνειας/διάρκειας ζωής σε διάβρωση με χρήση τοπογραφικών παραμέτρων (τραχύτητας και κυμάτωσης) για κάθε στάδιο της συνολικής διαδικασίας διάβρωσης και η εφαρμογή του σε κράματα χαλκού-κασσίτερου.
- Μελέτη των διαβρωμένων επιφανειών με σύγχρονες μεθόδους προγραμματισμού και ανάλυσης π.χ χρήση ψηφιακής ανάλυσης εικόνας και υπολογισμός περισσότερων πειραματικών παραμέτρων επιστημονικού ενδιαφέροντος
- Μελέτη της συμπεριφοράς των διαβρωμένων επιφανειών του CuSn12 σε διάφορα περιβάλλοντα διάβρωσης και συγκριτική αξιολόγηση με τη δράση της φυσικής διάβρωσης

Βιβλιογραφία

- [1] Robbiola, L., J.-M. Blengino, C. Fiaud, (1998). Morphology and mechanisms of formation of natural patinas on archaeological Cu–Sn alloys, *Corros. Sci.*40: 2083–2111.
- [2] ChunChun Xu, JuLin Wang, (2003). Investigation of the chemical and electrochemical behaviour of mass transfer at an archaeological bronze/soil interface, *Anti Corros. Meth. Mater.* 50 (5): 326–333.
- [3] Taylor R.J. and I.D. MacLeod, (1985). Corrosion of bronzes on shipwrecks – a comparison of corrosion rates deduced from shipwreck material and from electrochemical methods, *Corros. NACE* 41 pp. 100–104.
- [4] Garbassi F. and E. Mello, (1984). Surface spectroscopic studies on patinas of ancient metal objects, *Stud. Conserv.* 29: 172–180
- [5] Chiavari, C., K. Rahmouni, H. Takenouti, S. Joiret, P. Vermaut and L. Robbiola, (2007). Composition and electrochemical properties of natural patinas of outdoor bronze monuments, *Electrochim. Acta* 52: 7760–7769.
- [6] Mabille, I., Bertrand, A., Sutter, E.M.M. and Fiaud, C. (2003). "Mechanism of dissolution of a Cu-13Sn alloy in low aggressive conditions." *Corrosion Science* 45: 855-866.
- [7] Debiemme-Chouvy, C., F. Ammeloot, E.M.M. (2001). Sutter, X-ray photoemission investigation of the corrosion film formed on a polished Cu–13Sn alloy in aerated NaCl solution, *Appl. Surf. Sci.* 174 55–61.

- [8] Ammeloot, F., C. Fiaud, E.E.M. Sutter, (1999). Characterization of the oxide layers on a Cu–13Sn alloy in a NaCl aqueous solution without and with 0.1 M benzotriazole. Electrochemical and photoelectrochemical contributions, *Electrochim. Acta* 44: 2549–2558.
- [9] Souissi, N., E. Sidot, L. Bousselmi, E. Triki and L. Robbiola, (2007). Corrosion behaviour of Cu–10Sn bronze in aerated NaCl aqueous media – electrochemical investigation, *Corros. Sci.* 49 (2007), pp. 3333–3347
- [10] Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Χρυσουλάκη, Παντελή Δ., Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1996, σελ. 641
- [11] Principles of corrosion engineering and corrosion control / Zaki Ahmad. - Oxford : Elsevier/Butterworth-Heinemann,. 2006, 656 ρ
- [12] Smith, W.F., Structure and properties of engineering alloys, second edition, 1993, McGraw-Hill,
- [13] DIN 50900.2, Corrosion of Metals – Terms – Electrochemical Terms, 1984.
- [14] ISO 8044, Corrosion of Metals and Alloys – Vocabulary, 1989.
- [15] J.R. Davis (Ed.) Corrosion: Understanding the Basics, ASM International, New York, 2000.
- [16] Α. Λεκάτου, “Εισαγωγή στη Διάβρωση και στην Προστασία Μετάλλων ”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, 2005, σελίδες 298
- [17] Δ. Κ. Υφαντής, Διάβρωση - Προστασία - Οργανικές επικαλύψεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1988.
- [18] Nestor Perez, Electrochemistry and Corrosion Science, 2004,

- [19] ASM International (2001) "Engineering Properties and Service Characteristics" in ASM Specialty Handbook - Copper and Copper Alloys, Ed. Davis, J. R., ASM International, pp. 385 – 392.
- [20] Σαμαρά Κλ. (2007). Μελέτη της πατίνας αρχαίων κραμάτων χαλκού, Καθαρισμός και Συντήρηση. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, σελ 408.
- [21] A. von Richthofen, R. Domnick, R. Cremer, Fresenius J. (1997). Anal. Chem. 358, 312.
- [22] Pourbaix, Marcel (1974) "Establishment and Interpretation of Potential – pH Equilibrium Diagrams" in Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, National Association of Corrosion Engineers, Houston, Tex, pp. 384 – 392.
- [23] Davim, J. Paulo (2008). "Machining: Fundamentals and Recent Advances", Springer.
- [24] Α. Μάμαλης, "Κατεργασίες των υλικών", Έκδοση Ε.Μ.Π., 1990.
- [25] Κ-Δ. Ε. Μπουζάκης, "Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού", Εκδ. ΖΗΤΗ, 2000.
- [26] Λιαρόπουλος Ιωάννης, (2008). Επιταχυνόμενη Δοκιμή Διάβρωσης Σε Ηλεκτροδιαβρωμένες Επιφάνειες Εργαλειοχαλύβων, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 171.
- [27] Roy. A. Lindberg, "Process and Materials of Manufacture", PHI / Pearson Education Fourth Edition 2006.
- [28] Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay, ASME B46.1-2002. (Revision of ASME B46.1-1995). American Society of Mechanical Engineers, ISBN: 0791828018, 2003.
- [29] ASTM G44-94, Standard practice for evaluating stress corrosion cracking resistance of models and alloys by alternate immersion in 3.5% sodium chloride solution, in: Annual

- Book of ASTM Standards, Section 3, Metal Test Methods and Analytical Procedures, West Conshohocken, ASTM, Philadelphia, USA, 1995, pp. 157–161
- [30] Pratt, G.C. (1973). Materials for plain bearings, *Int Metall Rev* **18** (Review 174) (1973), pp. 23–25.
- [31] Ünlü Bekir Sadık, Enver Atik and Cevdet Meriç, (2007). Effect of loading capacity (pressure–velocity) to tribological properties of CuSn10 bearings, *Materials & Design* **28**, (7), 2160-2165.
- [32] Alemdag, Y. and T. Savaşkan, (2009). Mechanical and tribological properties of Al-40Zn-Cu alloys, *Tribology International*, **42** (1), pp. 176-182.
- [33] Uhlig. H.H. (1973). Corrosion and corrosion control, Wiley, New York.
- [34] Fontana M.G. and N.D. Greene, (1984). Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York
- [35] R.B.Alvarez, H. J. Martin, M.F. Horstemeyer, M.Q. Chandler , N. Williams, P.T. Wang , A. Ruiz, (2010). Corrosion relationships as a function of time and surface roughness on a structural AE44 magnesium alloy, *Corrosion Science*, *article in press*.
- [36] Sherif, E.-S.M., Erasmus, R.M., Comins, J.D. (2008). Inhibition of copper corrosion in acidic chloride pickling solutions by 5-(3-aminophenyl)-tetrazole as a corrosion inhibitor. *Corrosion Science*, **50** (12), pp. 3439-3445.
- [37] Zhiming Shi, Ming Liu and Andrej Atrens, (2010). Measurement of the corrosion rate of magnesium alloys using Tafel extrapolation. *Corrosion Science*, **52**(2), pp. 579-588
- [38] Robert Baboian. (2005). Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation: 2nd Edition. p.882
- [39] ASTM G46. Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion.

[40] Chongzheng, Fan., Hu. Keliang and Wu. Youshi, (1997). *Sci. Conserv. Archaeol.* 9 (1), pp. 20–24.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073795



15