



Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΚΡΑΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΔΟΥΛΟΣ - Α.Μ. 41820

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΚΑΛΔΕΛΗΣ - Α.Μ. 40585



Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Δρ. Ψυλλάκη Πανδώρα  
Συνεπιβλέπων καθηγητής: κ. Μουρλός Αθανάσιος, MsC

Αιγάλεω, Νοέμβριος 2017

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνική της κλασικής συγκόλλησης βολταϊκού τόξου χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία μεταλλικών επιγομώσεων με βάση το σίδηρο. Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη των επιγομώσεων και εν συνεχεία ο πειραματικός έλεγχος των λαμβανομένων επιφανειών. Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική MIG-MAG και ηλεκτρόδιο με σκόνη καρβιδίου του τιτανίου (TiC).

Έγιναν δύο σειρές τριβολογικών δοκιμών με χρήση διαφορετικών ανταγωνιστικών υλικών, προκειμένου να αξιολογηθούν και να συγκριθούν μεταξύ τους:

- Κυλινδρικό στέλεχος (στυλίσκου) που φέρει στην άκρη του σφαίρα αλουμίνας ( $Al_2O_3$ ), προσαρμόστηκε σε τριβόμετρο τύπου στυλίσκου-δίσκου, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των επιγομώσεων σε φθορά κατά τη χρήση.
- Πειραματική συσκευή ξηρής εκτριβής με παρεμβολή τρίτου σώματος, ώστε να προσομοιωθεί η λειτουργία κατά τη θραύση των πετρωμάτων. Τέτοιοι θραυστήρες είναι κατασκευασμένοι από μέταλλα, στα οποία υπάρχουν σκληρές επικαλύψεις.

## ABSTRACT

Arc welding technique was applied in order to create hardfacing deposits onto carbon steel substrates. The aim of the present study was the theoretical and the experimental examination of the created surfaces. For this purpose, a flux-cored electrode was used and the hardfacing were deposited via MIG technique.

In order to evaluate the in-service performance of the new surfaces, two different tribological tests were carried out:

- Ball-on-disk friction testing using an  $Al_2O_3$  sphere as counterface.
- Third body abrasion testing using silica sand  $SiO_2$ .

After the friction testing, wear volume and wear mechanisms were also evaluated.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	1
ABSTRACT .....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	10
1.1 Ο Ανθρακούχος χάλυβας .....	10
1.2 Η αναγόμευση .....	10
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	13
2.1 Αναγόμευση με φλόγα οξυγόνου-ασετυλίνης.....	13
2.2 Αναγόμευση με ηλεκτρική ενέργεια .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	29
3.1 Χαρακτηριστικά μεθόδου GMAW .....	29
3.2 Εξοπλισμός συγκόλλησης.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	45
Προγενέστερες ερευνητικές εργασίες .....	45
4.1 Συγκόλληση τόξου (FCAW).....	45
4.2 Συγκόλληση Laser (Laser Cladding) .....	48
4.3 Συγκόλληση πλάσματος (Plasma).....	50
4.4 Συγκόλληση με επενεδυμένο ηλεκτρόδιο (SMAW) .....	52
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	54
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	54
5.1 Μέταλλο βάσης.....	54
5.2 Εξοπλισμός Απόθεσης και τριβολογικών δοκιμών.....	55
5.3 Δημιουργία αντιτριβικών εναποθέσεων-επικαλύψεων .....	65
5.4 Τριβολογική συμπεριφορά (Τριβή – Φθορά).....	67
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	70
6.1 Μελέτη Μικροδομής.....	70
6.2 Τριβολογική συμπεριφορά βάσει δοκιμής ξηράς εκτριβής.....	75
6.3 Τριβολογική συμπεριφορά βάσει δοκιμής Σφαίρας-Δίσκου.....	77
6.4 Σύγκριση Τριβής - Φθοράς τεχνικής FCAW και εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα .....	81
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 .....	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	92

## **ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

**Σχήμα 2.1.** Αναγόμευση με φλόγα οξυγόνου – ασετυλίνης

**Σχήμα 2.2.** Αναγόμευση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο

**Σχήμα 2.3.** Τύποι επενδεδυμένων ηλεκτροδίων

**Σχήμα 2.4.** Βέλτιστη διαδοχή εναπόθεσης υλικού για την αναγόμευση κοπτικών άκρων εκσκαφών.

**Σχήμα 2.5.** Αναγόμευση με την τεχνική TIG (GTA)

**Σχήμα 2.6.** Αυτόματη αναγόμευση με την τεχνική TIG (GTA)

**Σχήμα 2.7.** Αναγόμευση με τη τεχνική GMA

**Σχήμα 2.8.** Τυπικές διατομές ηλεκτροδίων, για αναγόμευση με την τεχνική GMA

**Σχήμα 2.9.** Αυτόματη αναγόμευση με την τεχνική MIG

**Σχήμα 3.1.** Τεχνική GMAW

**Σχήμα 3.2.** Διάταξη συγκόλλησης τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο σε ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου GMA

**Σχήμα 3.3.** Μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση GMAW/MIG

**Σχήμα 3.4.** Εξοπλισμός τεχνικής GMAW

**Σχήμα 3.5.** Πιστόλι συγκόλλησης GMAW

**Σχήμα 4.1.** Μικροδομή κραμάτων μετά από επιγόμευση

**Σχήμα 4.2.** Σκληρότητα και φθορά συναρτήσσει του ποσοστού τιτανίου

**Σχήμα 4.3.** Συντελεστής τριβής συναρτήσσει του χρόνου

**Σχήμα 4.4.** Μορφολογία επικάλυψης

**Σχήμα 4.5.** Επίδραση του Mo στα καρβίδια που βρίσκονται πάνω στην επικάλυψη

**Σχήμα 4.6.** SEM μικρογραφία που δείχνει την τυπική μικροδομή της επένδυσης και των καρβιδίων με πλάσμα

**Σχήμα 4.7.** Σχετική αντίσταση σε φθορά της επικάλυψης σε σχέση με τον κοινό ανθρακούχο χάλυβα

**Σχήμα 4.8.** Μικρογραφία SEM

**Σχήμα 4.9.** Όγκος φθοράς συναρτήσει του μήκους ολίσθησης

**Σχήμα 4.10.** Σκληρότητα συναρτήσει χρόνου ολίσθησης

**Σχήμα 5.1.** Μηχανή Blumig 503SH, Cemont για συγκολλήσεις MIG/MAG

**Σχήμα 5.2.** Τροφοδοτικό ηλεκτροδίου TF 400H, Cemont

**Σχήμα 5.3.** Τριβόμετρο CSM-Instruments

**Σχήμα 5.4.** Μέρη τριβομέτρου CSM

**Σχήμα 5.5.** Διάγραμμα συντελεστή τριβής συναρτήσει του μήκους ολίσθησης

**Σχήμα 5.6.** Τραχύμετρο-Προφیلόμετρο Taylor-Hobson

**Σχήμα 5.7.** Στυλίσκος με σφαίρα αλουμίνιας

**Σχήμα 5.8.** Πειραματική συσκευή εκτριβής κατά ASTM G65

**Σχήμα 5.9.** Δομικά μέρη συσκευής κατά ASTM G65

**Σχήμα 5.10.** Μακρογραφία εναποθέσεων

**Σχήμα 5.11.** Διάγραμμα προτεινόμενων ρυθμίσεων και δοκιμών εναποθέσεων (V-A)

**Σχήμα 6.1** Σύθεση μακρογραφιών μικροσκοπίου της επιγόμεσης

**Σχήμα 6.2** Μικρογραφία SEM

**Σχήμα 6.3** Μικρογραφία SEM

**Σχήμα 6.4** Μικρογραφία SEM

**Σχήμα 6.5.** Διάγραμμα φθοράς

**Σχήμα 6.6.** Δοκίμια: α) S235, β) Hardox, γ) FCAW TiC

**Σχήμα 6.7.** Παράδειγμα προφίλομετρησης 10N του δοκιμίου FCAW - TiC

**Σχήμα 6.8.** Παραδειγμα μέτρησης όγκου φθοράς

**Σχήμα 6.9.** Συγκριτικό διάγραμμα κατατομής επιφανειών μετά από δοκιμή για διάφορα φορτία

**Σχήμα 6.10.** Φθορά ανταγωνιστικού υλικού σφαίρας  $Al_2O_3$  σε επαφή με την επιγόμωση

**Σχήμα 6.11.** Φθορά ανταγωνιστικού υλικού σφαίρας  $Al_2O_3$  σε επαφή με εμπορικό αντιτριβικό χάλυβα

**Σχήμα 6.12.** Διαγράμματα εξέλιξης του συντελεστή τριβής σε επαφή με εμπορικό την επιγόμωση

**Σχήμα 6.13.** Διαγράμματα εξέλιξης του συντελεστή τριβής σε επαφή με εμπορικό αντιτριβικό χάλυβα

**Σχήμα 6.14.** Διάγραμμα όγκου φθοράς επιγομώσεων

**Σχήμα 6.15.** Διάγραμμα βάθους φθοράς επιγομώσεων

**Σχήμα 6.16.** Διάγραμμα πλάτους φθοράς επιγομώσεων

**Σχήμα 6.17.** Διάγραμμα συντελεστή φθοράς επιγομώσεων

**Σχήμα 6.18.** Διάγραμμα όγκου φθοράς εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα

**Σχήμα 6.19.** Διάγραμμα βάθους φθοράς εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα

**Σχήμα 6.20.** Διάγραμμα συντελεστή φθοράς εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα

**Σχήμα 6.21.** Συγκριτικό διάγραμμα φθοράς πειραματικών επιγομώσεων

**Σχήμα 6.22.** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή φθοράς πειραματικών επιγομώσεων

**Σχήμα 6.23.** Διαγράμματα σύγκρισης του μέσου συντελεστή τριβής

**Σχήμα 6.24.** Συγκριτικό διάγραμμα φθοράς πειραματικών επιγομώσεων

**Σχήμα 6.25.** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή φθοράς πειραματικών επιγομώσεων

## **ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 2.1** Συνήθη επενδεδυμένα ηλεκτρόδια αναγόμεσης, οι ιδιότητες και η χρησιμοποίησή τους

**Πίνακας 2.2** Παράμετροι αναγόμεσης με τη μέθοδο TIG (GTA) και ηλεκτρόδιο stellite

**Πίνακας 3.1** Εφαρμογές προστατευτικών αερίων με διάφορα μέταλλα

**Πίνακας 5.1** Χημική σύσταση μετάλλου βάσης

**Πίνακας 5.2** Μηχανικές ιδιότητες μετάλλου βάσης

**Πίνακας 5.3** Χαρακτηριστικά μηχανής συγκόλλησης

**Πίνακας 5.4** Προτεινόμενες ρυθμίσεις κατασκευαστή ηλεκτροδίου

**Πίνακας 5.5** Ιδιότητες υλικών σφαίρας

**Πίνακας 6.1** Αποτελέσματα μικροσκοπίου

**Πίνακας 6.2** Αποτελέσματα μικροσκοπίου

**Πίνακας 6.3** Αποτελέσματα μικροσκοπίου

**Πίνακας 6.1** Μετρήσεις μάζας



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ & ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

SAW	ShieldArcWelding
Electroslag	Ηλεκτροσκωριακή
MMA	ManualMetalArc
GTA	GasTungstenArc
TIG	TungstenInertGas
GMA	Gas Metal Arc
SA	Submerged aArc
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
Ar	Αργό
He	Ήλιο
GMAW	Gas Metal Arc Welding
CO <sub>2</sub>	Διοξείδιο του Άνθρακα
H <sub>2</sub>	Υδρογόνο
O <sub>2</sub>	Οξυγόνο
N <sub>2</sub>	Άζωτο
NO	Μονοξείδιο του Αζώτου
ΣΡΗΘ	Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Θετικό
ΣΡΗΑ	Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Αρνητικό
SMAW	Shield Arc Metal Arc Welding
Duty cycle	ΚύκλοςΛειτουργείας
Pushtype	Τύποςτροφοδοσίαςσύρματος

Pull type	Τύπος τροφοδοσίας σύρματος
Push - pull type	Τύπος τροφοδοσίας σύρματος
FCAW	Flux-CoredArcWelding
Magaluma	ΜαγγάνιοΑλουμίνιο
Laser cladding	ΕπικάλυψημεΛείζερ
XRD	ΠερίθλασηΑκτίνωνΧ
SEM	Ηλεκτρονικό ΜικροσκόπιοΣάρωσης
EDS	Στοιχειακός αναλυτής
Laps	Περιστροφές
Hardox	Εμπορική ονομασία αντιτριβικού χάλυβα

### 1.1 Ο ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ

Ο κοινός ανθρακούχος χάλυβας είναι κράμα σιδήρου-άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων. Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Ο χάλυβας είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις βαριές βιομηχανίες.

### 1.2 Η ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ

Η αναγόμωση[1], χαρακτηρίζεται από την ακριβείας μεταλλουργική σύντηξη της εναποτιθέμενης επίστρωσης, με το βασικό υλικό, η συμμετοχή του οποίου στο μέταλλο της σχηματισμένης επίστρωσης ανέρχεται μέχρι 60%. Η πηγή θερμότητας τήξης του πρόσθετου υλικού με μορφή σύρματος, ράβδου, ταινίας ή σκόνης είναι φλόγα αερίου, ηλεκτρικό τόξο ή τόξο πλάσματος. Είναι δυνατόν να γίνει εναπόθεση στρωμάτων πάχους από 0,05 mm και μέχρι άνω των 100 mm με ένα πέρασμα.

Οι εναποτιθέμενες επιστρώσεις έχουν μεγάλη μεταλλουργική και δομική ομοιογένεια, εκτός των περιπτώσεων αναγόμωσης, όπου επιβάλλεται η σκλήρυνση με κράματα υψηλής σκληρότητας, με την προϋπόθεση ότι επιτρέπεται σ' αυτά η εμφάνιση ρηγματώσεων.

Οι τελούμενες διαδικασίες με μεγάλη γραμμική ενέργεια, όπως η αναγόμωση με βυθιζόμενο τόξο (SAW), ηλεκτροσκοριακή (electroslag), αερίων, δημιουργούν σημαντική υπερθέρμανση των αντικειμένων στα οποία διενεργείται η αναγόμωση.

Ως επακόλουθο έχουμε κίνδυνο εμφάνισης ρηγματώσεων στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά, δημιουργία εύθραυστων φάσεων στην περιοχή σύντηξης του μετάλλου βάσης

με την εναποτιθέμενη επίστρωση και σημαντικές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις συγκόλλησης.

Πριν την έναρξη εναπόθεσης επιστρώσεων με τις απαιτούμενες λειτουργικές ιδιότητες, πρέπει να είναι γνωστό με ακρίβεια το είδος του υλικού βάσης, η χημική του σύσταση και η δομική του κατάσταση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την επισκευή και αναγεννητική αναγόμωση, επειδή στο υλικό μπορούν να εμφανισθούν δομικές μεταβολές δύσκολα καθοριζόμενες από το αποτέλεσμα των φορτίσεων κατά τη λειτουργία.

Απαραίτητη είναι η προετοιμασία των επιφανειών με ακρίβεια, η αφαίρεση οποιωνδήποτε ελαττωμάτων και ιδιαίτερα ρηγμάτων, με σκοπό την αποφυγή των ψαθυρών περικρυσταλλικών φάσεων στην περιοχή σύντηξης της εναποτιθέμενης επίστρωσης με το μέταλλο βάσης καθώς και τη μείωση των θερμικών τάσεων στο κύριο στρώμα.

Εάν η εναπόθεση επιστρώσεων είναι ενιαίο μέρος της παραγωγής προϊόντων, τότε η χημική σύσταση του υλικού βάσης προσαρμόζεται στην επίστρωση του υλικού και στις βέλτιστες δεδομένες συνθήκες της τεχνολογίας εναπόθεσης. Υπάρχει επίσης δυνατότητα για επόμενο βήμα σχεδιασμού προϊόντων έτσι, ώστε να είναι δυνατή η πολλαπλή αναγεννητική αναγόμωση μετά από καθορισμένο βαθμό φθοράς. Αυτή η λύση προσφέρεται ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ελάστρων, τροχών τραίνων, σφύρων θραύσης κ.ά..

Αξιοσημείωτο πλεονέκτημα της προγραμματισμένης αναγεννητικής αναγόμωσης είναι ότι η διάρκεια ζωής των προϊόντων μπορεί να είναι πολύ αυξημένη, ακόμη και πάνω από 20 φορές, με κόστος πολύ λίγο υψηλότερο από το κόστος του πρότυπου προϊόντος.

Τα βασικά κριτήρια επιλογής της διαδικασίας εναπόθεσης επιστρώσεων για αναγεννητική αναγόμωση ή για την ανέγερση αντικειμένων είναι:

1. Το πλήθος και η μάζα αναγεννητικής αναγόμωσης ή η ανέγερση αντικειμένων.
2. Το πλήθος του υλικού του αντικειμένου, η κατάστασή του και η συγκολλητότητά του.
3. Η θέση εναπόθεσης της στρώσης.

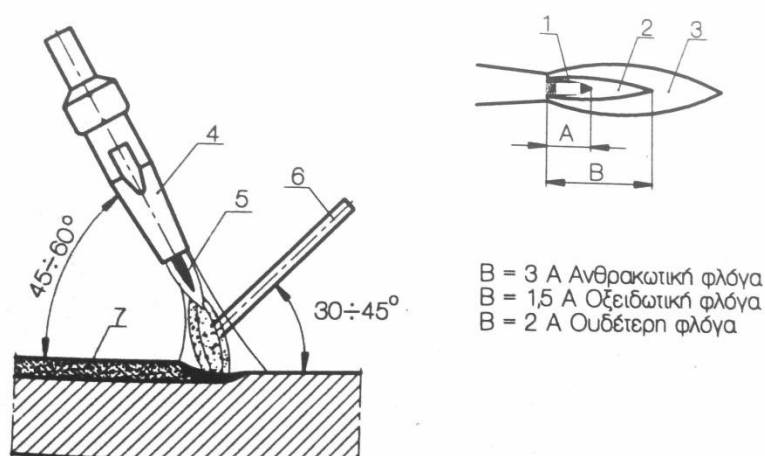
4. Οι απαιτούμενες ιδιότητες της επίστρωσης, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή τη φθορά, τη δυναμική φόρτιση, την τριβή, τη διάβρωση, τους κραδασμούς, τη θερμική φόρτιση ή τις σύνθετες συνθήκες λειτουργίας.
5. Η απαιτούμενη ποιότητα της επίστρωσης, το πάχος της, η μορφή της, όπως και το μέγεθος και η κατάσταση της επιφάνειας.
6. Ο τύπος, η μορφή και το κόστος των πρόσθετων υλικών.
7. Η απαιτούμενη απόδοση απόθεσης της επίστρωσης.
8. Το είδος των παρεχόμενων συσκευών ή το κόστος νέων συσκευών.

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

#### 2.1 ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΜΕ ΦΛΟΓΑ ΟΞΥΓΟΝΟΥ-ΑΣΕΤΥΛΙΝΗΣ

Η αναγόμωση με αέρια είναι η εναπόθεση στην επιφάνεια του αντικειμένου στρώματος ρευστού μετάλλου λιωμένου με τη φλόγα αερίων (Σχ. 2.1).[2]



**Σχήμα 2.1.** Αναγόμωση με φλόγα οξυγόνου - ασετυλίνης: 1 - πυρήνας, 2 - αναγωγική ζώνη, 3 - οξειδωτική ζώνη, 4 - καυστήρας αερίων, 5 - φλόγα αερίων, 6 - ράβδος, 7 - επίστρωση.

Το εναποτιθέμενο υλικό που χρησιμοποιείται είναι συμπαγές σύρμα ή σκόνη. Η αναγόμωση επιτυγχάνεται χειρωνακτικά, ημιαυτόματα ή αυτόματα. Το βασικό καύσιμο αέριο είναι το ακετυλένιο, με θερμοκρασία φλόγας περίπου 3100 °C.

Με την αναγόμωση αερίων επιτυγχάνεται λεία, υψηλής ποιότητας επίστρωση και με μικρή διεισδυτικότητα στο υλικό υποβάθρου.

**Το πάχος των εναποτιθέμενων επιστρώσεων** με ένα πέρασμα κυμαίνεται στην επίστρωση από 0,05 - 3.5 mm, ενώ η συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου ανέρχεται σε 2 - 10%. Η απόδοση αναγόμωσης εξαρτάται από το μέγεθος του καυστήρα και την ικανότητα του χειριστή και μπορεί να ισούται από 0,5 - 5 kg/h.

Παρά τα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα της αναγόμωσης, που συνίστανται κυρίως στην ελάχιστη διείσδυση του υλικού του υπόβαθρου, στην υψηλή ποιότητα της

επίστρωσης, το χαμηλό κόστος των συσκευών και την οικονομικότητα της αναγόμεως, ιδιαίτερα των λεπτών στρωμάτων με μικρή επιφάνεια, υπάρχουν και τα ακόλουθα ελαττώματα:

- η αναγκαιότητα της αρχικής προθέρμανσης και, συχνά, η θερμική κατεργασία μετά την αναγόμευση,
- ο κίνδυνος ανάπτυξης σημαντικών τάσεων συγκολλησεως και οι μη ωφέλιμες δομικές μεταβολές στα αναγομωμένα εξαρτήματα,
- η αναγκαιότητα της πολύ επιμελούς προετοιμασίας των επιφανειών των αντικειμένων για αναγόμευση,
- η χαμηλή απόδοση της διαδικασίας.

---

## 2.2 ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αναγόμευση με ηλεκτρική ενέργεια (θερμότητα)[1] είναι διαδικασία στην οποία το πρόσθετο υλικό τήκεται στο ηλεκτρικό τόξο και εναποτίθεται στο τηκόμενο συγχρόνως υπόβαθρο, σχηματίζοντας με μεταλλουργική διεργασία τη μεταλλική επίστρωση.

Η θερμοκρασία του τόξου, ανάλογα με τη μορφή του και το βαθμό συγκέντρωσης, κυμαίνεται γύρω στους 5000 °C για το τόξο με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο και πάνω από 20000 °C για το πλασμικό τόξο. Η απόδοση τήξη φτάνει την τιμή των 200 kg/h (ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση - electroslag), ενώ το πάχος του εναποτιθέμενου υλικού με ένα πέρασμα κυμαίνεται από μερικά δέκατα του χιλιοστού μέχρι, και άνω των 100 mm.

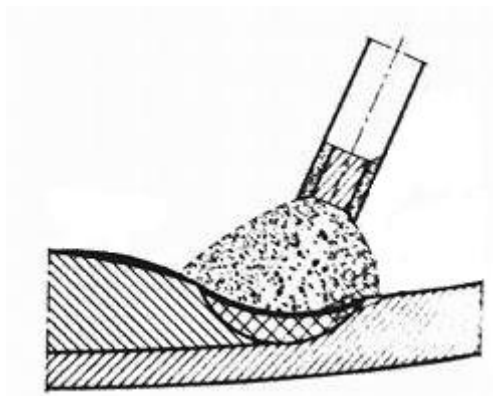
Πρόσθετο υλικό κατά την ηλεκτρική αναγόμευση, πρακτικά, μπορεί να είναι κάθε μέταλλο και κράμα με μορφή επενδεδυμένου ηλεκτροδίου με πυρήνα συμπαγή ή σκόνης με μορφή συμπαγούς σύρματος, σύρματος σκόνης, συμπαγούς ταινίας και ταινίας σκόνης. Η ηλεκτρική αναγόμευση εφαρμόζεται στις εργασίες επισκευών και αναγέννησης.

Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται συνήθως:

- a) αναγόμωση τόξου χειρωνακτικά με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (MMA - Manual Metal Arc),
- b) αναγόμωση τόξου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα αέριων - TIG (GTA – Gas Tungsten Arc),
- c) αναγόμωση τόξου με ηλεκτρόδιο τηκόμενο στην ατμόσφαιρα αέριων - MIG, MAG (GMA - Gas Metal Arc),
- d) αναγόμωση βυθιζόμενου τόξου (SA - Submerged ARC) - BT
- e) αναγόμωση ηλεκτροσκοριακή (electroslag),
- f) αναγόμωση με πλάσμα.

### 2.2.1 ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΤΟΞΟΥ ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΑ ΜΕ ΕΠΕΝΔΕΔΥΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ

Κατά την αναγόμωση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, η θερμότητα του ηλεκτρικού τόξου λιώνει το υλικό του ηλεκτροδίου όπως και το υλικό του υπόβαθρου, με αποτέλεσμα το σχηματισμό της μεταλλικής επίστρωσης με τις απαιτούμενες ιδιότητες (Σχ. 2.2).



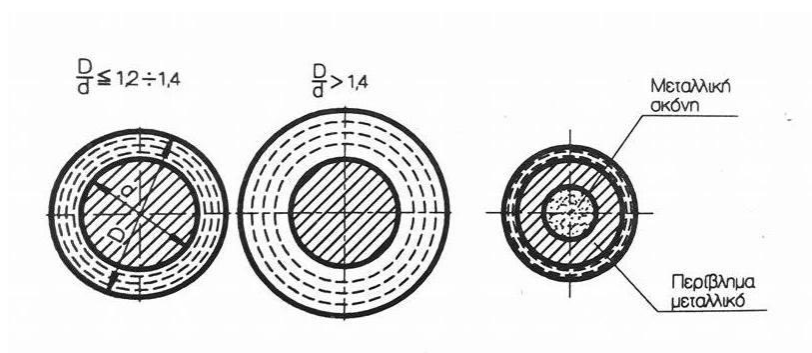
*Σχήμα 2.2. Αναγόμωση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο.*

Η υψηλή θερμοκρασία του τόξου που φτάνει τους 6000 °C τήκει το υπόβαθρο σε τέτοιο βαθμό, ώστε η συμμετοχή υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση να είναι σημαντική και να κυμαίνεται στα όρια από 10 - 40 %, ανάλογα με την τεχνική και τις παραμέτρους αναγόμωσης. Πρακτικά, μόνο στο τρίτο στρώμα επιτυγχάνεται η απαιτούμενη χημική σύσταση της επίστρωσης, που καθορίζεται από την ποιότητα του ηλεκτροδίου. Με ένα πέρασμα είναι δυνατή η εναπόθεση στρώματος με πάχος 1 - 5 mm. Η αναγόμωση



επιτυγχάνεται με εναλλασσόμενο ή συνεχές ρεύμα με πολικότητα θετική ή αρνητική, ενώ οι πηγές ρεύματος είναι απλές στο χειρισμό και οικονομικές. Οι μετασχηματιστές ή ανορθωτές συγκόλλησης, με φθίνουσα ή κατακόρυφη στατική χαρακτηριστική.[2]

Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια για την αναγόμωση αποτελούνται συνήθως με μέτρια ή παχιά επένδυση ρουτιλίου, βασική, ρουτιλίου - βασική, με πυρήνα συμπαγή ή σκόνης (Σχ.2.3). Τα ηλεκτρόδια με συμπαγή πυρήνα έχουν διάμετρο 2,5 - 6 mm, ενώ τα ηλεκτρόδια πυρήνας σκόνης 4 - 11 mm ( πίν. 2.1).



Σχήμα 2.3 Τύποι επενδεδυμένων ηλεκτροδίων

Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια με πυρήνα σκόνης επιτρέπουν τη ρύθμιση της χημικής σύστασης της εναποτιθέμενης επίστρωσης και, επιπροσθέτως, χάρη της αυξημένης ηλεκτρικής αντίστασης του πυρήνα, είναι δυνατή πάνω από 100% η αύξηση της αναγόμωσης μέχρι 4+5 kg/h και η σημαντική μείωση του χρόνου τήξης. Εκτεταμένη είναι επίσης, η επιτρεπόμενη περιοχή της έντασης του ρεύματος για δεδομένη διάμετρο του ηλεκτροδίου και μικρότερη η συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση. Τα ηλεκτρόδια επικαλύπτονται με λεπτό στρώμα ανθεκτικού συλλιπάσματος στην υγρασία, εξασφαλίζοντας τη σταθερότητα της έναυσης του τόξου. [2]

Οι βασικές παράμετροι αναγόμεως είναι:

- το είδος και η ένταση του ρεύματος αναγόμεως
- η τάση του τόξου
- η ταχύτητα αναγόμεως
- η διάμετρος του ηλεκτροδίου και ο τρόπος οδήγησης του ηλεκτροδίου.

Από το μέγεθος της έντασης του ρεύματος εξαρτάται ο ρυθμός τήξης του ηλεκτροδίου, η γραμμική ενέργεια του τόξου, η συμμετοχή του μητρικού υλικού στην επίστρωση και η δυνατότητα εναπόθεσης στρωμάτων σε εξαναγκασμένες θέσεις, όπως και ο δομικοί μετασχηματισμοί στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά (ΖΕΘ).

Η τάση του τόξου εξαρτάται από το μήκος και είναι καθοριστική για τη μεταφορά του μετάλλου στο τόξο, την ταχύτητα τήξης και την απόδοση της αναγόμεως. Με την αύξηση της τάσης του τόξου αυξάνεται η γραμμική ενέργεια του τόξου και, απ' αυτό, η συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου στην εναποτιθέμενη επίστρωση. Μειώνεται, όμως, η απόδοση και η ταχύτητα τήξης, εξαιτίας των αυξημένων πιεσιλισμάτων και του καψίματος των κραματικών στοιχείων στο επιμηκυνόμενο τόξο. Δυσχεραίνεται, επίσης, και η εναπόθεση επιστρώσεων σε θέσεις εξαναγκασμένες (δύσκολες).

Συμπέρασμα: με το μικρότερο μήκος του τόξου εξασφαλίζεται η βέλτιστη πορεία της διαδικασίας αναγόμεως.

**Πίνακας 2.1.** Συνήθη επενδεδυμένα ηλεκτρόδια αναγόμωσης, οι ιδιότητες και η χρήση τους.

Τύπος ηλεκτροδίου	Είδος ρεύματος	Σκληρότητα εναποτιθέμενης επίστρωσης	Διάμετρος ηλεκτροδίου mm	Ένταση Ρεύματος A	Χρησιμοποίηση
Ρουτιλίου 0,7% C 6,0% Mo G 2,0% Mo	Σ (+) E	650 HV	3,25 4.0 5.0	90 - 115 120 - 145 155 - 185 190 - 260	Σιαγόνες θραυστήρων, δόντια, λεπίδες εκσκαφέων, αντλίες χαλικοκονιάματος.
Ρουτιλίου 205% Cr2,0% Μη 85% Ni	Σ (+, -) E	220 HV μετά τη σφυρηλ. 500HV	3,25 4.0 5.0	70-110 120 - 145 140 - 180 180 - 210	Επισκευή φθαρθέντων εξαρτημάτων με χάλυβα 13%MIG διασταυρώσεις σιδηροδρομικών γραμμών, κρουστικές σφύρες, έλαστρα.
Βασικά 1,0% C 8,0% Cr9,6% Mo	Σ (+) E	800 HV	3,25 4.0 5.0	80- 110 100-130 140 - 170	Έλαστρα, μαχαιρία αναμικτήρων μαζών φορμαρίσματος, ακμές κοπτικών εργαλείων, υνία γεωργικών μηχανημάτων.
Σκόνης στη μεταλλική μήτρα · περιέχει 70% καρβιδίων βολφραμίου	Σ (-) E	η μήτρα 600HV τα καρβίδια βολφραμίου 2000 HV	3,5 5.0 6.0	80 - 110 100-130 : 140 - 170	Πτερύγια αναμικτήρων μαζών φορμαρίσματος, συνδετήρες σωλήνων γεώτρησης, ηνία, μεταφορικοί κοχλίες.
Σκόνης 3,0% C, 23% Cr, 2% Μη η ωστενιτική μήτρα περιέχει καρβίδια χρωμίου	Σ (+)	η μήτρα 560 HV τα καρβ. χρωμίου 1400 HV	6,3 11,0	60 - 110 70 -150 120 - 250 150 - 350	Άκρα κάδων εκσκαφέων, δόντια εκσκαφέων, σιαγόνες σπαστήρων, έλαστρα, ακμές κοπής γεωργικών εργαλείων, κορμοί αντλιών.
Ειδική επένδυση 75% Cu8% Al 13% Μη	Σ (+)	200 HB	2,5 3,25 4.0 5.0	50 - 75 60-100 80-130 110- 160 150 - 170	Επισκευή ολισθέντων εξαρτημάτων, υποδοχές βαλβίδων, έδρανα, άξονες, ναυπηγικοί κοχλίες, αναμικτήρες.

Συμβολισμοί: Σ (+, -) συνεχές ρεύμα, με πολικότητα θετική ή αρνητική, E - εναλλασσόμενο ρεύμα.

## Τεχνική αναγόμεωσης.

Η ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται η αναγόμεωση είναι σύνθετη παράμετρος και εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους του ρεύματος και την εφαρμοζόμενη από το χειριστή τεχνική οδήγησης του άκρου του ηλεκτροδίου κατά μήκος της επιφάνειας επίστρωσης.[2]

- Οι επιφάνειες νέων αντικειμένων δεν απαιτούν ιδιαίτερη προετοιμασία, εκτός από την αφαίρεση της σκουριάς, χρωμάτων κ.ά..
- Κατά την αναγέννηση των αντικειμένων που υπέστησαν βλάβη ή των εκ νέου αναγομένων αντικειμένων με στρώματα ενίσχυσης, πρέπει να αφαιρεθούν τα κατεστραμμένα στρώματα με τόννευση ή λείανση.
- Η αναγόμεωση πρέπει να διενεργείται σε θέση επίπεδη, ώστε να εξασφαλίζει την υψηλότερη ποιότητα και απόδοση.
- Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με κλίση του αντικειμένου κάτω των 30° και με αναγόμεωση σε όλο το πλάτος της επιφάνειας.
- Η τεχνική αναγόμεωσης πρέπει να εξασφαλίζει την ωφελιμότερη κατανομή των παραμορφώσεων. Ιδιαίτερα ουσιώδης είναι κατά την εναπόθεση επιστρώσεων με μικρή επιφάνεια και πάχος σε μεγάλα αντικείμενα.
- Συχνά επιβάλλεται η εφαρμογή αρχικής προθέρμανσης και θερμικής κατεργασίας μετά την αναγόμεωση, π.χ. κατά την αναγόμεωση ταχυχαλύβων (με περιεκτικότητα 18% W' αρχικά προθερμαίνεται στους 500 - 600 °C και μετά την αναγόμακτη στη θερμοκρασία βαφής των 1180 °C σε αλατούχο λουτρό των 600 °C και διπλής επαναφοράς στη θερμοκρασία των 500°C.
- Η αναγόμεωση των μαγγανιούχων εξαρτημάτων απαιτεί την ελάχιστη γραμμική ενέργεια του τόξου, την εναπόθεση μικρών ίσιων επιστρώσεων και την άμεση ψύξη με φύσημα αέρος ή την άμεση ψύξη στο νερό.
- Κατά τη συγκόλληση υλικών ευαίσθητων σε ρηγματώσεις στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά (ΖΕΘ), υποδεικνύεται η εκτέλεση μικρών κορδονίων, με πλάτος 1 - 2 φορές της διαμέτρου του ηλεκτροδίου και ελάχιστη ένταση ρεύματος. Επιστρώσεις πλατιές και υψηλή ένταση ρεύματος εφαρμόζονται κατά την αναγόμεωση μεγάλων επιφανειών αντικειμένων από μέταλλα με καλή ή μέτρια συγκολλητικότητα. Για την αύξηση της απόδοσης αναγόμεωσης χοντρών στρωμάτων από σκληρά υλικά, προτείνεται η εναπόθεση του πρώτου

στρώματος με ίσια διατεταγμένα κορδόνια, με ηλεκτρόδιο νικελίου ή ωστενιτικό, ενώ τα επόμενα στρώματα με πλάτος μέχρι 10 διαμέτρους του ηλεκτροδίου με μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος (Σχ. 2.3).

- Στην περίπτωση εναπόθεσης επιστρώσεων με υλικά πολύ μεγάλης σκληρότητας και χαμηλής δυσθραυστότητας, η επίστρωση δεν μπορεί να περιέχει περισσότερο από δύο στρώματα, ενώ τα πάχη των στρωμάτων της επίστρωσης κυμαίνονται στα όρια 2÷3 mm. Εάν απαιτείται μεγαλύτερο πάχος της επίστρωσης, τότε πρέπει το πρώτο στρώμα να εναποτεθεί με ηλεκτρόδια ωστενιτικά ή κράματος νικελίου.
- Κατά την αναγόμευση περιστροφικών επιφανειών αξόνων, στροφείων κ.ά. υποδεικνύεται η εναπόθεση των κορδονίων κατά μήκος του άξονα των αντικειμένων, με αντίστοιχη σειρά. Εάν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ιδιοσυσκευές - ιδιαίτερα για την αναγόμευση αντικειμένων μεγάλης διαμέτρου, τότε προβλέπεται με τροχιά σπείρας από την εξωτερική πλευρά προς το κέντρο. Η σειρά εναπόθεσης κορδονίων κατά την αναγόμευση τροχιών σιδηροδρόμων και λεπίδων εκσκαφών φαίνεται στο σχήμα 2.4.

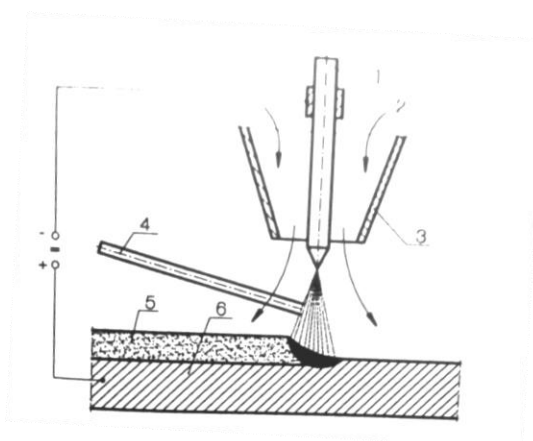
Η χειρωνακτική αναγόμευση τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, χάρη της μεγάλης πολλαπλότητας και ευκολίας, του χαμηλού κόστους εξοπλισμού, της μεγάλης προσφοράς πρόσθετων υλικών με, πρακτικά, ελεύθερη χημική σύσταση, συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Αναντικατάστατη είναι σε απλές επισκευές, στις εργασίες υπαίθρου καθώς και κατά την αναγόμευση επιφανειών των οποίων η πρόσβαση είναι δύσκολη. Είναι δυνατή η εναπόθεση επιστρώσεων με ανθρακοχάλυβες χαμηλού άνθρακα, ελαφρά κραματωμένους, ισχυρά κραματωμένους, ειδικούς, κραμάτων νικελίου, κραμάτων χαλκού, κραμάτων αλουμινίου και κραμάτων κοβαλτίου.



*Σχήμα 2.4. Βέλτιστη διαδοχή εναπόθεσης υλικού για την αναγόμευση κοπτικών άκρων εκσκαφών.*

## 2.2.2 ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΜΗ ΤΗΚΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΕΡΙΩΝ

Η αναγόμωση τόξου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο, ονομαζόμενη συνήθως αναγόμωση με τη μέθοδο TIG (GTA)[1], συνίσταται στην προσαγωγή πρόσθετου υλικού στην περιοχή του αναμμένου τόξου μεταξύ του ηλεκτροδίου βολφραμίου και του αντικειμένου προς αναγόμωση, στην ατμόσφαιρα αδρανών αερίων. Το πρόσθετο υλικό τήκεται και με τη σύντηξη της επιφάνειας του αντικειμένου σχηματίζεται η επίστρωση (Σχ. 2.5).



*Σχήμα 2.5. Αναγόμωση με την τεχνική TIG (GTA). 1) ηλεκτρόδιο βολφραμίου, 2) αέριο προστασίας, 3) ακροφύσιο αερίου, 4) σύρμα, 5) επίστρωση, 6) υπόβαθρο.*

**Το πρόσθετο υλικό** προσάγεται με μορφή σύρματος, ράβδου συμπαγούς ή σκόνης και είναι δυνατόν να προσάγεται χειρωνακτικά ή αυτόματα.

Η αναγόμωση διενεργείται με συνεχές ρεύμα αρνητικής πολικότητας ή με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται, όταν η αναγόμωση διενεργείται με συνεχές ρεύμα αρνητικής πολικότητας και χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο βολφραμίου με θόριο. Τότε εξασφαλίζεται μεγάλη σταθερότητα του τόξου, εύκολη ρύθμιση των παραμέτρων αναγόμωσης και μικρή συμμετοχή του μητρικού υλικού στην επίστρωση, της τάξεως των  $5 \div 10\%$ , με απόδοση  $1 \div 3$  kg/h. Λόγω της έξοχης προστασίας του τόξου με το αδρανές αέριο, το μέταλλο της επίστρωσης παρουσιάζει υψηλή ποιότητα, ενώ με ένα πέρασμα εναποτίθεται στρώμα από  $1,5 \div 5,0$  mm.

Οι βασικές παράμετροι αναγόμεσης με τη μέθοδο TIG (GTA) είναι:

- το είδος και η ένταση ρεύματος
- η τάση του τόξου
- η ταχύτητα (ρυθμός) αναγόμεσης
- το είδος και η ένταση ροής του αερίου προστασίας
- ή διάμετρος του ηλεκτροδίου βολφραμίου
- η διάμετρος του πρόσθετου υλικού.

Παραδειγματικές παράμετροι αναγόμεσης με στελλίτες με τη μέθοδο TIG δίνονται στον πίνακα 2.2.

*Πίνακας 2.2 Παράμετροι αναγόμεσης με τη μέθοδο TIG (GTA) και ηλεκτρόδιο stellite*

<b>Ράβδος στελλίτη</b>	<b>Ηλεκτρόδιο βολφραμίου,</b>	<b>Ένταση ρεύματος,</b>
<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>A</b>
3	1,6-2,4	60-75
4	2,4 - 3,2	80-90
4-5	4,8	100 - 120

*Προσοχή: Η αναγόμεση με συνεχές ρεύμα αρνητικής πολικότητας, το αργό με καθαρότητα min. 99,95% και ένταση ροής 10 ÷ 12 l/min.*

Οι άριστες παράμετροι αναγόμεσης επιλέγονται όπως και κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο TIG, συσχετίζοντας επί πλέον, τις απαιτήσεις που προκύπτουν από την ιδιομορφία της διαδικασίας και ιδιαίτερα:

- τις απαιτούμενες ιδιότητες λειτουργίας της επίστρωσης
- την πρόσβαση και το μέγεθος της περιοχής αναγόμεσης
- την επιτρεπόμενη συμμετοχή του μητρικού υλικού στην επίστρωση

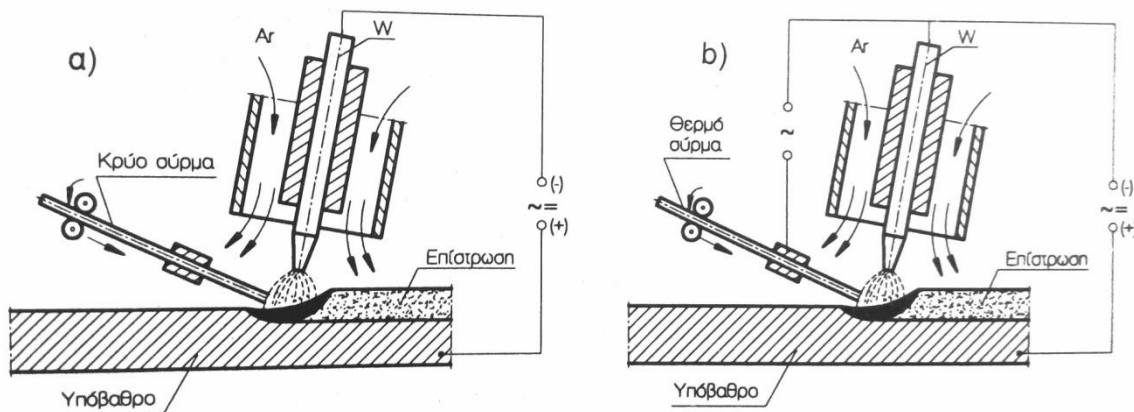
**Η χειρωνακτική μέθοδος αναγόμεσης TIG** εκτελείται με παρόμοια τεχνική όπως κατά την αναγόμεση με τη φλόγα οξυγόνου - ασετυλίνης. Με τη μέθοδο TIG επιτυγχάνεται λίγο μεγαλύτερη διείσδυση στο υλικό του υπόβαθρου, αλλά αποφεύγονται οι αρνητικές επιδράσεις της φλόγας οξυγόνου - ασετυλίνης για μερικά μέταλλα και κράματα. Επειδή είναι δυνατόν η αναγόμεση να γίνεται με μεγαλύτερες ταχύτητες, άρα προκύπτει μικρότερη θέρμανση των αντικειμένων και χάρη αυτού οι παραμορφώσεις και τάσεις συγκόλλησης είναι μικρότερες. Το σύρμα ή η ράβδος με

διάμετρο περίπου με  $1 \div 8$  mm και μήκος με  $0,5 \div 3$  m προσάγεται περιοδικά στην περιοχή του τόξου, ενώ ο καυστήρας προωθείται προς τα αριστερά ή δεξιά.

Η συχνότητα τροφοδότησης του σύρματος εξαρτάται από το απαιτούμενο, πάχος του στρώματος της κόλλησης, το οποίο κυμαίνεται στα όρια από  $1,5 \div 5$  mm. Η τεχνική προς τα αριστερά επιτρέπει μικρότερη διείσδυση στο υλικό του υπόβαθρου, απ' ό,τι η προς τα δεξιά. Η μέθοδος αυτή συχνά χρησιμοποιείται για την αναγόμωση των επιφανειών των σωλήνων γεώτρησης ή μικρών επιφανειών εργαλείων κοπής ορυκτών υλικών.

**Η αυτόματη αναγόμωση με τη μέθοδο TIG εκτελείται συνήθως με κρύο ή θερμό σύρμα (Σχ. 2.6).**

Η αυτόματη αναγόμωση με θερμό σύρμα χρησιμεύει στην ελάττωση της συμμετοχής του υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση και την αύξηση της απόδοσης της αναγόμωσης μέχρι  $5-8$  kg/h. Το θερμαινόμενο σύρμα με αντίσταση τήκεται με γρήγορο ρυθμό, σχηματίζοντας λουτρό συγκόλλησης με μεγάλο όγκο, «εξασθενίζοντας» τη σύντηξη του υλικού του υπόβαθρου.



*Σχήμα 2.6. Αυτόματη αναγόμωση με την τεχνική TIG (GTA): α) με κρύο σύρμα, β) με θερμό σύρμα.*

Με τη χρήση συρμάτων σκόνης μπορεί να επιτευχθεί αναγόμωση στρωμάτων με μεγάλη σκληρότητα, τα οποία δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τη χρήση συμπαγών συρμάτων.



Με τη μέθοδο TIG η αναγόμευση επιτυγχάνεται, βασικά, σε επίπεδη θέση ή με κλίση της επιφάνειας προς αναγόμευση με γωνία τουλάχιστον 30°.

Είναι δυνατόν να διενεργείται αναγόμευση αντικειμένων που εκτελούνται από χάλυβα, χυτοσίδηρο, χυτοχάλυβα, κράματα χαλκού και κράματα αλουμινίου.

Το πάχος των επιτευχθέντων στρωμάτων με ένα πέρασμα ισούται από 1,5 ÷ 5 mm, η συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση ισούται από 5 ÷ 10% ενώ η απόδοση της διαδικασίας από 1 ÷ 8 kg/h. Η διαδικασία διενεργείται χειρωνακτικά, ημιαυτόματα και αυτόματα.

---

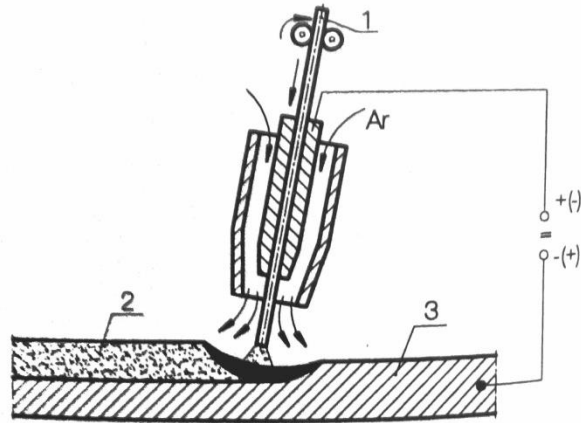
### **2.2.3 ΑΝΑΓΟΜΩΣΗ ΤΟΞΟΥ ΜΕ ΤΗΚΟΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΑΕΡΙΩΝ**

Η αναγόμευση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα αερίων, ονομαζόμενη αναγόμευση με τη μέθοδο MIG, MAG (GMA), συνίσταται στο ότι το αναμμένο τόξο μεταξύ του τηκόμενου ηλεκτροδίου και του αντικειμένου προς αναγόμευση - στην ατμόσφαιρα αδρανούς ή δραστικού αερίου - λιώνει το υλικό του ηλεκτροδίου και του υπόβαθρου, σχηματίζοντας την επίστρωση (Σχ. 2.7).

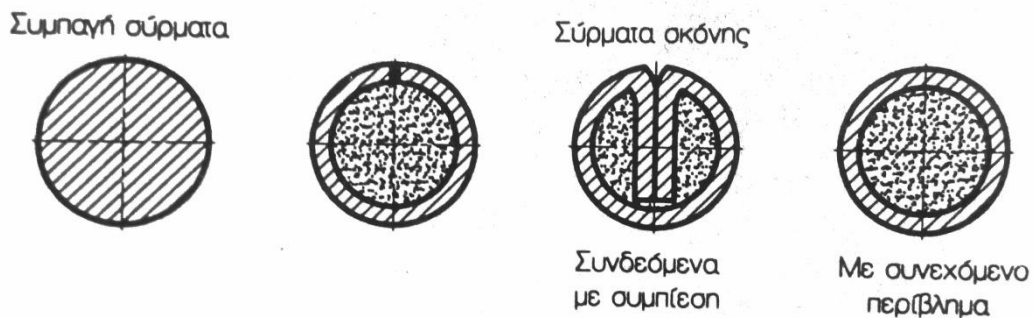
Η αναγόμευση διενεργείται ημιαυτόματα ή αυτόματα, με ταλάντωση ή χωρίς ταλάντωση της κεφαλής συγκόλλησης. Τα κραματικά στοιχεία, απαραίτητα για την επίτευξη της χημικής σύστασης της εναποτιθέμενης επίστρωσης, εμπεριέχονται στο υλικό του συμπαγούς ηλεκτροδίου ή σκόνης (Σχ. 2.8).

Για την αναγόμευση χρησιμοποιούνται σύρματα συμπαγή με διαμέτρους από 0,5-1,6 (2,4) mm, καθώς και σύρματα σκόνης με διάμετρο από 1,2 μέχρι 4,0 -5- 8,0 mm.

Τα αέρια προστασίας, που προστατεύουν το τόξο και το λουτρό συγκόλλησης από την εισροή των αερίων της ατμόσφαιρας, είναι: το αργό, το ήλιο και το CO<sub>2</sub>. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστά ή με διάφορες αναμίξεις ή με προσθήκη του οξυγόνου, του υδρογόνου ή του αζώτου, με σκοπό τη βελτίωση της σταθερότητας ανάμματος του τόξου ή για την αύξηση της γραμμικής ενέργειας αναγόμευσης. Το είδος της ατμόσφαιρας των αερίων ασκεί ουσιώδη επίδραση στη χημική σύσταση της επίστρωσης και στις ιδιότητές της καθώς και στο μηχανισμό μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο.



*Σχήμα 2.7. Αναγόμευση με την τεχνική GMA: 1 - τηκόμενο ηλεκτρόδιο, 2 - επίστρωση, 3 - υπόβαθρο αντικειμένου.*



*Σχήμα 2.8 Τυπικές διατομές ηλεκτροδίων, για αναγόμευση με την τεχνική GMA*

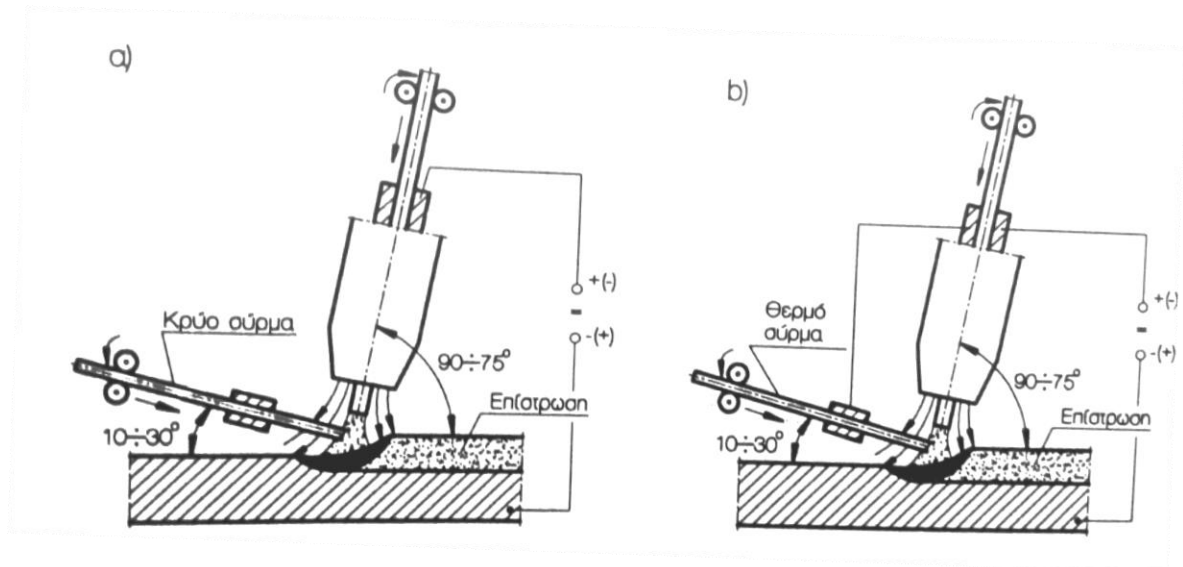
Η αναγόμευση με τη μέθοδο GMA βασικά διενεργείται με συνεχές ρεύμα με **πολικότητα θετική**, με ψεκαστικό τρόπο μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο. Για να μειωθεί η συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση και για να αυξηθεί η απόδοση της αναγόμευσης με κόστος της σταθερότητας του ανάμματος του τόξου και του διασκορπισμού, χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα με **αρνητική πολικότητα**. Εάν χρησιμοποιηθούν σύρματα σκόνης, τότε είναι δυνατόν η αναγόμευση να διενεργηθεί με εναλλασσόμενο ρεύμα. Η συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση με ψεκαστική μεταφορά του μετάλλου στο τόξο είναι υψηλή και ανέρχεται από 20 ÷ 40%, με απόδοση από 4 και άνω των 10 kg/h.

Η αναγόμευση με τόξο βραχυκύκλωσης και με σύρματα διαμέτρου  $03 \div 1,2$  mm εξασφαλίζει την ελάχιστη σύντηξη του υλικού του υπόβαθρου, ακόμη και κάτω του 5%. Παρέχει τη δυνατότητα αναγόμευσης σε θέσεις εξαναγκασμένες και δημιουργούνται μικρές παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις συγκόλλησης. Η απόδοση αναγόμευσης με τη μέθοδο GMA, όμως, είναι μόλις λίγο μεγαλύτερη από την απόδοση αναγόμευσης με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια και δεν ξεπερνά τα  $2 \div 33$  kg/h.

Ο μηχανισμός μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο εξαρτάται από τις παραμέτρους του ρεύματος αναγόμευσης, το είδος της ατμόσφαιρας αερίων προστασίας, τη χημική σύσταση και τη διάμετρο του ηλεκτροδίου καθώς και από το μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου. Εάν η αναγόμευση διενεργείται με σύρματα σκόνης, τότε είναι δυνατή μόνο η μεταφορά του μετάλλου με σταγόνες ή ψεκασμό. Πολύ σταθερό άναμμα του τόξου επιτυγχάνεται σε ατμόσφαιρα που περιέχει τουλάχιστον 80% Ar ή He, τότε το μέταλλο μεταφέρεται με ψιλές σταγόνες χωρίς διασκορπισμό. Στην ατμόσφαιρα του μετάλλου με ψεκασμό στο τόξο, η αποκοπή των σταγόνων από το άκρο του ηλεκτροδίου δυσχεραίνεται και εμφανίζεται σημαντικός διασκορπισμός του μετάλλου.

Η χρησιμοποίηση παλμικού ρεύματος επιτρέπει στη συνέχεια τη μείωση του κρίσιμου ρεύματος, σε σχέση με την αναγόμευση με σταθερό συνεχές ρεύμα θετικής κοιλότητας και χάρη αυτού μειώνεται η σύντηξη στο υπόβαθρο, καθώς δημιουργούνται και δυνατότητες αναγόμευσης σε θέσεις εξαναγκασμένες.

Για την αύξηση της απόδοσης της αυτόματης αναγόμευσης GMA, χρησιμοποιείται πρόσθετο σύρμα που προσάγεται στην περιοχή και προθερμαίνεται με αντίσταση, το λεγόμενο **θερμό σύρμα ή κρύο σύρμα** χωρίς προθέρμανση (Σχ. 2.9).



*Σχήμα 2.9. Αυτόματη αναγόμωση με την τεχνική MIG. α) με κρύο σύρμα, β) με θερμό σύρμα.*

Αυτό το σύστημα αναγόμωσης εξασφαλίζει απόδοση που ανέρχεται σε  $20 \div 30$  kg/h και χρησιμοποιείται κυρίως για την αναγόμωση μεγάλων επίπεδων επιφανειών.

Οι βασικές παράμετροι αναγόμωσης με τη μέθοδο GMA είναι:

- η ένταση του ρεύματος
- η τάση του τόξου
- η ταχύτητα αναγόμωσης
- το είδος και η ένταση ροής του προστατευτικού αερίου
- η διάμετρος του σύρματος ηλεκτροδίου
- η θέση του αντικειμένου αναγόμωσης.

Οι παράμετροι αναγόμωσης επιλέγονται όπως και οι παράμετροι συγκόλλησης με τη μέθοδο GMA. Επιπροσθέτως, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παράγοντες που προκύπτουν από την ιδιομορφία της διαδικασίας αναγόμωσης:

- οι απαιτούμενες ιδιότητες λειτουργίας της επίστρωσης
- η πρόσβαση και το μέγεθος της περιοχής αναγόμωσης
- η επιτρεπόμενη συμμετοχή του υλικού του υπόβαθρου στην επίστρωση.

Η αναγόμωση με τη μέθοδο GMA χρησιμεύει για την εναπόθεση επιστρώσεων σε επιφάνειες επίπεδες και περιστροφικές με πάχη από  $0,5 \div 6$  mm σε ένα πέρασμα. Κατά

την αναγόμωση με σύρματα σκόνης, ήδη στο πρώτο στρώμα μπορούν να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ιδιότητες λειτουργίας. Στις περισσότερες, όμως, περιπτώσεις απαιτείται η εναπόθεση τουλάχιστον δύο στρωμάτων. Το πάχος των εναποτιθέμενων στρωμάτων με σύρματα σκόνης μ' ένα πέρασμα κυμαίνεται στα όρια από 3 ÷ 6 mm. Κατά την αναγόμωση με σύρματα σκόνης υλικών ψαθυρών με μεγάλη σκληρότητα, προοριζομένων για εργασία σε συνθήκες σημαντικών φορτίσεων φθοράς, π.χ. επιστρώσεις με χυτοσίδηρο χρωμίου ή καρβιδίων βολφραμίου με βάση κραματομένων χαλύβων ή με βάση του σιδήρου, το πάχος δεν υπερβαίνει τα 6 mm και εκτελούνται με ένα ή δύο στρώματα. Η αναγόμωση με τη μέθοδο GMA επιτρέπει την εκτέλεση στρωμάτων με υψηλές ιδιότητες λειτουργίας από χάλυβες ελαφρά κραματομένους, ισχυρά κραματομένους, κραματομένους χυτοσίδηρους, ειδικά κράματα, κράματα νικελίου, τιτανίου, χαλκού και αλουμινίου. Τα σύρματα σκόνης εκτείνουν σημαντικά την περιοχή χρησιμοποίησης με τη μέθοδο GMA, επειδή η δυνατότητα ανέγερσης συμπαγών συρμάτων με σύνθετη χημική σύσταση περιορίζεται από τις απαιτήσεις της πλαστικής κατεργασίας.

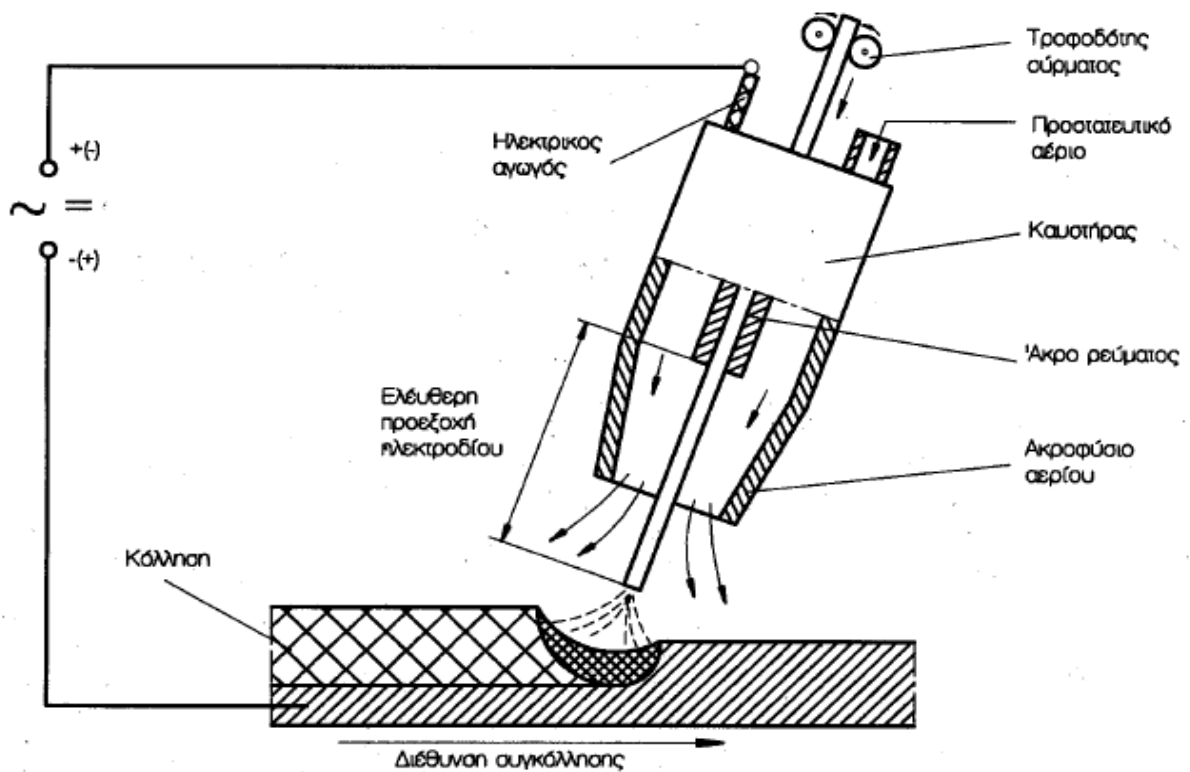
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΘΟΔΟΥ GMAW

Η τεχνική εφαρμογής τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων (ακρωνυμία GMA ή MIG/MAG) ξεκίνησε με την πατέντα του Alexander το 1926 και τώρα είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τις συγκολλητές κατασκευές. Η ακρωνυμία GMA (Gas Metal Arc) αναφέρεται ως υποχρεωτική κυρίως στις ΗΠΑ και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στις ευρωπαϊκές χώρες. Η ακρωνυμία αυτή περιέχει όλα τα είδη των προστατευτικών αερίων. Η ακρωνυμία MIG (Metal Inert Gas) αναφέρεται στις ευρωπαϊκές χώρες ως υποχρεωτική και αφορά μόνο στην προστατευτική ατμόσφαιρα των αδρανών αερίων. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται λιγότερο η ακρωνυμία MAG (Metal Active Gas), μόνο για τα δραστικά προστατευτικά αέρια. Μερικές φορές χρησιμοποιείται και η συνένωση των ακρωνυμιών MIG/MAG. [2]

Το αναμμένο τόξο, προστατευόμενο με ακρίβεια ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο (σύρμα) και στο υπόστρωμα, εξασφαλίζει ότι η σχηματιζόμενη επιφάνεια γίνεται σε πολύ ωφέλιμες θερμικές και μεταλλουργικές συνθήκες. Άρα, η εναπόθεση GMA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή υψηλής ποιότητας επιφανειών με τη χρησιμοποίηση τόξου. Σ' αυτά τα υλικά ανήκουν οι ανθρακοχάλυβες, οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες που είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, οι ειδικοί χάλυβες, το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, ο χαλκός, το νικέλιο και τα κράματα του, όπως, επίσης, το τιτάνιο και τα κράματα του.

Η τεχνική GMA συνίσταται στην τήξη του επεξεργαζόμενου μέταλλου και του υλικού του τηκόμενου ηλεκτροδίου με θερμότητα από το αναμμένο ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο και στο υπόστρωμα και στην ατμόσφαιρα του αερίου, αδρανούς ή δραστικού.



Σχήμα 3.1. Τεχνική GMAW.

Τα βασικά προστατευτικά αέρια που χρησιμοποιούνται για την εναπόθεση με GMA είναι τα αδρανή αέρια αργό και ήλιο καθώς και τα δραστικά :  $\text{CO}_2$  ,  $\text{H}_2$  ,  $\text{O}_2$  ,  $\text{N}_2$  και  $\text{NO}$ , χρησιμοποιούμενα ξεχωριστά ή μόνο ως προσθήκες στο αργό ή στο ήλιο. Το τηκόμενο ηλεκτρόδιο συνήθως με την μορφή συμπαγούς σύρματος , με διάμετρο από 0,5 – 4,0 mm , τροφοδοτείται , κατά συνεχή τρόπο, με ειδικό σύστημα τροφοδοσίας, με ταχύτητα περιοχή από 2,5 μέχρι και 50 m/min.

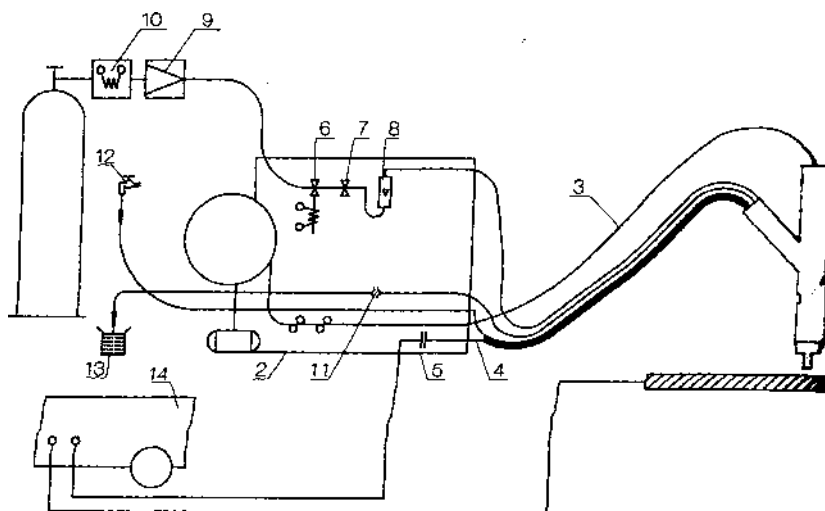
Ο καυστήρας GMA ψύχεται με νερό ή με αέρα. Η εναπόθεση διενεργείται με συνεχές ή με εναλλασσόμενο ρεύμα σε όλες τις θέσεις. Σχεδόν αποκλειστικά όμως χρησιμοποιείται στην τεχνική αυτή μόνο συνεχές ρεύμα με θετική πολικότητα.

Η εναπόθεση με GMA εκτελείται ως ημιαυτόματη μηχανοποιημένη, αυτόματη ή ως ρομποτική. Χάρη της μεγάλης πολλαπλότητας της διαδικασίας, της εύκολης ρύθμισης της μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, η τεχνική αυτή χρησιμεύει για την εκτέλεση διαφόρων κατασκευών και με διάφορα μέταλλα και κράματα, σε συνθήκες μηχανουργικές και συναρμολόγησης, σε όλες τις θέσεις.

Στη χειρολαβίδα εισέρχονται: το σύρμα που ξετυλίγεται από το τύμπανο, ο αγωγός νερού για την ψύξη, ο αγωγός του αδρανούς αερίου και ο ηλεκτρικός αγωγός.

Η ατμόσφαιρα των αδρανών αερίων επιτρέπει τη φόρτιση του ηλεκτροδίου με πολύ υψηλές εντάσεις, γι' αυτό χρησιμοποιείται εναποτιθέμενο υλικό, με σύρματα λεπτής διαμέτρου 0,8 - 1,2 - 1,6 - 2,0 - 2,4 mm, ενώ η ένταση του ρεύματος είναι σχετικά υψηλή, από 100 έως 400 A. Επειδή η τήξη του σύρματος γίνεται με μεγάλες ταχύτητες, η προώθηση του αποκτά πολύ υψηλές τιμές, από 100 μέχρι 700 m/h. Το σύρμα τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα, ανεξάρτητη από την τάση του τόξου.

Όταν ο χειριστής πατήσει τη σκανδάλη του πιστολιού, ανοίγει η ηλεκτρομαγνητική δικλείδα 6 για τη ροή του αδρανούς αερίου και τίθεται σε λειτουργία ο ηλεκτρικός προθερμαντήρας του αερίου 10. Συγχρόνως αρχίζει και λειτουργεί το κύκλωμα του νερού ψύξης 12 και 13 και απαραίτητο ρεύμα για το άναμμα του τόξου. Η απελευθέρωση της σκανδάλης από το χειριστή (μετά από 3 έως 5 s) προξενεί τη λειτουργία του μηχανισμού 2 τροφοδοσίας του σύρματος. Με αναλογικό τρόπο, με την απελευθέρωση της σκανδάλης του πιστολιού, ο χειριστής διακόπτει τη λειτουργία της συσκευής. Οι διάφοροι μηχανισμοί λειτουργούν με αντίθετη σειρά απ' ό,τι κατά την έναρξη της εναπόθεσης. Στο κύκλωμα του νερού ψύξης βρίσκεται ο διακόπτης 11, ο οποίος διακόπτει το ρεύμα, όταν η ροή του νερού δεν είναι ικανοποιητική.[2]



**Σχήμα 3.2.** Διάταξη συγκόλλησης τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο σε ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου GMA: 1 - λαβίδα, 2 - τροφοδότης, 3 - ηλεκτρόδιο, 4 - ηλεκτρικός αγωγός τροφοδοσίας ρεύματος συγκόλλησης, 5 - ζενκτήρας, 6 - ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, 7 - βαλβίδα ρύθμισης αερίου, 8 - μετρητής αερίου, 9 - μανομετροεκτονωτής, 10 - προθερμαντήρας αερίου, 11 - αποζενκτήρας ρεύματος σε περίπτωση έλλειψης νερού, 12, 13, - εισροή και εκροή του νερού, 14 - μηχανή.



### 3.1.1 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ MIG

Η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης πραγματοποιείται με τρεις μηχανισμούς, ανάλογα με την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος που επιβάλλεται στο ηλεκτρικό τόξο[2]. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

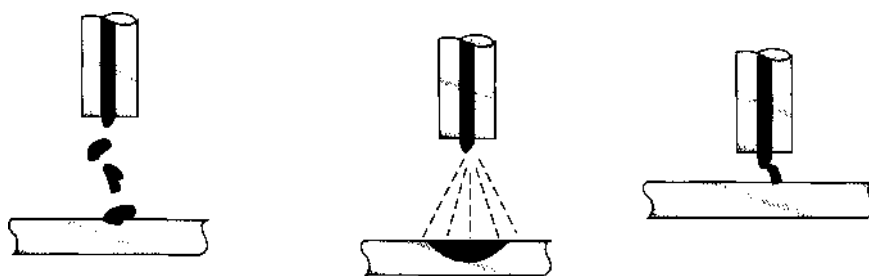
- Μεταφορά με σταγόνες
- Μεταφορά με ψεκασμό (σπρέι)
- Μεταφορά μέσω βραχυκυκλώματος σύρματος/βασικού μετάλλου

Για την πραγματοποίηση μιας συγκόλλησης MIG είναι αναγκαία η επίτευξη μιας ικανής πυκνότητας ρεύματος ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά μετάλλου από το σύρμα προς την λίμνη συγκόλλησης. Για μια δεδομένη ελάχιστη πυκνότητα ρεύματος, που εξαρτάται από την διάμετρο του σύρματος, η μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται με την μορφή σχετικά μεγάλων σταγόνων (Σχ.3.3α), που αποκολλώνται από την άκρη του σύρματος συγκόλλησης. Με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος σχηματίζεται ένα σπρέι, αποτελούμενο από μικροσκοπικά σταγονίδια μετάλλου (Σχ.3.3β). Το σπρέι αυτό έχει κωνική μορφή από το άκρο του σύρματος προς το μέταλλο βάσης και στην ουσία το υλικό συγκόλλησης ψεκάζεται προς την λίμνη συγκόλλησης.

Ο τρίτος μηχανισμός μεταφοράς μετάλλου δεν πραγματοποιείται με μεταφορά σταγονιδίων μέσω του τόξου αλλά με περιοδική επαφή του ηλεκτροδίου (σύρματος) με το προς συγκόλληση μέταλλο, με ρυθμό μεγαλύτερο από 100 επαφές/sec και ονομάζεται μεταφορά μετάλλου μέσω βραχυκυκλώματος (Σχ.3.3γ). Κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος, τηγμένα τμήματα του σύρματος αποσπώνται και ενσωματώνονται στην λίμνη συγκόλλησης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως με σύρματα μικρής διαμέτρου για συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο σχετικά μικρός ρυθμός εισαγωγής θερμότητας, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις παραμορφώσεις και τις μεταλλουργικές μεταβολές.

Η υψηλή παραγωγικότητα στις συγκολλήσεις MIG επιτυγχάνεται κυρίως όταν η μεταφορά μετάλλου πραγματοποιείται με σπρέι. Μεγάλο ρόλο στην μεταφορά μετάλλου με σπρέι παίζει η **πολικότητα** της συγκόλλησης. Η μεγάλη πλειοψηφία των συγκολλήσεων MIG για τα περισσότερα μέταλλα πραγματοποιείται με Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Θετικό (ΣΡΗΘ/DCEP). Στην περίπτωση αυτή (Σχ.3.3α), τα ηλεκτρόνια οδεύουν προς το ηλεκτρόδιο (σύρμα) προκαλώντας την θέρμανση και την τήξη του. Παράλληλα, μέσα στο τόξο, τα θετικά ιόντα του αερίου οδεύουν προς την συγκόλληση.

Κατά την κίνησή τους αυτή, τα ιόντα αερίου προκαλούν την επιτάχυνση των σταγόνων μετάλλου που οδεύουν προς την συγκόλληση, με αποτέλεσμα η συγκόλληση να πραγματοποιείται με μεγάλη διείσδυση. Παράλληλα, τα ιόντα αερίου προκαλούν και τον καθαρισμό της επιφάνειας του μετάλλου βάσης. Στην αντίθετη περίπτωση (Σχ.3. 3β), όταν η πολικότητα είναι Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Αρνητικό (ΣΡΗΑ/DCEN), τα ιόντα αερίου οδεύουν προς το ηλεκτρόδιο. Εκεί παρεμποδίζουν την ροή μετάλλου και τον σχηματισμό σπρέι, καθώς συγκρατούν τις σταγόνες στο άκρο του σύρματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγάλων σταγόνων, οι οποίες οδεύουν προς την συγκόλληση με μικρή ταχύτητα. Έτσι στην περίπτωση αυτή η διείσδυση είναι μικρή.



*Σχήμα 3.3. Μεταφορά μετάλλου κατά την συγκόλληση GMAW/MIG: (α) μεταφορά με σταγόνες, (β) μεταφορά με σπρέι, (γ) μεταφορά με βραχυκύκλωμα.*

---

### 3.1.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ GMAW

Οι βασικοί παράμετροι τεχνικής GMA είναι:

- ο τύπος και η ένταση ρεύματος
- η τάση του τόξου
- η ταχύτητα συγκόλλησης
- τα είδος και η ένταση ροής του προστατευτικού αερίου
- η διάμετρος σύρματος ηλεκτροδίου
- το ελεύθερο μήκος προεξοχής ηλεκτροδίου
- η ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος ηλεκτροδίου
- η κλίση της σύνδεσης ή του ηλεκτροδίου.

Ο έλεγχος των παραπάνω παραμέτρων είναι πολύ μεγάλης σημασία για την πραγματοποίηση αποδεκτής ποιότητας συγκολλήσεων. Καθώς οι παράμετροι αυτές

δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους, η αλλαγή μίας εξ' αυτών γενικά απαιτεί προσαρμογή και των υπολοίπων για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Είναι απαραίτητη η γνώση του θεωρητικού υπόβαθρου, όπως και η εμπειρία, για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερου αποτελέσματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η επιλογή των παραμέτρων εξαρτάται και από άλλες μεταβλητές όπως τον τύπο του μετάλλου βάσης, τη θέση της εναπόθεσης, τις ποιοτικές απαιτήσεις και τον αριθμό των απαιτούμενων περασμάτων, η εκλογή αυτή των παραμέτρων καθίσταται ακόμα πιο περίπλοκη. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι ιδιότητες της συγκόλλησης από την κάθε παράμετρο:

- **Ρεύμα συγκόλλησης:** Αλλάζοντας το ρυθμό τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου, αλλάζει και η τιμή του ρεύματος με αντίστοιχο τρόπο όταν πρόκειται για πηγή σταθερού ρεύματος. Αυτό συμβαίνει διότι το παρεχόμενο ρεύμα από την πηγή διαφοροποιείται σημαντικά με μικροαλλαγές στην τάση (μήκος τόξου) που προκαλούνται όταν αλλάζει ο ρυθμός τροφοδοσίας ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές, μια ενδεχόμενη αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε αύξηση του βάθους και του πλάτους της διείδυσης, του ρυθμού απόθεσης και του μεγέθους της ραφής.
- **Πολικότητα:** Στην πλειοψηφία της η τεχνική GMAW γίνεται με το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στο θετικό πόλο της πηγής (ανάστροφη πολικότητα), διότι προσφέρει σταθερότητα στο τόξο, μικρό πιτσίλισμα, καλό προφίλ ραφής και μεγαλύτερη διείδυση στην συνέχεια εξηγείται πιο λεπτομερώς ο ρόλος της πολικότητας ανάλογα και με το είδος του ρεύματος
- **Τάση τόξου:** Η τάση και το μήκος του τόξου είναι σχετικοί όροι και συχνά χρησιμοποιούνται κατ' εναλλαγή. Ωστόσο δεν είναι ταυτόσημοι. Η τάση του τόξου είναι ένα μέγεθος το οποίο αντικατοπτρίζει το φυσικό μήκος του τόξου με ηλεκτρικούς όρους. Από την άλλη, το φυσικό μήκος τόξου μπορεί να αποδώσει διαφορετικές τιμές τάσης, ανάλογα με το αέριο προστασίας, το ρεύμα και την έκταση του ηλεκτροδίου. Όταν όλες οι παράμετροι παραμένουν σταθερές, υπάρχει μια συστηματική σχέση που συνδέει την τάση με το μήκος του τόξου: Με αύξηση της τάσης αυξάνεται και το μήκος του τόξου. Παρ' όλο που αυτό που ενδιαφέρει είναι το μήκος του τόξου, η τιμή της τάσης μπορεί

πολύ πιο εύκολα να μετρηθεί και άρα ο όρος αυτός είναι πολύ πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος. Με αύξηση της τάσης του τόξου παρατηρούνται πιο επίπεδες ραφές και αύξηση του πλάτους της ζώνης τήξης.

- **Ταχύτητα:** Ορίζεται ως ο γραμμικός ρυθμός με τον οποίο το τόξο κινείται κατά μήκος της επιφάνειας. Όταν όλες οι άλλες παράμετροι διατηρούνται αμετάβλητες, η διείδυση της εναπόθεσης είναι μέγιστη σε μια μέση ταχύτητα. Όταν η ταχύτητα μειώνεται, ο ρυθμός απόθεσης μετάλλου συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους αυξάνεται. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες το τόξο επιδρά περισσότερο στο λουτρό της συγκόλλησης παρά στο μέταλλο βάσης και έτσι μειώνεται η αποτελεσματική διείδυση. Με αύξηση της ταχύτητας, η θερμότητα που μεταδίδεται στο μέταλλο βάσης από το τόξο αυξάνεται διότι το τόξο επιδρά περισσότερο σε αυτό. Όμως περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη θερμότητα στο μέταλλο βάσης. Οπότε, η τήξη του μετάλλου βάσης αρχικά αυξάνεται και μετά μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Σε μεγάλες ταχύτητες παρατηρείται τάση για δημιουργία υποκοπών κατά μήκος των άκρων των ραφών λόγω της ανεπαρκούς απόθεσης μετάλλου συγκόλλησης.
- **Προσανατολισμός ηλεκτροδίου:** Ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου περιγράφεται με τους εξής δύο τρόπους: Με τη σχέση του άξονα του ηλεκτροδίου με την κατεύθυνση της συγκόλλησης (travelangle) και από τη γωνία μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας στην οποία γίνεται η συγκόλληση (workangle). Όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει σε κατεύθυνση αντίθετη με αυτή της ταχύτητας, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οπισθέλκουσας γωνίας (trailangle). Αντίθετα, όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει προς την κατεύθυνση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πρόσω γωνίας (leadangle). Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται backhand welding technique και forehand welding technique, αντίστοιχα. Για όλες τις θέσεις, μια γωνία trailing μεταξύ 5-15° ως προς την κατακόρυφο αποδίδει συγκόλληση με μέγιστη διείδυση και στενή κυρτή επιφάνεια της ραφής και, επίσης, επιτυγχάνεται η βέλτιστη προστασία του λουτρού συγκόλλησης. Ωστόσο, είναι πιο σύνηθες να εφαρμόζεται γωνία leading που προσφέρει καλύτερη ορατότητα στο χειριστή και ραφή με λιγότερη κυρτότητα. Για κάποια υλικά, όπως το αλουμίνιο, προτιμάται η leading angle διότι έτσι επιτυγχάνεται «καθαριστική δράση»

μπροστά από το λουτρό του τηγμένου υλικού, κάτι που μειώνει την υγρασία και την οξείδωση του μετάλλου βάσης.

- **Έκταση του ηλεκτροδίου:** Είναι η απόσταση μεταξύ του τελευταίου σημείου του αγωγού επαφής του πιστολιού και του άκρου του ηλεκτροδίου. Αύξηση της απόστασης αυτής οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία προκαλεί επιπλέον θερμότητα στο ηλεκτρόδιο και συμβάλλει σε υψηλότερους ρυθμούς τήξης του. Με σταθερή την τάση του τόξου το επιπλέον μέταλλο θα αποτεθεί σαν μια στενή και έντονα κυρτή ραφή. Η βέλτιστη έκταση του ηλεκτροδίου κυμαίνεται γενικά μεταξύ 6,4-13 mmγια μεταφορά με περιοδικές βραχυκυκλώσεις του τόξου και μεταξύ 13-25 mmγια μεταφορά με σταγόνες ή ψεκασμό.
- **Διάμετρος του ηλεκτροδίου:** Η διάμετρος του ηλεκτροδίου επηρεάζει κι αυτή με τη σειρά της τη μορφή της ραφής. Ένα μεγαλύτερο ηλεκτρόδιο απαιτεί υψηλότερη κατώτατη τιμή ρεύματος από ό,τι ένα μικρότερο για να επιτύχει τα ίδια χαρακτηριστικά μεταφοράς μετάλλου. Υψηλότερα ρεύματα, με τη σειρά τους, προκαλούν επιπλέον τήξη του ηλεκτροδίου και περισσότερη απόθεση μετάλλου σε ρευστή μορφή. Ακόμη, υψηλές τιμές ρεύματος έχουν αποτέλεσμα μεγαλύτερους ρυθμούς απόθεσης και μεγαλύτερη διείδυση, αλλά μπορεί να μην επιτρέπουν τη χρήση κάποιων ηλεκτροδίων σε κατακόρυφη ή οροφιαία θέση.

**Η εναπόθεση GMA με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα** είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος χρησιμοποίησης στη διενέργεια της διαδικασίας GMA. Με μικρές εντάσεις ρεύματος, το ηλεκτρόδιο τήκεται, στην ατμόσφαιρα των αδρανών, προστατευτικών αερίων, με χοντρές σταγόνες, χωρίς διασκορπισμό, ενώ στην ατμόσφαιρα CO<sub>2</sub> με σημαντικό διασκορπισμό. Η αποκοπή των σταγόνων από το άκρο του ηλεκτροδίου δυσχεραίνεται και η μεταφορά τους από το τόξο γίνεται μη αξονικά. Με την αύξηση της έντασης του ρεύματος πάνω από ορισμένη κρίσιμη τιμή, στην ατμόσφαιρα με περιεκτικότητα το ελάχιστο 80%Arή He, ο χαρακτήρας μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο μεταβάλλεται από χοντρές σε λεπτές σταγόνες, με ψεκασμό.

Η κρίσιμη τιμή της έντασης ρεύματος εξαρτάται από το είδος του προστατευτικού αερίου, την τάση του τόξου, τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, το είδος του μετάλλου του ηλεκτροδίου και το ελεύθερο μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου.

Για μεγάλες πυκνότητες ρεύματος, το άκρο του ηλεκτροδίου αποκτά αιχμηρή μορφή και, τότε, αποκόπτονται απ' αυτό λεπτές σταγόνες μετάλλου, με όγκο και ταχύτητα μεταφοράς, διά του τόξου, η οποία εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος και το είδος της προστατευτικής ατμόσφαιρας.

**Η εναπόθεση GMA με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα,** στην ατμόσφαιρα αδρανών και δραστικών αερίων, διευκολύνει μόνο τη συγκόλληση με χοντρές σταγόνες και με μη αξονική μεταφορά του μετάλλου στο τόξο, ανεξάρτητα από το μέγεθος της έντασης ίου ρεύματος. Ο διασκορπισμός του μετάλλου είναι σημαντικός, ενώ η διεισδυτικότητα είναι σημαντικά μειωμένη απ' ό,τι με τη θετική πολικότητα, παρόλο που η απόδοση τήξης του ηλεκτροδίου είναι μέχρι και 100% υψηλότερη. Το τόξο δεν έχει σταθερό άναμμα αλλά κατά διακοπτόμενο τρόπο. Η καθοδική κηλίδα ταξιδεύει γύρω από το άκρο του ηλεκτροδίου και εξαλείφει το φαινόμενο της πλασματικής ροής του. Η προσθήκη μέχρι 5% O<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα του αργού, με κατάλληλα υψηλές πυκνότητες ρεύματος, μεταβάλλει το χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο έτσι, που πλησιάζει τη μορφή ψεκασμού.

**Η εναπόθεση GMA με εναλλασσόμενο ρεύμα** απαιτεί τη χρησιμοποίηση πηγών ρεύματος με υψηλή τάση εν κενό με σκοπό την εξασφάλιση της σταθερότητας του ανάμματος του τόξου και την μεταφορά του μετάλλου με χοντρές σταγόνες στο τόξο. Όταν το ηλεκτρόδιο έχει αρνητική πολικότητα, η μεταφορά του μετάλλου δυσχεραίνεται και εμφανίζεται διασκορπισμός, ενώ με τη θετική πολικότητα το τόξο έχει σταθερότητα. Με το επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο με αλκαλικά στοιχεία εξασφαλίζεται, όπως και κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα, η σταθερή μεταφορά του μετάλλου με ψεκασμό. Η εναπόθεση με εναλλασσόμενο ρεύμα δεν έχει μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία.

**Η εναπόθεση GMA με συνεχές παλμικό ρεύμα** διευκολύνει τη μείωση του κρίσιμου ρεύματος, σε σχέση με τη συγκόλληση με σταθερό συνεχές ρεύμα, με θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο. Στο βασικό ρεύμα με θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο προστίθενται παλμοί ρεύματος μικρής διάρκειας, με την επίδραση των οποίων αυξάνεται η ταχύτητα τήξης του άκρου του ηλεκτροδίου και της αποκοπής των σταγόνων του μετάλλου. Η τιμή της

έντασης του βασικού ρεύματος είναι υψηλότερη από την ένταση του κρίσιμου ρεύματος. Εξαιτίας αυτού, το ηλεκτρόδιο τήκεται με ψευκαστικό τρόπο και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Μεταβάλλοντας τις βασικές παλμικές παραμέτρους του ρεύματος μεταφοράς του μετάλλου, είναι δυνατόν το ρεύμα να ρυθμιστεί κατά τέτοιο τρόπο , που με κάθε παλμό του ρεύματος, από το άκρο του ηλεκτροδίου αποκόπτεται μια σταγόνα μετάλλου με καθορισμένες διαστάσεις .

---

### 3.1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

Τα **πλεονεκτήματα** της GMAW είναι:

- Έχει μεγάλη παραγωγικότητα, ενδεικτικά 4 φορές μεγαλύτερη από τη MMA.
- Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μήκος του ηλεκτροδίου όπως σε άλλες μεθόδους.
- Η τεχνική μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλες τις θέσεις με χρήση των κατάλληλων παραμέτρων.
- Μπορεί να γίνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με άλλες μεθόδους .
- Ο ρυθμός απόθεσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος από ό, τι στη SMAW.
- Η συνεχής τροφοδοσία ηλεκτροδίου επιτρέπει τη εναπόθεση μεγάλου μήκους χωρίς διακοπές.
- Η διείδυση είναι βαθύτερη σε σύγκριση με τη SMAW, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει τη χρήση μικρότερων ραφών.
- Δεν απαιτείται μεγάλη ικανότητα χειρισμών από το συγκολλητή διότι το μήκος του τόξου διατηρείται σταθερό σε σχετικά μεγαλύτερες αυξομειώσεις στην απόσταση ανάμεσα στο ακροφύσιο και το προς συγκόλληση μέταλλο.
- Απαιτείται ελάχιστος καθαρισμός μετά την οποιαδήποτε εφαρμογή της τεχνικής, λόγω της απουσίας βαριάς σκουριάς.

Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τη μέθοδο κατάλληλη για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής και σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές. Με την έλευση της ρομποτικής, η επιλογή της GMAW είναι όλο και συχνότερη.

### **Μειονεκτήματα:**

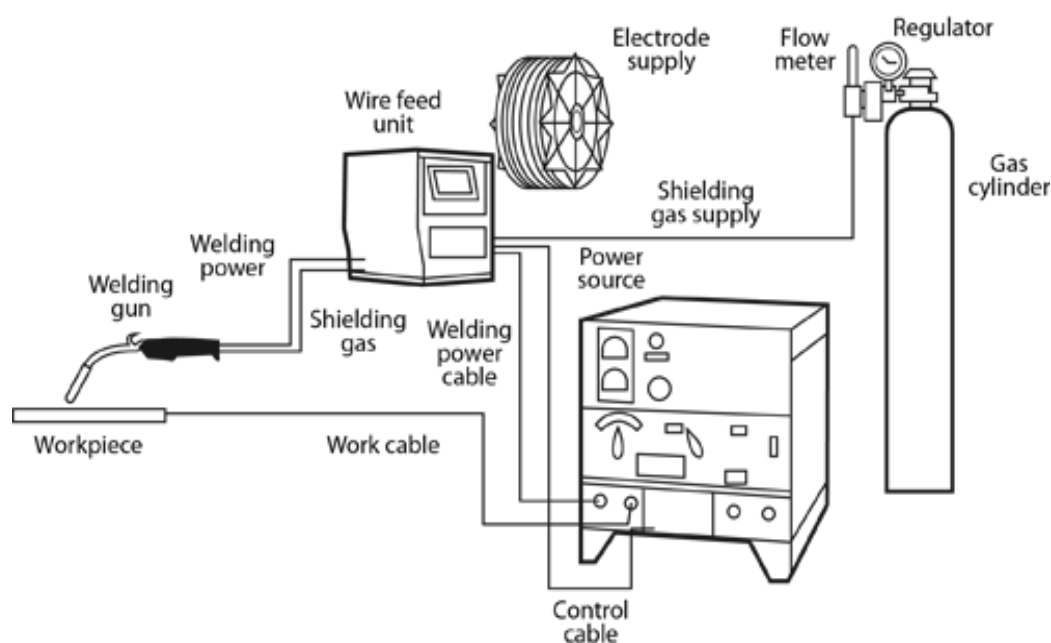
Όπως όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης έτσι και η GMAW υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς:

- Το κόστος ανά μέτρο εναπόθεσης είναι αρκετά μεγαλύτερο από τη MMA.
- Η χρήση της τεχνικής MIG/MAG μπορεί να γίνεται μόνο σε κλειστό χώρο, επειδή τα ρεύματα αέρα παρασύρουν το προστατευτικό αέριο.
- Ο εξοπλισμός της μεθόδου είναι πιο πολύπλοκος και συνήθως πιο ακριβός και, ακόμη, δεν είναι εύχρηστος ως προς τη φορητότητά του.
- Η μέθοδος είναι πιο δύσκολα εφαρμόσιμη σε δυσπρόσιτα σημεία λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους του πιστολιού συγκόλλησης σε σχέση με τη SMAW και πρέπει να διατηρείται σε κοντινή απόσταση από τη ραφή για να διασφαλιστεί η επαρκής προστασία αερίου.
- Το τόξο πρέπει να προστατεύεται από ρεύματα αέρα που παρασύρουν το αέριο προστασίας κάτι που περιορίζει την εφαρμογή της μεθόδου σε εξωτερικούς χώρους.
- Τα σχετικά υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας και η ένταση του τόξου μπορεί να δυσκολέψουν το χειριστή να κρίνει την ποιότητα της συγκόλλησης.



### 3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται αποτελείται από τον καυστήρα, τη μονάδα αποθήκευσης και τροφοδοσίας του σύρματος, την πηγή ρεύματος, τη φιάλη ή τις φιάλες προστατευτικού αερίου και το σύστημα παροχής, το σύστημα ελέγχου και τα απαραίτητα καλώδια και αγωγούς. Σε αρκετές περιπτώσεις με μία πηγή ρεύματος και μία μονάδα παροχής αερίου συνδέονται περισσότερες συσκευές τροφοδοσίας σύρματός και καυστήρες. Επίσης, σε κάποιες περιπτώσεις που αφορούν κυρίως μεγάλες εγκαταστάσεις μπορεί να υπάρχει και ψυκτικό κύκλωμα.



Σχήμα 3.4 Εξοπλισμός τεχνικής GMAW

**Πηγή ρεύματος:** Χρησιμοποιείται συνήθως ανορθωτής σταθερής τάσης ο οποίος τροφοδοτείται από τριφασικό δίκτυο. Αυτού του τύπου οι πηγές διατηρούν σταθερή τάση τόξου ανεξάρτητα από την ένταση του ρεύματος, διευκολύνοντας τη διατήρηση σταθερού του μήκους του τόξου. Για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει ο ρυθμός τροφοδοσίας του σύρματος να είναι ίσος με το ρυθμό κατανάλωσής του. Αν για παράδειγμα το μήκος του τόξου μειωθεί (είτε λόγω ακούσιου χειρισμού είτε λόγω μικρομεταβολών της ταχύτητας τροφοδοσίας) τότε η ένταση του ρεύματος αυξάνεται με μηδενική μείωση τάσης, ο ρυθμός κατανάλωσης του σύρματος αυξάνεται και το μήκος του τόξου μειώνεται και πάλι στην αρχική τιμή. Αντίστοιχα συμβαίνουν σε περίπτωση που το μήκος του τόξου μειωθεί.

Στην περίπτωση πηγής σταθερής έντασης τα παραπάνω δε συμβαίνουν. Αν μειωθεί το μήκος του τόξου η τάση μειώνεται και το ρεύμα παραμένει σταθερό. Αυτό σημαίνει πως ο ρυθμός κατανάλωσης γίνεται μικρότερος από το ρυθμό τροφοδοσίας και επομένως θα πρέπει να ρυθμιστεί η ταχύτητα της μονάδας τροφοδοσίας. Απαιτούνται, δηλαδή, πιο πολύπλοκα συστήματα ελέγχου της μονάδας τροφοδοσίας τα οποία θα μεταφέρουν τις διάφορες μεταβολές της τάσης.

Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει πρόσβαση σε δίκτυο χρησιμοποιούνται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.

Λόγω των μεγάλων χρονικών διαστημάτων λειτουργίας των πηγών αυτές σχεδιάζονται ούτως ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα από την παρατεταμένη λειτουργία. Χαρακτηριστικό μέγεθος των πηγών είναι ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle). Ο κύκλος λειτουργίας μιας πηγής ρεύματος δείχνει το χρόνο σε λεπτά στον οποίο μπορεί να λειτουργήσει παρέχοντας συγκεκριμένη ένταση ρεύματος με ασφάλεια, αναφορικά με μια χρονική περίοδο 10 λεπτών. Αν για παράδειγμα μια πηγή ρεύματος αναφέρεται ότι μπορεί να λειτουργήσει παρέχοντας ένταση 150 A με κύκλο λειτουργίας 60%, αυτό σημαίνει ότι η πηγή αυτή μπορεί να λειτουργεί συνεχώς για 6 λεπτά και για τα υπόλοιπα 4 να μείνει εκτός λειτουργίας. Είναι φανερό ότι η ίδια μηχανή έχει διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας για διαφορετικές εντάσεις ρεύματος.

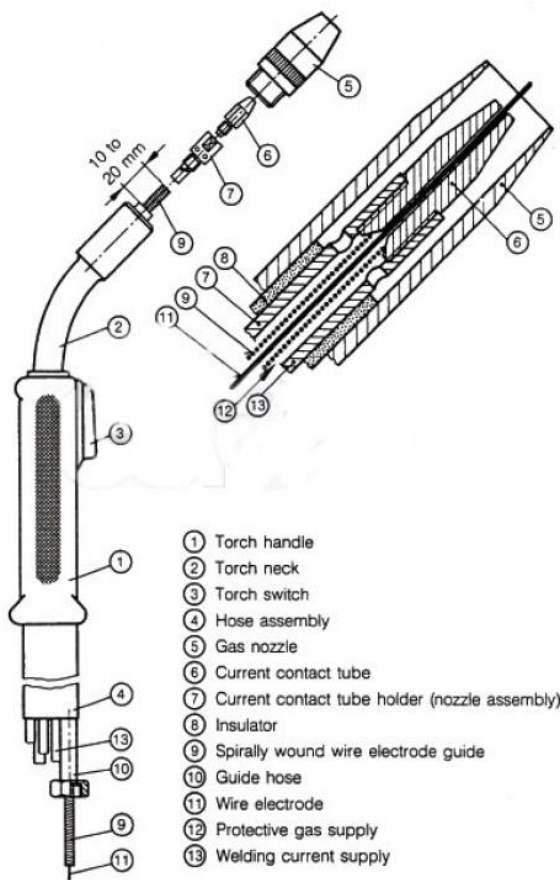
**Μονάδα τροφοδοσίας σύρματος:** Ο μηχανισμός τροφοδοσίας σύρματος αποτελείται από έναν τροχό αποθήκευσης και τροχούς κύλισης που κινούνται από κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Οι τροχοί κύλισης διαμορφώνονται με αυλακώσεις ούτως ώστε να μην επιτρέπουν την ολίσθηση του σύρματος και ωθούν ή έλκουν το σύρμα με ταχύτητες από 2,5 έως 15 m/min.

Στον πιο διαδεδομένο τύπο οι τροχοί κύλισης βρίσκονται στη μηχανή τροφοδοσίας και ωθούν το σύρμα στον καυστήρα (push type). Ο τύπος αυτός είναι κατάλληλος για σύρματα από χάλυβα διαμέτρων 0,8 , 1,0 , 1,2 , 1,6 και 2,4 mm και από αλουμίνιο ή χαλκό διαμέτρων 1,2 , 1,6 και 2,4 mm. Μειονέκτημα του τύπου είναι η σχετικά περιορισμένη απόσταση μεταξύ της θέσης εργασίας και της μηχανής και αδυναμία λειτουργίας με σύρματα μικρής διαμέτρου.

Χρησιμοποιείται, επίσης, ο τύπος στον οποίο οι τροχοί κύλισης και ο κινητήρας βρίσκονται στη λαβή του καυστήρα και έλκουν το σύρμα από τον τροχό τροφοδοσίας

(pulltype). Αυτή η διάταξη επιτρέπει εφαρμογή της τεχνικής σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τη μηχανή και τη χρήση σύρματος μικρότερης διαμέτρου. Μειονέκτημα του είναι το αυξημένο βάρος του καυστήρα και η αδυναμία λειτουργίας με σύρματα μεγαλύτερης διαμέτρου.

Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνδυασμός των παραπάνω τύπων (push- pull type), ο οποίος είναι κατάλληλος για όλες τις περιπτώσεις αλλά με μεγαλύτερο αρχικό κόστος.



**Καυστήρας (πιστόλι):** Στον καυστήρα καταλήγουν το κύκλωμα ελέγχου της μονάδας, οι παροχές σύρματος και αερίου και ο ακροδέκτης της πηγής ρεύματος. Από τον καυστήρα ελέγχεται η έναρξη και το τέλος της εναπόθεσης και γίνεται η επαφή του σύρματος με την πηγή.

*Σχήμα 3.5. Πιστόλι συγκόλλησης GMAW.*

**Αέρια προστασίας :** Το αργό, το ήλιο και τα μίγματά τους χρησιμοποιούνται ως αέρια προστασίας για τα μη σιδηρούχα μέταλλα, καθώς επίσης και για τους ανοξειδωτους και κραματωμένους χάλυβες. Η ενέργεια σε ένα τόξο του αργού διαδίδεται λιγότερο ομοιόμορφα σε σχέση με το τόξο του ηλίου, λόγω της χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας του Ar. Όμως, το τόξο πλάσματος του Ar διαθέτει έναν πυρήνα υψηλής ενέργειας με έναν εξωτερικό μανδύα μικρότερης θερμικής ενέργειας.

Αυτή η μορφή του πλάσματος, βοηθά στη σταθερή μεταφορά σταγόνων μετάλλου κατά τον άξονα του τόξου. Η εγκάρσια διατομή μιας εναπόθεσης με τόξο Ar, έχει μια

στενότερη παραβολική μορφή σε σχέση με την αντίστοιχη του He. Στα σιδηρούχα μέταλλα, το He ως αέριο προστασίας μπορεί να παράγει εκτινάξεις (spatter), ενώ το Ar μπορεί να προκαλέσει αβαθή διείσδυση.

Η προσθήκη του O<sub>2</sub> (περίπου 3%) ή του CO<sub>2</sub> (περίπου 9%) στο Ar περιορίζει τα προβλήματα. Οι ανθρακούχοι και οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ενώνονται συνήθως με το CO<sub>2</sub> ως αέριο προστασίας, με αποτέλεσμα την υψηλότερη ταχύτητα εναπόθεσης, τη μεγαλύτερη διείσδυση και το χαμηλότερο κόστος. Όμως, το CO<sub>2</sub> προκαλεί αρκετές εκτινάξεις, γι' αυτό και χρησιμοποιείται μια σχετικά χαμηλή τάση ώστε να διατηρήσει ένα μικρού μήκους τόξο, στο οποίο η άκρη του ηλεκτροδίου είναι σχεδόν κάτω από την επιφάνεια των κομματιών προς κατεργασία.

**Πίνακας 3.1.** Εφαρμογές προστατευτικών αερίων με διάφορα μέταλλα.

<b>Προστατευτικό αέριο</b>	<b>Χημική συμπεριφορά</b>	<b>Μέταλλο - Υπόστρωμα</b>
Ar	αδρανές	Όλα τα μέταλλα εκτός των ανθρακοχαλύβων
He	αδρανές	Al, Cu και κράματά του, κράματα Mg
Ar+ 20-80% He	αδρανές	Al, Cu και κράματά του, κράματα Mg
N <sub>2</sub>	αναγωγικό	Cu
Ar + 20-25% N <sub>2</sub>	αναγωγικό	Cu καλύτερη έναυση τόξου από ότι με καθαρό N <sub>2</sub>
Ar + 1-2% O <sub>2</sub>	ελαφρά οξειδωτικό	Ανοξείδωτοι και κραματωμένοι χάλυβες
Ar + 3-5% O <sub>2</sub>	οξειδωτικό	Ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες
CO <sub>2</sub>	οξειδωτικό	Ανθρακοχάλυβες
Ar + 20-50% CO <sub>2</sub>	οξειδωτικό	Ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες
Ar + 10% CO <sub>2</sub> + 5% O <sub>2</sub>	οξειδωτικό	Ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες
CO <sub>2</sub> + 20% O <sub>2</sub>	οξειδωτικό	Ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες
90% He + 7.5% Ar + 2.5% CO <sub>2</sub>	ελαφρά οξειδωτικό	Ανοξείδωτοι χάλυβες, μεταφορά με βραχυκύκλωση
60% He + 35% Ar + 5% CO <sub>2</sub>	οξειδωτικό	Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, μεταφορά με βραχυκύκλωση

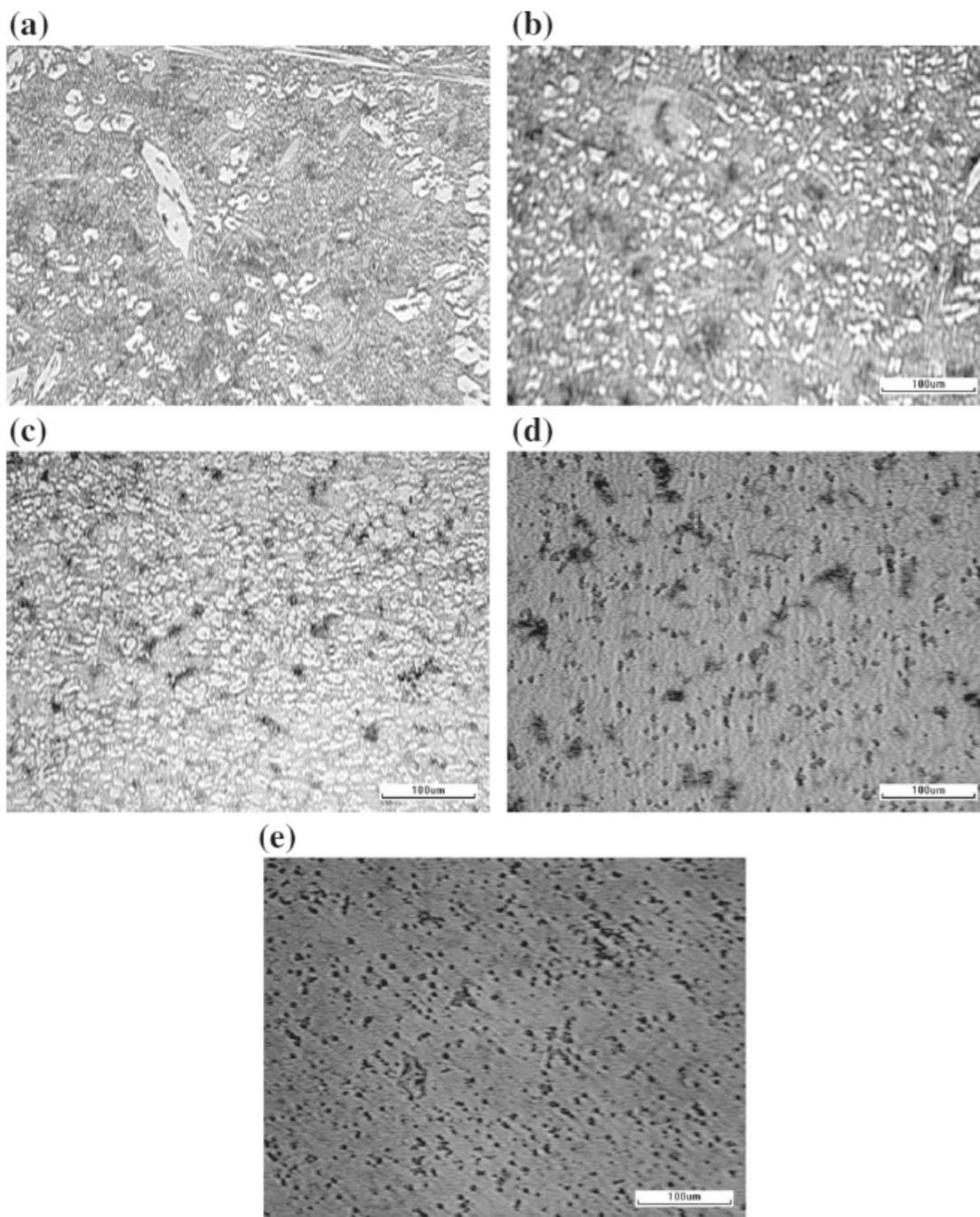
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

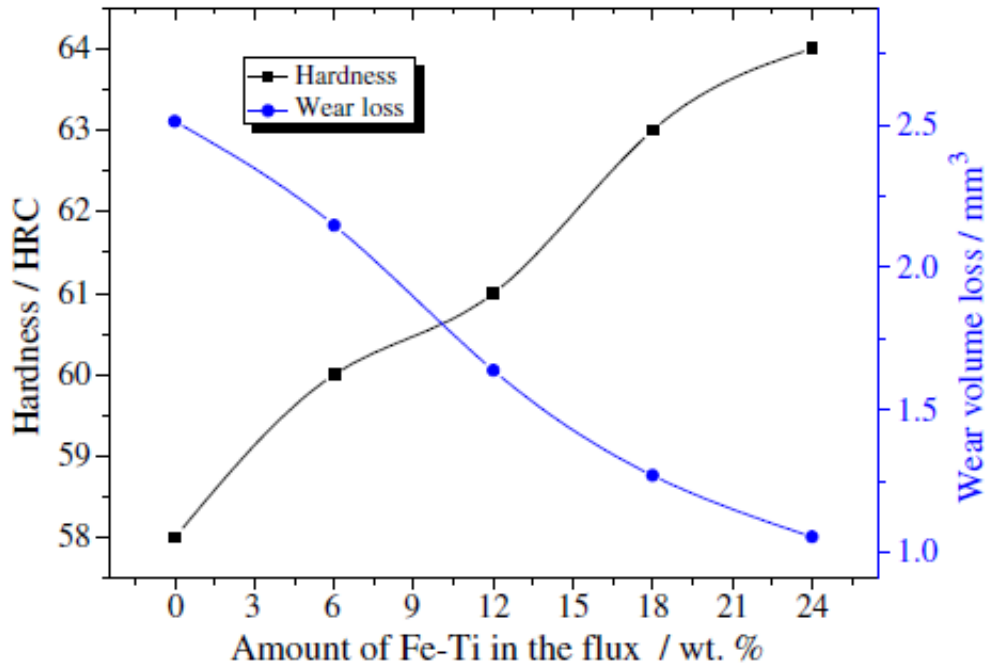
#### 4.1 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ (FCAW)

Ο Dashuang Liu, Renpei Liu και ο Yanhong Wei [3] μελέτησαν τα αποτελέσματα φθοράς εναποθέσεων καρβιδίου του τιτανίου TiC με παραγεμιστό ηλεκτρόδιο και μέθοδο MIG/MAG. Στην έρευνα τους χρησιμοποιούν ένα νέο είδος slag – free (χωρίς σκωρία) και αυτοθωρακισμένου παραγεμιστού ηλεκτρόδιου με βάση τον σίδηρο στο οποίο αναμίχθηκαν διαφορετικά ποσοστά τιτανίου ( 0 w/t % , 6 w/t % , 12w/t % , 18 w/t % , 24 w/t % ) το οποίο το δημιούργησαν για επιγομώσεις. Το τιτάνιο αναμιγνύεται και μεταφέρεται στην εναπόθεση με σκόνη μαγγανίου-αλουμινίου και γραφίτη ως ισχυροί αποξειδωτές. Η μελέτη της σύνθεσης φάσης και της μικροδομής των προετοιμασμένων κραμάτων έγινε από ακτίνες X και σάρωση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η φθορά μελετήθηκε χρησιμοποιώντας τριβόμετρο HT-500 με την τεχνική pin-on-disk.[3]

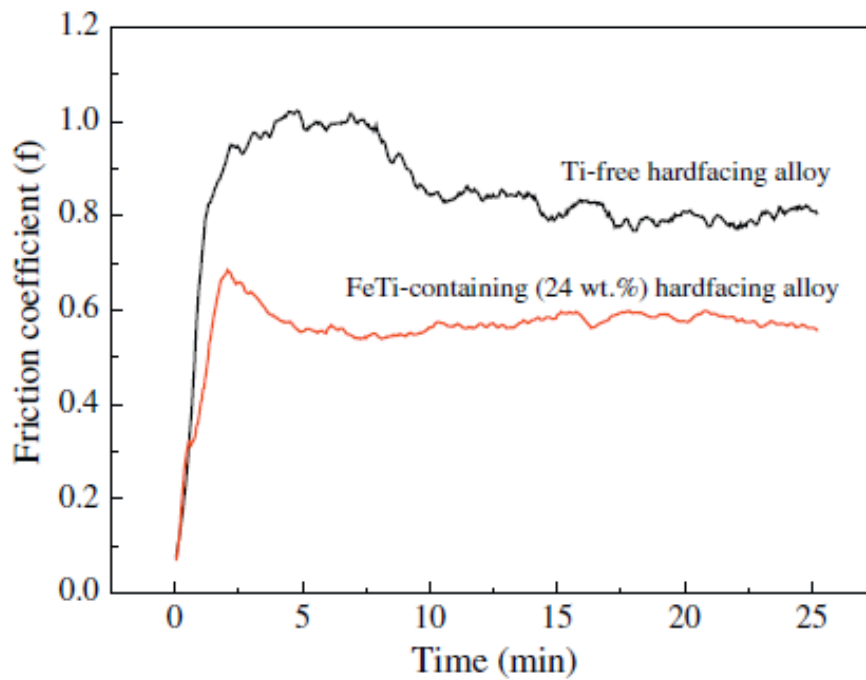
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το καρβίδιο του τιτανίου σχηματιστήκαν κατά προτίμηση στο κράμα. Συγκεκριμένα το καρβίδιο αυτό ενέργησε σαν τον πυρήνα του πρωταρχικού  $M_7CB_3$  καρβιδίου και ότι μειώθηκε το ποσοστό του  $M_7CB_3$  όταν το τιτάνιο αναμίχτηκε στο ηλεκτρόδιο. Όταν προστέθηκε 24 % Fe-Ti παρατηρήθηκε ότι η μικροδομή του κράματος άλλαξε από υπερευκτική σε υποευκτική λόγω του σχηματισμού TiC που καταναλώνει άνθρακα. Τελικώς, συμπέραναν ότι η προσθήκη τιτανίου βελτιώνει την αντίσταση σε φθορά του κράματος.[3,4]



*Σχήμα 4.1. Μικροδομή κραμάτων μετά από επιγύμωση, (α) 0% κ.β. Fe-Ti (β) 6% κ.β. Fe-Ti (γ) 12% κ.β. Fe-Ti (δ) 18% κ.β. Fe-Ti (ε) 24 κ.β..% Fe-Ti.*



Σχήμα 4.2. Σκληρότητα και φθορά συναρτήσει του ποσοστού τιτανίου.



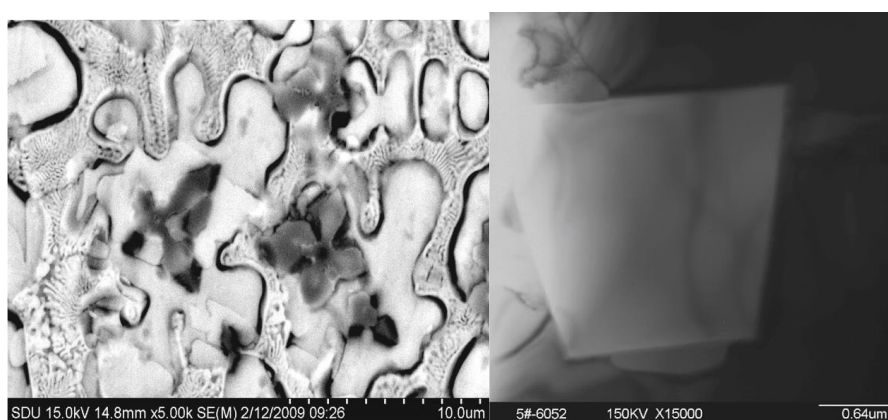
Σχήμα 4.3. Συντελεστής τριβής συναρτήσει του χρόνου.



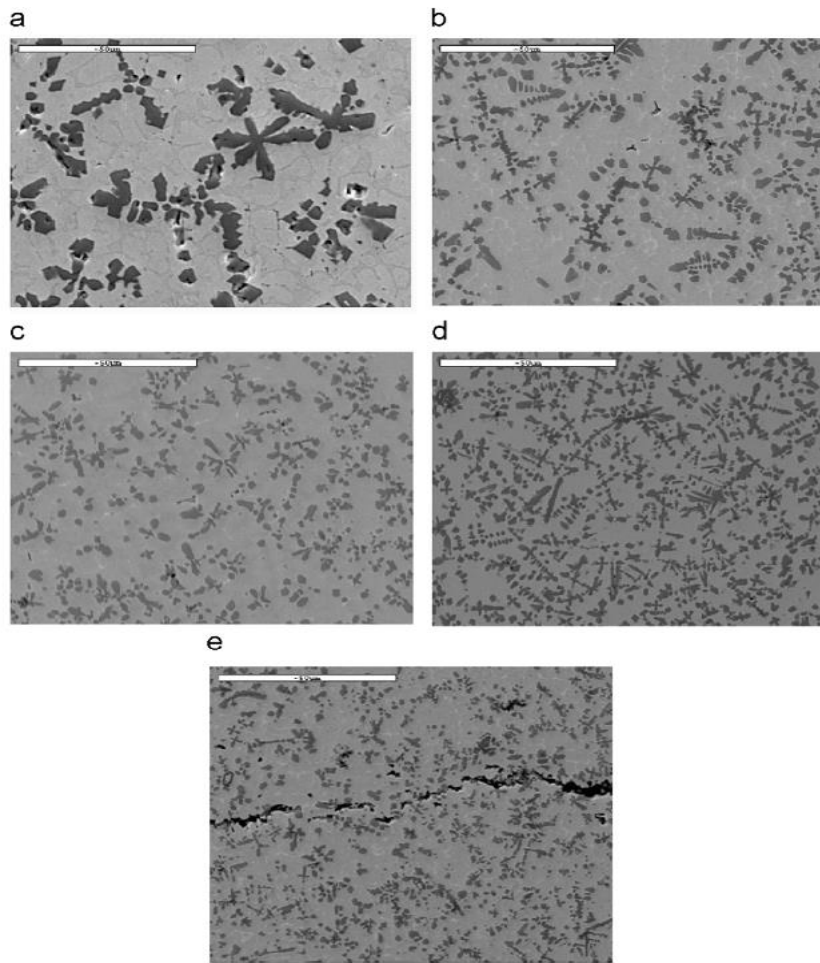
## 4.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ LASER (LASER CLADDING)

Ο XinhongWang, ο MinZhang και ο ShiyaoQu μελέτησαν την εφαρμογή πολλαπλών καρβιδίων τα οποία ενισχύουν ένα υπόστρωμα με βάση το σίδηρο. Σε αυτή την έρευνα η επιφάνεια αυτή ενισχύθηκε επί τόπου με πολλαπλά καρβίδια και κατασκευάστηκαν επιφάνειες με σύνθετες επιστρώσεις χρησιμοποιώντας την τεχνική επένδυσης με laser με ένα μείγμα σκόνης γραφίτη, φεροτιτανίου (Fe-Ti) και φερομολύβδου(Fe-Mo). Αρχικά, χρησιμοποίησαν 25%-35% κ.β. τιτάνιο και η δημιουργία του καρβιδίου του τιτανίου αποδείχθηκε ότι δεν είχε επαρκή αντίσταση σε φθορά. Για το λόγο αυτό, πρόσθεσαν και μόλυβδο έτσι ώστε να δημιουργηθεί το καρβίδιο του μολύβδου (MoC)[5,6].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα καρβίδια του τιτανίου και του μολύβδου πήραν κυβοειδή σχήματα αλλά και άλλα που έχουν σχήμα λουλουδιού. Τα καρβίδια αυτά σχηματίστηκαν επί τόπου κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης και τα περισσότερα σχήματα των καρβιδίων αυτών ήταν ποικιλόμορφα σε σχέση πάντα με τα διαφορετικά περιεχόμενα της σκόνης του Fe-Mo μέσα στο σύστημα του Fe-Ti-Mo-C. Η ανάπτυξη της μορφολογίας του ενισχυμένου καρβιδίου (Ti,Mo)C έχει τυπικά παράπλευρα χαρακτηριστικά υποδεικνύοντας ότι ο μηχανισμός ανάπτυξης αυτός είναι ακόμα ο κυρίαρχος τρόπος ανάπτυξης κάτω από γρήγορες συνθήκες στερεοποίησης. Αυξάνοντας το ποσοστό του Fe-Mo στα αντιδραστήρια οδήγησε στη μείωση του μεγέθους των καρβιδίων και αύξησε τον όγκο τριβής του καρβιδίου. Οι επικαλύψεις αυτές είχαν καλή αντίσταση σε ρωγμές όταν όμως το ποσοστό του Fe-Mo ήταν σταθερό στο 15% κατά βάρος.



*Σχήμα 4.4. α)Μορφολογία επικάλυψης με 5 κ.β.% Fe-Mo, β) καρβίδιο (Ti,Mo)C.*

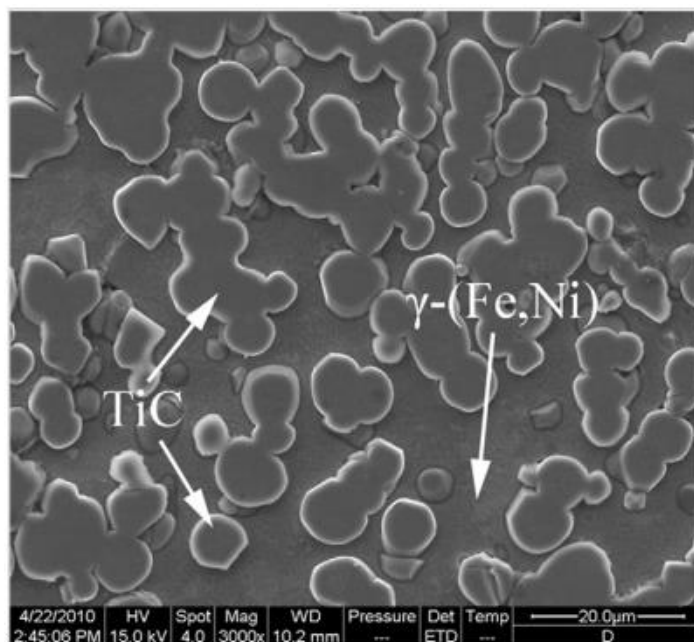


**Σχήμα 4.5.** Επίδραση Mo στα καρβίδια της επικάλυψης (a) χωρίς Mo, (b) με 5 κ.β.% Fe-Mo, (c) με 10 κ.β.% Fe-Mo, (d) με 15 κ.β.% Fe-Mo, (e) ρογή στην επικάλυψη με 17 κ.β.% Fe-Mo.

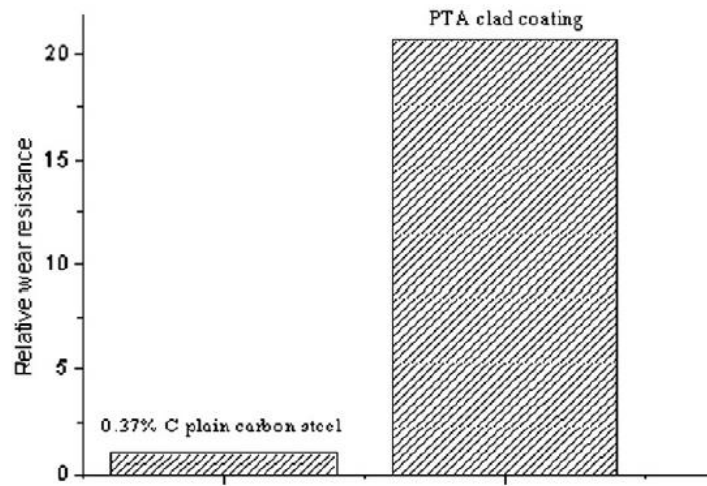
### 4.3 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ (PLASMA)

Ο Dequiang Chen, Dong Liu, Yuanfu Liu, Huaming Wang και ο Zheng Huang, μελέτησαν την επίδραση του καρβιδίου του τιτανίου[7,8] και του νικελίου σαν επίστρωση με την τεχνική του τόξου πλάσματος. Συγκεκριμένα, μία σύνθετη επικάλυψη καρβιδίου τιτανίου αλλά και στερεής φάσης σιδήρου νικελίου ( $\gamma$ -Fe,Ni)[7,8] επενδύθηκε επί τόπου σε υπόστρωμα κοινού ανθρακούχου χάλυβα χρησιμοποιώντας όπως προαναφέρθηκε την μέθοδο πλάσματος. Μείγμα σκόνης νικελίου, τιτανίου και γραφίτη, χρησιμοποιήθηκαν ως πρωταρχικά υλικά επίστρωσης. Η μικροδομή της επικάλυψης μελετήθηκε από περίθλαση ακτίνων X(XRD)[9,10], από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και από φασματομέτρο διασποράς ενέργειας (EDS). Η μικροσκληρότητα κατά μήκος του βάθους της επικάλυψης μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την μέθοδο Vickers. Η αντίσταση σε φθορά της επικάλυψης δοκιμάστηκε σε θερμοκρασία δωματίου.

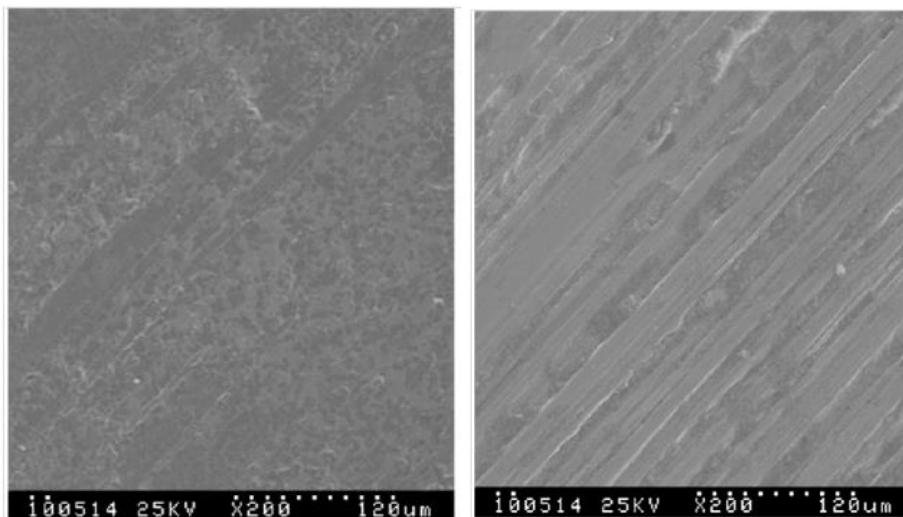
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενίσχυση με καρβίδια του τιτανίου μας δίνει κατά τη σύνθεση της επικάλυψης σφαιροειδή, σκωλικοειδή και συσσωματωμένα καρβίδια του τιτανίου, αλλά και υψηλή και σχεδόν ομοιόμορφη σκληρότητα κατά μήκος του βάθους της επικάλυψης. Σε συνθήκες φθοράς και σε συνθήκες περιβάλλοντος η σύνθεση της επικάλυψης αυτής έδειξε εξαιρετική αντίσταση σε λείανση και κόλληση.



Σχήμα 4.6. Μικρογραφία SEM τυπικής μικροδομής επένδυσης με την τεχνική πλάσματος.



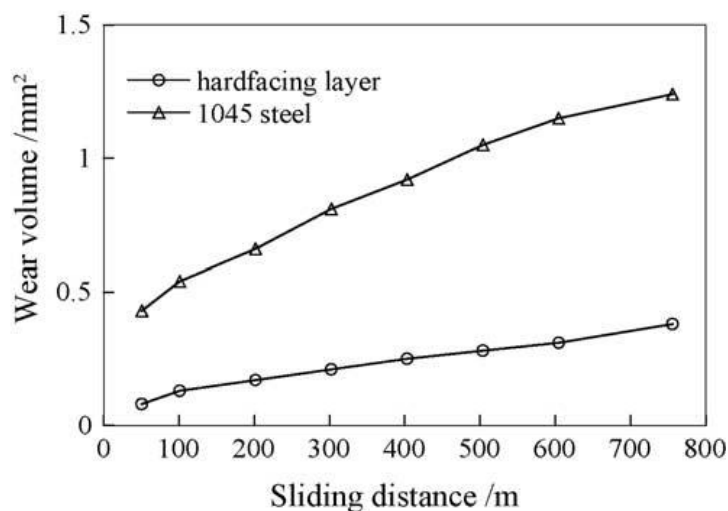
*Σχήμα 4.7. Σχετική αντίσταση σε φθορά της επικάλυψης σε σχέση με τον κοινό ανθρακούχο χάλυβα.*



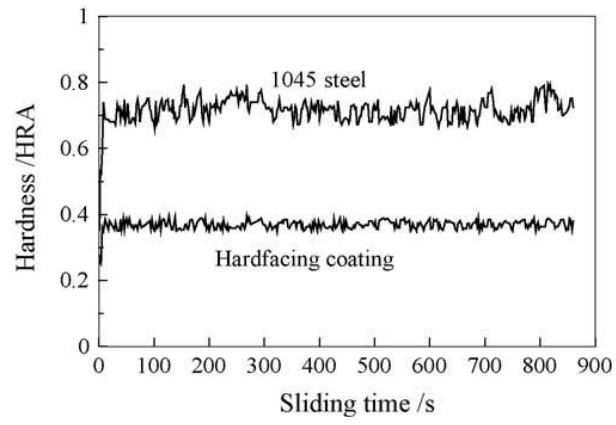
*Σχήμα 4.8. Μικρογραφία SEM α) ενισχυμένης επιφάνειας  $\gamma$ -(Fe,Ni)/TiC , β) αρχική επιφάνεια πριν την επεξεργασία.*

#### 4.4 ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΕΠΕΝΔΥΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ (SMAW)

Σε αυτήν την έρευνα του X.H. Wang, του Z.D. Zou, του S.Y. Qu και του S.L. Song μελέτησαν και αυτοί με τη σειρά τους την ενίσχυση με καρβίδια τιτανίου(TiC)[11] ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα με την τεχνική επενδεδυμένου ηλεκτροδίου (SMAW). Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποίησαν ήταν το H08A του οποίου η επένδυση περιείχε φεροτιτάνιο, ρουτίλιο, ανθρακικό ασβέστιο, γραφίτη και φθοριούχο ασβέστιο. Η μικροδομή και οι ιδιότητες της φθοράς της ενισχυμένης επικάλυψης μελετήθηκαν από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης(SEM), από μικροσκόπιο μετάδοσης ηλεκτρονίων(TEM), από περίθλαση ακτίνων X και από ένα τεστ φθοράς. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα καρβίδια του τιτανίου παράγονται από άμεση μεταλλουργική αντίδραση μεταξύ φεροτιτανίου και γραφίτη κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης. Τα καρβίδια αυτά διανέμονται ομοιόμορφα στο πλέγμα του μαρτενσίτη και του απομένουστος οστενίτη με μέγεθος 3-5  $\mu\text{m}$ . Τέλος, η επικάλυψη χάλυβα με τα καρβίδια τιτανίου βρέθηκε ότι έχει πολύ καλύτερη αντίσταση σε φθορά και χαμηλό συντελεστή τριβής από τον απλό κατασκευαστικό χάλυβα AISI 1045.



Σχήμα 4.9. Όγκος φθοράς συναρτήσει μήκους ολίσθησης



*Σχήμα 4.10. Σκληρότητα συναρτήσει του χρόνου ολίσθησης.*

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

##### 5.1 ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ

Το μέταλλο βάσης που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας κοινός κατασκευαστικός χάλυβας στον οποίο επιδιώκεται η αντιτριβική ενίσχυση, με τεχνική συγκόλλησης FCAW με χρήση παραγεμιστού ηλεκτροδίου με περιεχόμενο κυρίως το καρβίδιο τιτανίου (TiC). Η χημική σύσταση και η μικροδομή παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Η ονομασία του χάλυβα είναι S235 και κατά το πρότυπο EN10025 δίνονται:[18]

##### Χημική σύσταση

*Πίνακας 5.1. Χημική σύσταση μετάλλου βάσης.*

Grade	C%	Mn%	P%	S%	Si%
S235	0,22 max	1,60 max	0,05 max	0,05 max	0,05 max

##### Μηχανικές ιδιότητες

Όριο διαρροής: Το όριο διαρροής δηλώνει την ελάχιστη δύναμη που απαιτείται για να δημιουργηθεί μια μόνιμη παραμόρφωση στο υλικό. Για το χάλυβα S235 σύμφωνα με το πρότυπο EN10025:

*Πίνακας 5.2. Μηχανικές ιδιότητες μετάλλου βάσης.*

Χάλυβας	Ελάχιστο όριο διαρροής για ονομαστικό πάχος 16 mm		Αντοχή σε εφελκυσμό για ονομαστικό πάχος από 3mm – 16mm
	Ksi	N/mm <sup>2</sup> (MPa)	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
S235	33.000	235	360-510

Όριο αντοχής σε εφελκυσμό: Το όριο αντοχής σε εφελκυσμό ενός κατασκευαστικού χάλυβα δηλώνει το σημείο στο οποίο εμφανίζεται μόνιμη παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού.

## 5.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

### Μηχανή MIG/MAG

Η εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι η μηχανή Blumig 503SH της εταιρείας Cemont και αποτελεί μία επαγγελματική γεννήτρια για συγκολλήσεις MIG/MAG, με τριφασική τροφοδοσία, αναγκαστικό εξαερισμό, εξοπλισμένη για την εγκατάσταση ξεχωριστού συστήματος έλξης σύρματος.

*Πίνακας 5.3. Χαρακτηριστικά μηχανής συγκόλλησης.*

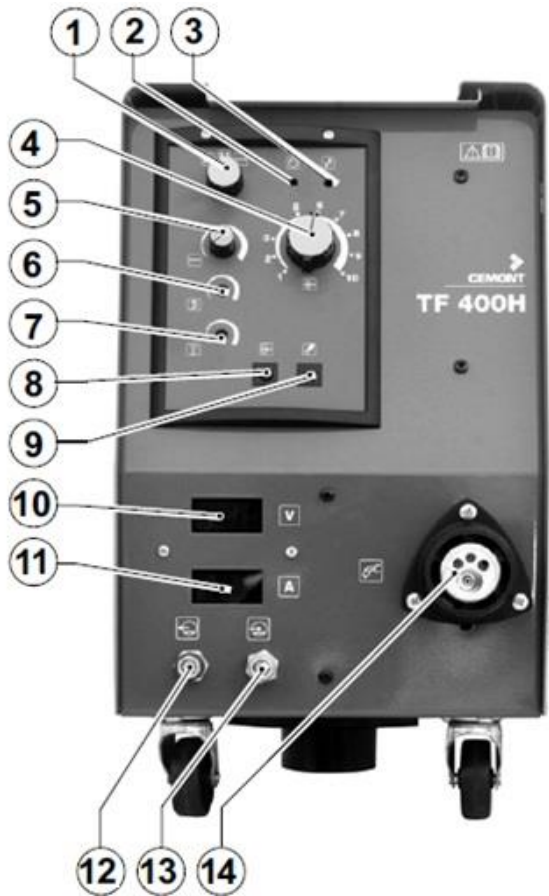
BLUMIG 503SH		
Συμβατό τροφοδοτικό ηλεκτρόδιο	TF 400H	
Τριφασική τάση	230 V	400 V
Συχνότητα	50Hz	
Ισχύς	24kW	20 kW
Μέγιστη κατανάλωση	60 A	34 A
Πραγματική κατανάλωση	35 A	20 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	15 V	54 V
Ρεύμα συγκόλλησης	50 A	500 A
Διάμετρος ηλεκτροδίου	0,8 mm	1,6 mm
Κύκλος εργασίας 35%	450 A	36 V
Κύκλος εργασίας 60%	345 A	31 V
Κύκλος εργασίας 100%	270 A	27 V
Δείκτες προστασίας	IP 23	
Διαστάσεις	600 × 1250 × 1050 mm	
Βάρος	140 kg	



**Σχήμα 5.1. Μηχανή Blumig 503SH, Cemont για συγκολλήσεις MIG/MAG 1) Ασφάλεια για το σύστημα έλξης, 2) Μεταλλάκτης ρύθμισης της τάσης συγκόλλησης, 3) Πρίζα καλωδίου γείωσης, 4) Διακόπτης τροφοδοσίας και μεταλλάκτης ρύθμισης.**



Το τροφοδοτικό TF 400H της εταιρείας Cemont, χρησιμοποιείται για την προώθηση του ηλεκτροδίου, για την μηχανή Blumig 503 SH.



**Σχήμα 5.2. Τροφοδοτικό ηλεκτροδίου TF 400H, Cemont:** 1) Επιλογέας συστήματος συγκόλλησης, 2) Ενδεικτική λυχνία λειτουργίας (ON) της μηχανής, 3) Ενδεικτική λυχνία υπερθέρμανσης της μηχανής ή βλάβης στο σύστημα ψύξης PCB4) Ποτενσιόμετρο ρύθμισης της ταχύτητας τροφοδότησης του σύρματος, 5) Ποτενσιόμετρο ρύθμισης χρόνου συγκόλλησης σημείου, 6) Ποτενσιόμετρο ρύθμισης του χρόνου επιτάχυνσης του κινητήρα τροφοδότησης σύρματος, 7) Ποτενσιόμετρο τήξης σύρματος, 8) Κουμπί πρόωσης σύρματος, 9) Κουμπί ελέγχου εξόδου αερίου, 10) Βολτόμετρο, 11) Αμπερόμετρο, 12) Βύσμα διανομής νερού ψύξης, 13) Βύσμα επιστροφής νερού ψύξης, 14) Ευρωπαϊκός κονέκτορας τσιμπίδας.

## Ηλεκτρόδιο

Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας CastolinEutectic με κωδική ονομασία TeroMatec OA 4923. Το ηλεκτρόδιο αυτό περιέχει υπέρσκληρα καρβίδια τιτανίου σε μία σκληρή μαρτενσιτική δομή, παρέχοντας εξαιρετική αντίσταση φθοράς σε τριβή, κρούση, αλλά και πίεση. Αυτό το παραγεμιστό ηλεκτρόδιο είναι ειδικά κατασκευασμένο για συντήρηση και επιβελτίωση χοντρών και βαριών εξαρτημάτων όπου μια γρηγορότερη εναπόθεση είναι επιθυμητή. Επιπλέον το OA 4923 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για χειροκίνητες και για αυτόματες μηχανές.

Η διαδικασία που ακολουθείται πριν από την εναπόθεση του ηλεκτροδίου είναι:

- Καθαρισμός της επιφάνειας από πιθανά οξείδια, ακαθαρσίες ή άλλα υλικά.
- Δημιουργία μιας πρόχειρης επικάλυψης ανάλογα τον τύπο του υλικού του υποστρώματος, όπου είναι αναγκαία.
- Προθερμαίνουμε την επιφάνεια του δοκιμίου την οποία θα επεξεργαστούμε.
- Προτεινόμενη τεχνική εναπόθεσης, η τεχνική “push”(forehand) για πιο λεία και ομαλή εναπόθεση.
- Για τις περισσότερες εφαρμογές, εκτός από τις επιφανειακές τριβές, φινίρισμα δεν απαιτείται.

Τεχνικά χαρακτηριστικά και προτεινόμενες ρυθμίσεις

- Αναμενόμενη σκληρότητα: 1/2/3 Πάσα: HRC 45/HRC 50 HRC 55
- Τυπική σκληρότητα καρβιδίου: Knoop 2500
- Είδος παροχής ενέργεια: Σταθερή τάση και προωθούμενο ηλεκτρόδιο
- Ρεύμα και πολικότητα: ΣΡΗΘ (Συνεχές Ρεύμα Ηλεκτρόδιο Θετικό)/DCEP (ElectrodePositive)

Προτεινόμενες ρυθμίσεις

*Πίνακας 5.4. Προτεινόμενες ρυθμίσεις κατασκευαστή ηλεκτροδίου.*

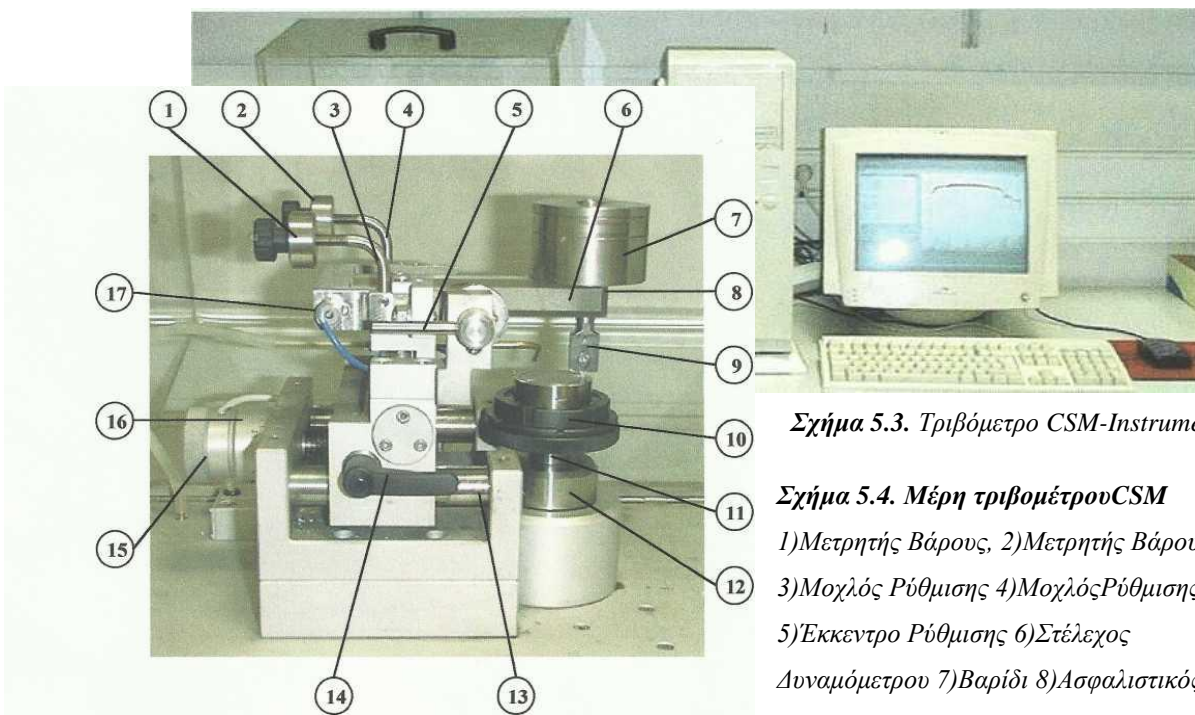
	Ένταση ρεύματος (A)		Διαφορά δυναμικού (V)		Προέκταση ηλεκτροδίου (mm)	
	Μεταφορά Υλικού με Σταγόνες	Μεταφορά Υλικού με Σπρέι	Μεταφορά Υλικού με Σταγόνες	Μεταφορά Υλικού με Σπρέι	Μεταφορά Υλικού με Σταγόνες	Μεταφορά Υλικού με Σπρέι
Διάμετρος mm (in)						
1,6 (1/16")	190-210	150-190	25-27	24-27	12,7 ± 3,2	12,7 ± 3,2

Για τις δοκιμές **τριβής ολίσθησης** χρησιμοποιήσαμε δυο διαφορετικές μηχανές:

### **Πειραματικός εξοπλισμός δοκιμών τριβής ολίσθησης.**

Ο κύριος πειραματικός εξοπλισμός αποτελείται από α) το τριβόμετρο με το οποίο πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές τριβής, β) το τραχύμετρο-προφιλόμετρο με το οποίο έγινε η εκτίμηση του όγκου φθοράς και γ) τον Η/Υ με τον οποίο συνδέεται και το τριβόμετρο και το τραχύμετρο (Σχ.3.16). Ο Η/Υ είναι εξοπλισμένος με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μετρήσεις από τον υπόλοιπο εξοπλισμό και τις επεξεργάζεται σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε δοκιμής τριβής-φθοράς.[2,12]

α) Τριβόμετρο. Οι δοκιμές τριβής-φθοράς έγιναν με τη βοήθεια του τριβομέτρου του εργαστηρίου Τριβολογίας του ΤΕΙ Πειραιά. Το συγκεκριμένο είναι τριβόμετρο τύπου στυλίσκου-δίσκου (pin-on-disk) της εταιρείας CSM-Instruments (Σχ. 5.3)



*Σχήμα 5.3. Τριβόμετρο CSM-Instruments.*

#### **Σχήμα 5.4. Μέρη τριβομέτρου CSM**

1)Μετρητής Βάρους, 2)Μετρητής Βάρους  
3)Μοχλός Ρύθμισης 4)Μοχλός Ρύθμισης  
5)Έκκεντρο Ρύθμισης 6)Στέλεχος  
Δυναμόμετρον 7)Βαρίδι 8)Ασφαλιστικός  
Κοχλίας Στυλίσκου 9)Στυλίσκος 10)Τσοκ

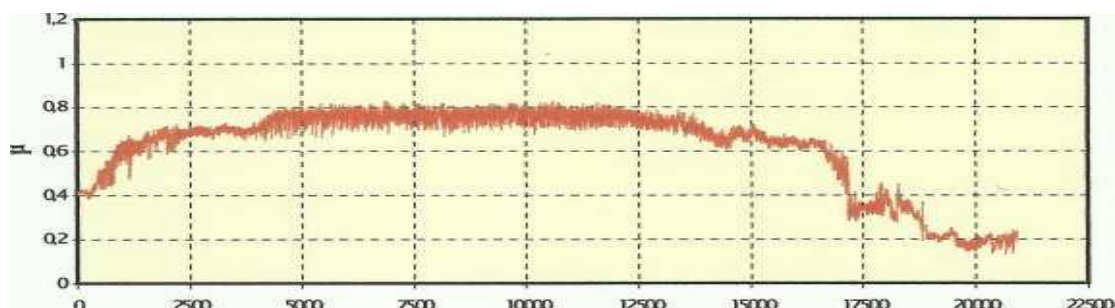
11)Δευτερεύουσα Άτρακτος 12)Πρωτεύουσα Άτρακτος 13)Βαθμονομημένος άξονας σε mm

14)Ασφαλιστικός Μοχλός 15)Στρόφαλο Ρύθμισης Ακτίνας Αύλακας 16)Βερνιέρος 17)Αισθητήρας  
μέτρησης δύναμης τριβής LV.

### Αρχή λειτουργίας τριβομέτρου.

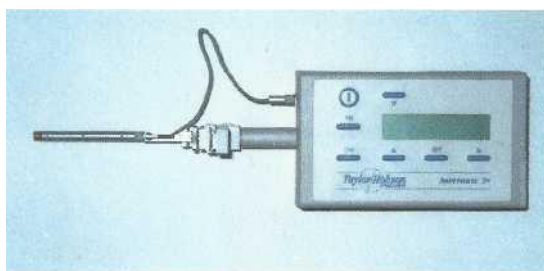
Ένα δίσκος, ο οποίος αποτελεί το δοκίμιο, περιστρέφεται με γνωστή ταχύτητα περιστροφής. Στην επιφάνεια του δίσκου- δοκιμίου ολισθαίνει το ανταγωνιστικό υλικό-στυλίσκος υπό γνωστό κάθετο φορτίο. Ο στυλίσκος είναι άκαμπτος και σχεδιασμένος έτσι, ώστε να μην προκαλεί τριβή. Εφαρμόζει στο στέλεχος ενός δυναμόμετρου τύπου  $4\Omega$  δρώντας ουσιαστικά ως μετατροπέας της δύναμης τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας του δοκιμίου και της ακίδας του στυλίσκου. Η δύναμη τριβής μετράται από τις μετακινήσεις του στελέχους του δυναμόμετρου μέσω ενός αισθητήρα LVDT (LowVoltageDistanceTransducer).

Το τριβόμετρο συνδέεται με Η/Υ ο οποίος είναι εφοδιασμένος με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να λαμβάνει συνεχώς μετρήσεις της δύναμης τριβής και να κατασκευάζει σε πραγματικό χρόνο το διάγραμμα του συντελεστή τριβής μ ως προς το μήκος ολίσθησης, το χρόνο και τον αριθμό περιστροφών του δοκιμίου (Σχ.5.5).

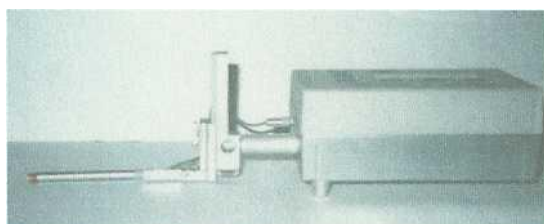


Σχήμα 5.5. Διάγραμμα συντελεστή τριβής συναρτήσει του μήκους ολίσθησης

β) Τραχύμετρο-Κατατομόμετρο. Για την εκτίμηση της φθοράς των δοκιμίων επιλέχθηκε όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μέθοδος μέτρησης του όγκου φθοράς. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών τριβής με το τριβόμετρο λόγω της περιστροφής του δοκιμίου δημιουργείται στην επιφάνειά του μια κυκλική αύλακα φθοράς, με ακτίνα που ορίζεται στην αρχή της δοκιμής. Με την κατατομή της αύλακας είναι δυνατό να γίνει εκτίμηση του όγκου φθοράς. Η κατατομομετρία και η τραχύ μέτρηση των δοκιμίων έγινε με τη βοήθεια του τραχύμετρου-κατατομόμετρου του εργαστηρίου Τριβολογίας του ΤΕΙ Πειραιά. Η συγκεκριμένη συσκευή είναι τύπου στυλίσκου (stylusprofiler) της εταιρείας Taylor-Hobson (Σχ. 5.6).



α)



β)

*Σχήμα 5.6. (α), (β) Τραχύμετρο-Προφιλόμετρο Taylor-Hobson.*

Όπως και το τριβόμετρο, έτσι και το τραχύμετρο-προφιλόμετρο συνδέεται με τον Η/Υ και με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού επεξεργάζεται την κατατομή της επιφάνειας.

#### **Επιλογή υλικού στυλίσκου**

Ο σχεδιασμός του εργαστηριακού τριβομέτρου με το οποίο έγιναν οι δοκιμές τριβής-φθοράς, προβλέπει τη χρήση ενός κυλινδρικού στελέχους (στυλίσκου) το οποίο εφαρμόζει στην άκρη ενός δυναμόμετρου τύπου «ωμέγα» (“Ω” type). Το στέλεχος αυτό φέρει στην άκρη του σφαίρα διαμέτρου  $d = 6 \text{ mm}$ , η οποία είναι αυτή που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου (Σχ. 3.19). Η σφαίρα εφαρμόζει στο στέλεχος με τέτοιο τρόπο ώστε να μην κυλιέται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος, εξασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό τριβή ολίσθησης. Το υλικό της σφαίρας επιλέγεται ανάλογα με τη σκληρότητα και τη φύση του υλικού του δοκιμίου, ανάμεσα στις προτάσεις του κατασκευαστή (Πίν. 3.8).

Για τις ανάγκες των πειραμάτων τριβής-φθοράς, ως υλικό της σφαίρας του στυλίσκου χρησιμοποιήθηκε αλουμίνια. Η επιλογή έγινε με βάση τη σκληρότητα της επιφάνειας των δοκιμίων.

Πίνακας 5.5. Ιδιότητες υλικών σφαίρας  $Al_2O_3$ .

Properties	Unit	Sap- phire	Ruby	Alumina	SiliconN itride HP	SiliconNit ridesinter ed	SiliconCa rbide	Zirconia Y-TZP	Zirconia Mg-PSZ/ Y PSZ	TungstenC arbide	StainlessS teel
Crystallisation	-	Mono	Mono	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly	Poly
Composition (wt%)	-	$Al_2O_3$	99% $Al_2O_3$	$Al_2O_3$	$Si_3N_4$	$Si_3N_4$	SiC	$ZrO_2$	$ZrO_2$	WC(6T10)	
Purity	%	99.99	1% $Cr_2O_3$	99.80	90	90	(-)	90-95	90-95	WC94+Co 6	
Density	G/cm <sup>3</sup>	3.99	3.99	3.1-3.2	3.0-3.2	3.0-3.2	6.0	6.05	5.8	15	
Hardness HV	N/mm <sup>2</sup>	23000	23000	19000	16000	15500	24000- 28000	11000- 15000	15000	15500	5000- 8000
Compression strength	N/mm <sup>2</sup>	2100	2100	2800	3000	3000	1200- 2900	1800	2000	5300	1000
Tensile strength	N/mm <sup>2</sup>	(-)	(-)	280	400	250	180	(-)	(-)	(-)	500-1500
Bending strength	N/mm <sup>2</sup>	390	390	470	1000	600-800	300-600	700-1100	400-800	1600	450
Fracture toughness	Mpa.m <sup>1/2</sup>	1	1	4	6	6	4	10	8-10	(-)	30-80
Elasticity constant	Gpa	430	430	380	320	320	310	200	200	610	200
Thermal expansion	10 <sup>-6</sup> . K <sup>-1</sup>	5.3	5.3	8.1	3.2	3.2	4.1	10.5	10.5	5.5	10-12
Thermal conductivity	W/m.K	36	36	29	40	40	85	2	2	50	50
Heatcapacity	J/Kg.K	755	755	900	750	700	800	400	400	201	(-)
Max. use temp. in air	°C	1800- 2000	1800- 2000	1500- 1800	1200- 1500	1200- 1500	1600	1000	800-900	(-)	300-600
Chemical resistance	Acidsba ses	Excell. entGoo d	Excell. Good	Excell. Good	Excell. Good	Excellent Good	GoodGoo d	GoodGoo d	GoodGoo d	Dissolves (-)	BadBad



*Σχήμα 5.7. Στυλίσκος με σφαίρα αλουμίνας.*

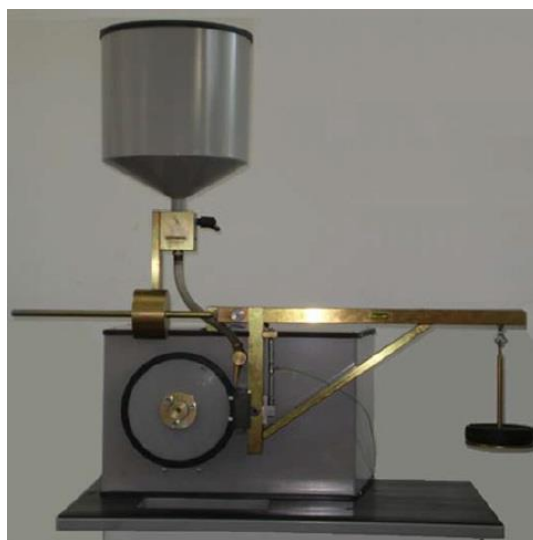
### **Πειραματικός εξοπλισμός συσκευής ξηρής εκτριβής**

Η συγκεκριμένη μηχανή είναι πειραματική συσκευή ξηρής εκτριβής λείανσης άμμου τροχού που λειτουργεί βάση προτύπου ASTM G65, η οποία προσομοιώνει την θραύση των πετρωμάτων με εργαλεία κατασκευασμένα από μέταλλα, στα οποία υπάρχουν σκληρές επικαλύψεις. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την έρευνα νέων υλικών για αυτούς τους τύπους εφαρμογών (διατρήσεις, συνθλίψεις και μετακινήσεις μεταλλευμάτων ή και ορυκτών), μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο ελέγχου της ποιότητας για υλικά που προορίζονται για εφαρμογές είτε χαμηλών είτε υψηλών πιέσεων εκτριβής λείανσης, όπως αντλίες πολτών, εξοπλισμό θρυμματισμού, λιανιστές ανακύκλωσης, εξοπλισμού κατεδάφισης κ.α. [13]

Με τη πειραματική αυτή συσκευή ξηρής εκτριβής λείανσης άμμου / τροχού, σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 28080:2011 [13], εξετάζεται η εκτριβή λείανσης (abrasive wear) οποιουδήποτε υλικού, συμπεριλαμβανομένων των μαλακών ή σκληρών μετάλλων, εναποθέσεις με χρήση αερίου-ηλεκτροδίου και ηλεκτρικής ενέργειας, εναποθέσεις με χρήση τόξου πλάσματος, μέταλλα κονιομεταλλουργίας, κεραμικά υλικά κ.α.. Η συσκευή προκαλεί εκτριβή λείανσης στην επιφάνεια δοκιμίου, με τη χρήση λειαντικού μέσου (abrasive), ελεγχόμενης ροής, μεγέθους και σύνθεσης. Το λειαντικό μέσο εισάγεται στην επιφάνεια επαφής μεταξύ του δοκιμίου και ενός

περιστρεφόμενο τροχού, ο οποίος είναι είτε μεταλλικός είτε επενδεδυμένος με ελαστικό, συγκεκριμένης σύνθεσης και σκληρότητας. Το δοκίμιο πιέζεται έναντι του περιστρεφόμενου τροχού με καθορισμένη δύναμη μέσω ενός μοχλοβραχίονα συγκράτησης και φόρτισης, ενώ η ελεγχόμενη ροή του λειαντικού μέσου, εκτριβεί την επιφάνεια δοκιμής. Η περιστροφή του τροχού έχει πάντα ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση της ροής του λειαντικού μέσου. Σημειώνεται ότι ο άξονας περιστροφής του μοχλοβραχίονα συγκράτησης και φόρτισης είναι επαπτόμενος στην επιφάνεια του τροχού, καθώς και κάθετος προς την οριζόντια διάμετρο, κατά μήκος της οποίας εφαρμόζεται το φορτίο. Η διάρκεια κάθε δοκιμής καθώς και η εφαρμοζόμενη δύναμη, μεταβάλλονται ανάλογα την διαδικασία. Τα δείγματα ζυγίζονται πριν και μετά τη δοκιμή (με ακρίβεια 0,001 gr) και καταγράφεται η απώλεια μάζας. Η απώλεια μάζας μετατρέπεται σε απώλεια όγκου, εξαιτίας των διαφορών της πυκνότητας των υλικών. Η εκτριβή λείανσης αναφέρεται ως απώλεια όγκου ανά καθορισμένη διαδικασία. Για την παραγωγή ομοιόμορφων αποτελεσμάτων, μερικά στοιχεία της πειραματικής συσκευής είναι ζωτικής σημασίας, τα οποία και πρέπει να τηρούνται σταθερά. [13,14,15,16] Αυτά είναι:

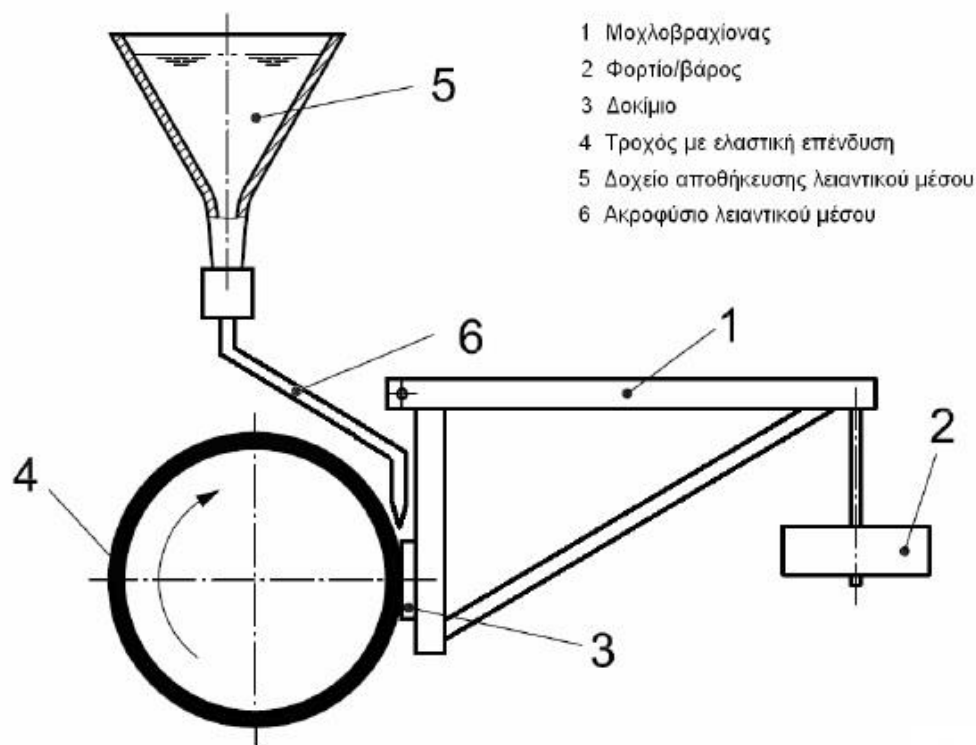
- η ταχύτητα περιστροφής του τροχού,
- τα φορτία επί των επιφανειών,
- η σύνθεση και η σκληρότητα του τροχού και
- το λειαντικό μέσο, η ροή και η γεωμετρία του.



*Σχήμα 5.8. Πειραματική συσκευή εκτριβής κατά ASTM G65.*



Ο τροχός της διάταξης αποτελείται από έναν χαλύβδινο δίσκο (AISI 1020), υπενδεδυμένος από χυτευμένο ελαστικό (χλωροβουτίλιο). Η ελαστική ύλη έχει χυτευθεί και στερεοποιηθεί πλήρως στη περιφέρεια του δίσκου, χρησιμοποιώντας χαλύβδινο καλούπι. Η τελική σκληρότητα του στερεοποιημένου ελαστικού είναι A60 (με απόκλιση  $\pm 2$ ), μετρημένο με σκληρόμετρο ελαστικών (durometer – σχήμα 5.9). Πριν την έναρξη κάθε δοκιμής, ελέγχεται η σκληρότητα του ελαστικού. Έτσι, πραγματοποιούνται τουλάχιστον τέσσερις σκληρομετρήσεις ανά  $90^\circ$  στην περιφέρεια του ελαστικού τροχού, όπως ορίζεται στην προδιαγραφή ASTM D 2240. Οι αναγραφόμενες μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται με καθυστέρηση 5 δευτερόλεπτων από την στιγμή της εφαρμογής της δύναμης πάνω στο ελαστικό.[16]



Σχήμα 5.9. Δομικά μέρη συσκευής κατά ASTM G65.

### 5.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΤΡΙΒΙΚΩΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΕΩΝ-ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

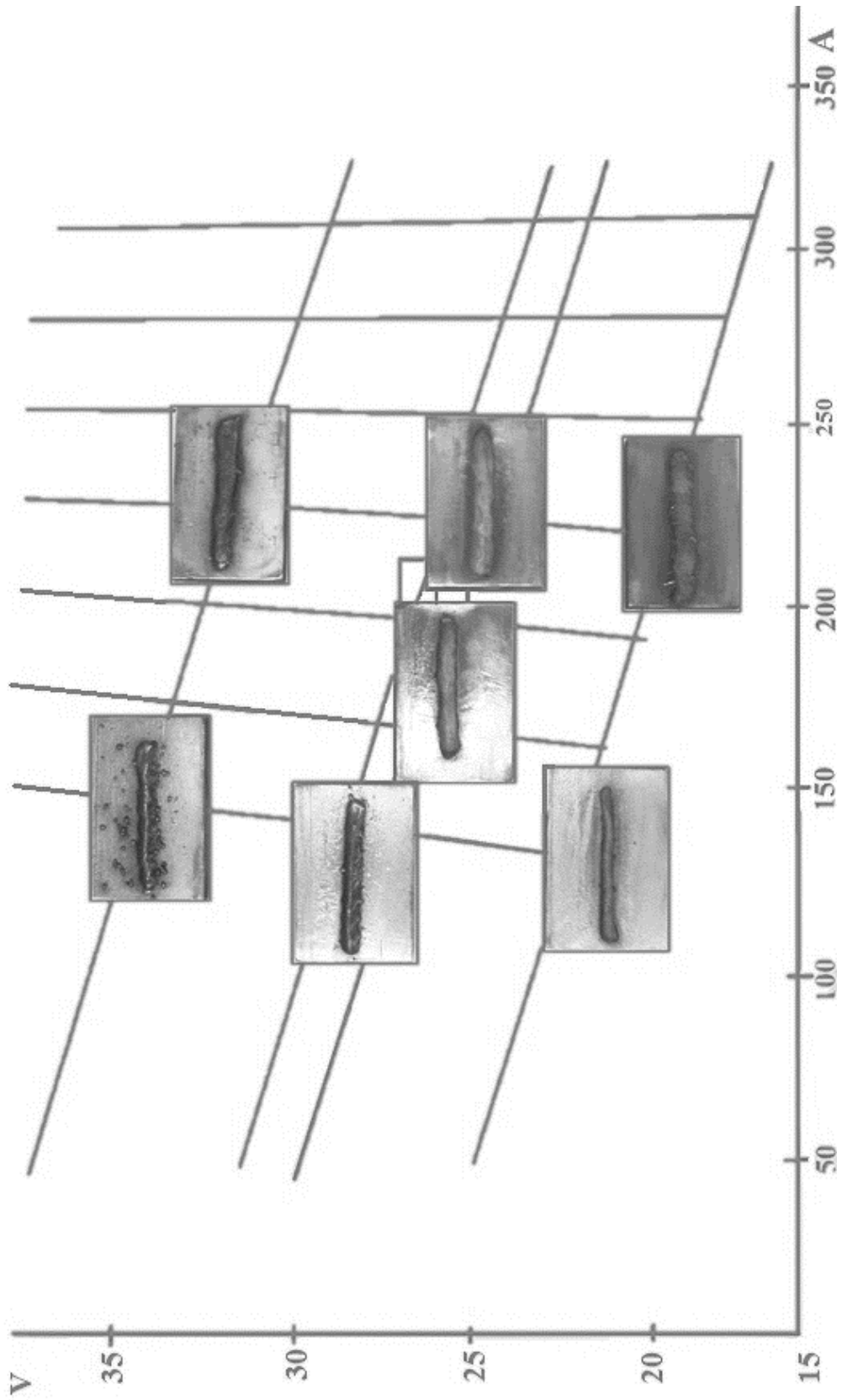
Όπως αναφέρθηκε σκοπός της εναπόθεσης ήταν η δημιουργία επικάλυψης αντιτριβικών ιδιοτήτων χρησιμοποιώντας καρβίδιο τιτανίου (TiC). Η εναπόθεση πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο συγκολλήσεων Flux Cored Arc Welding (FCAW) όπου χρησιμοποιήσαμε παραγεμιστό ηλεκτρόδιο υπό την προστασία αδρανούς αερίου, ενώ εξετάστηκε η μικροδομή και συμπεριφορά της εναπόθεσης.



*Σχήμα 5.10. Μακρογραφία εναποθέσεων.*

Ένα ενδεικτικό διάγραμμα V-A που δημιουργήθηκε με σκοπό την εύρεση των καταλληλότερων ρυθμίσεων για την εναπόθεση. Εμφανίζονται όλες οι δοκιμές οι οποίες έγιναν και είχαν διαφορετικά χαρακτηριστικά η μια από την άλλη.

Σχήμα 5.11. Διάγραμμα ρυθμίσεων και δοκιμών εναποθέσεων (V-A).



---

## 5.4 ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ (ΤΡΙΒΗ – ΦΘΟΡΑ)

### Γενικά

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός τριβοσυστήματος σε συνθήκες ξηράς τριβής είναι η γραμμική ταχύτητα ολίσθησης, το φορτίο, τα υλικά του τριβικού ζεύγους και η θερμοκρασία. Θεωρώντας την έτσι κι αλλιώς πολύ χαμηλή αναπτυσσόμενη θερμοκρασία αμελητέα, και διατηρώντας την ίδια γραμμική ταχύτητα ολίσθησης σε όλες τις δοκιμές, το σύστημα από τεραπαραμετρικό μετατρέπεται σε διπαραμετρικό. Με τον τρόπο αυτό απλουστεύεται η μελέτη αφού εξετάζεται μόνο η επίδραση του φορτίου και η κατάσταση του υλικού, οι οποίες είναι και οι σημαντικότερες παράμετροι κατά τη λειτουργία ενός τριβοσυστήματος. Επίσης η παρούσα εργασία δεν έχει στόχο τη προσομοίωση με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας ενός τριβοσυστήματος, αλλά την αξιολόγηση ενός υλικού ως προς την αντίστασή του σε τριβή και φθορά.

### Μεθοδολογία Μετρήσεων

Για την ακριβέστερη αξιολόγηση της αντιτριβικής συμπεριφοράς του υλικού δεν αρκούσε μόνο η καταγραφή του συντελεστή τριβής και του συνολικού όγκου φθοράς μετά από κάθε δοκιμή. Ιδιαίτερα στη περίπτωση της εναζώτωσης που η σκληρότητα δεν είναι ομοίως κατανομημένη σε όλη τη μάζα του υλικού, ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της μεταβολής του ρυθμού φθοράς. Ουσιαστικά ο ρυθμός φθοράς είναι το πλέον χαρακτηριστικό μέγεθος που αφορά στην αντίσταση σε φθορά των υλικών. Το πόσο γρηγορότερα ή αργότερα φθείρεται ένα υλικό από ένα άλλο υπό τις ίδιες συνθήκες δείχνει πόσο λιγότερη ή μεγαλύτερη αντίσταση σε φθορά έχει σε σχέση πάντα με το άλλο υλικό.

Για τη μέτρηση του ρυθμού φθοράς θα έπρεπε να λαμβάνονται ενδιάμεσες μετρήσεις του όγκου του αποβαλλόμενου υλικού κατά τη διάρκεια των δοκιμών τριβής. Αυτό απαιτούσε παύση των δοκιμών τριβής και μέτρηση του όγκου φθοράς τη δεδομένη στιγμή με χρήση του τραχύμετρου-κατατομόμετρου, χωρίς τη μετακίνηση του δοκιμίου-δίσκου από το τριβόμετρο, και μάλιστα με διατήρηση της επαφής του στυλίσκου πάνω στη επιφάνεια του δοκιμίου έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ακριβής

θέση της ακμής του στυλίσκου μέσα στην αύλακα και επομένως η ομαλή συνέχεια της δοκιμής τριβής.

Από την κατανομή της αύλακας φθοράς υπολογίζεται το εμβαδό της τομής της αύλακας μέσω  $H/Y$  και του ηλεκτρονικού προγράμματος επεξεργασίας των δεδομένων του τραχυμέτρουκατατομόμετρου. Η τιμή του όγκου φθοράς προκύπτει από το γινόμενο του εμβαδού της αύλακας επί της περιμέτρου της αύλακας η οποία υπολογίζεται εύκολα αφού είναι γνωστή ακτίνα της

$$V = E_s \times 2 \times \pi \times R$$

όπου:  $E_s$ , το εμβαδόν της κάθετης τομής της αύλακας ολίσθησης και  $R$ , η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς ολίσθησης.

### **Στατιστική ανάλυση μετρήσεων φθοράς**

Λόγω της ιδιομορφίας και του τρόπου φθοράς του υλικού η γεωμετρία της αύλακας φθοράς δεν ήταν δυνατό να είναι ομοιόμορφη. Για το λόγο αυτό μια και μόνο μέτρηση του εμβαδού της κατανομής τη αύλακας σε ένα τυχαίο σημείο της περιφέρειάς της δεν θα μπορούσε να οδηγήσει σε αξιόπιστη μέτρηση του όγκου φθοράς, επομένως το πλήθος των ενδιάμεσων μετρήσεων του εμβαδού της κατανομής της αύλακας θα έπρεπε να ήταν τέτοιο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η ακρίβεια των μετρήσεων, με σκοπό να εκτιμηθεί ο ρυθμός φθοράς του εκάστοτε υλικού. Κρίθηκε απαραίτητο να πραγματοποιηθούν 10 μετρήσεις στην περιφέρεια της τροχιάς που δημιουργήθηκε από τον ανταγωνιστή σε τυχαία σημεία της περιφέρειας αυτής έτσι ώστε ο μέσος όρος των μετρήσεων αυτών να χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του όγκου φθοράς.

### **Δοκιμές Τριβής-Φθοράς**

Μετά την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω διαδικασιών ακολούθησαν οι κύριες δοκιμές τριβής-φθοράς σύμφωνα με τον πειραματικό σχεδιασμό. Τα μεγέθη που μετρήθηκαν εκτός από τον συντελεστή τριβής, ήταν το εμβαδό της αύλακας φθοράς καθώς και το μέγιστο βάθος της. Από τα μεγέθη αυτά προέκυψαν ο συνολικός κάθε φορά όγκος φθοράς και ο ρυθμός φθοράς των υλικών. Η συλλογή και σύγκριση των

αποτελεσμάτων και των πειραματικών δεδομένων οδήγησε στην διεξαγωγή συμπερασμάτων και τον χαρακτηρισμό της τριβολογικής συμπεριφοράς της επικάλυψης.

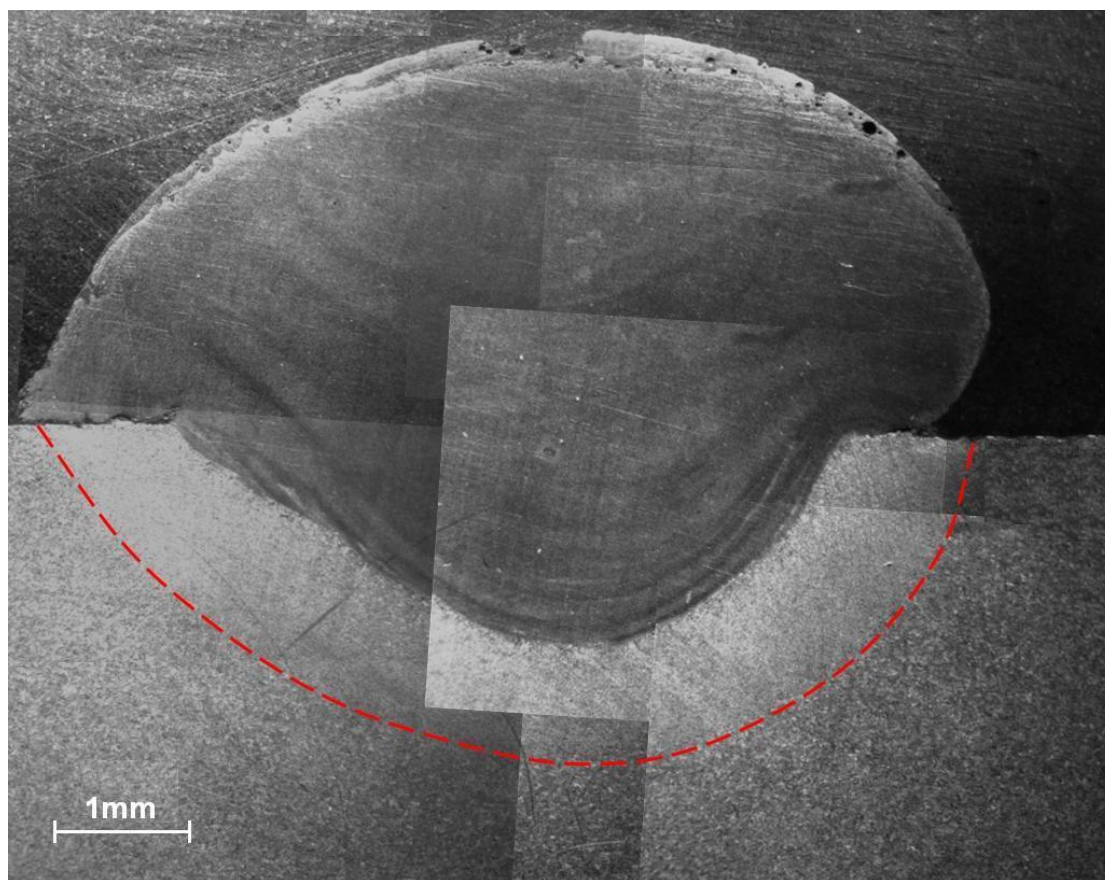
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα από τις διαδικασίες που εφαρμόσαμε αλλά και φυσικά από τις τελικές δοκιμές που πραγματοποιήσαμε στις αναγεννημένες επιφάνειες, δηλαδή τις δοκιμές τριβής και φθοράς. Στην συνέχεια θα προκύψουν συμπεράσματα, τα οποία ουσιαστικά θα αξιολογήσουν την τριβολογική συμπεριφορά του τελικού μας προϊόντος. Επιπλέον, θα γίνει σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων με τις παρόμοιες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, πάντα όμως με την επιβελτίωση χάλυβα από καρβίδιο του τιτανίου.

#### 6.1 ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

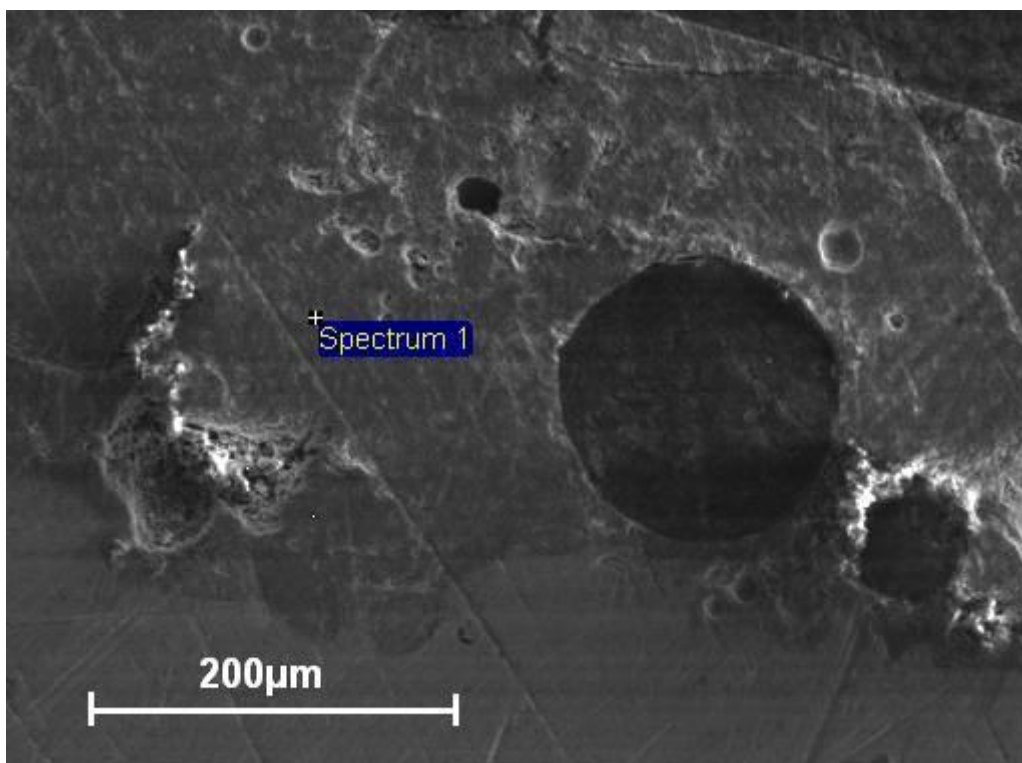
Στο σχήμα 6.1, παρουσιάζεται η μακρογραφία της εναπόθεσης. Διακρίνεται σαφώς η εναπόθεση, πάχους ~ 5mm και κάτω από αυτή διακρίνεται η δημιουργία μιας Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης.



*Σχήμα 6.1. Σύνθεση μακρογραφιών μικροσκοπίου της επιγόμεσης.*

- Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη έχει πλάτος ~1mm και βρίσκεται σε επαφή με το μέταλλο βάσης αλλά και με την επιγόμωση. Αυτή η ζώνη δημιουργήθηκε κατά την εναπόθεση του υλικού (πέραςμα). Άλλες ρυθμίσεις στις βασικές παραμέτρους της επιφανειακής κατεργασίας θα δημιουργούσαν μια πιο μικρή ή αντίθετα μια πιο μεγάλη και ευρεία θερμικά επηρεασμένη ζώνη στο υπόστρωμα ανάλογα το ποσοστό της ενέργειας που θα επιβαλλόταν στο υλικό.

Στο σχήμα που ακολουθεί (6.2), παρουσιάζονται περιοχές της εναπόθεσης στις οποίες η μικροδομή παρουσιάζει διαφορετικά μορφολογικά χαρακτηριστικά:



*Σχήμα 6.2. Μικρογραφία SEM.*

*Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα μικροσκοπίου.*

Spectrum	O	F	Al	Si	Ca	Ti
Spectrum 1	44.68	13.85	12.58	1.03	19.98	7.89

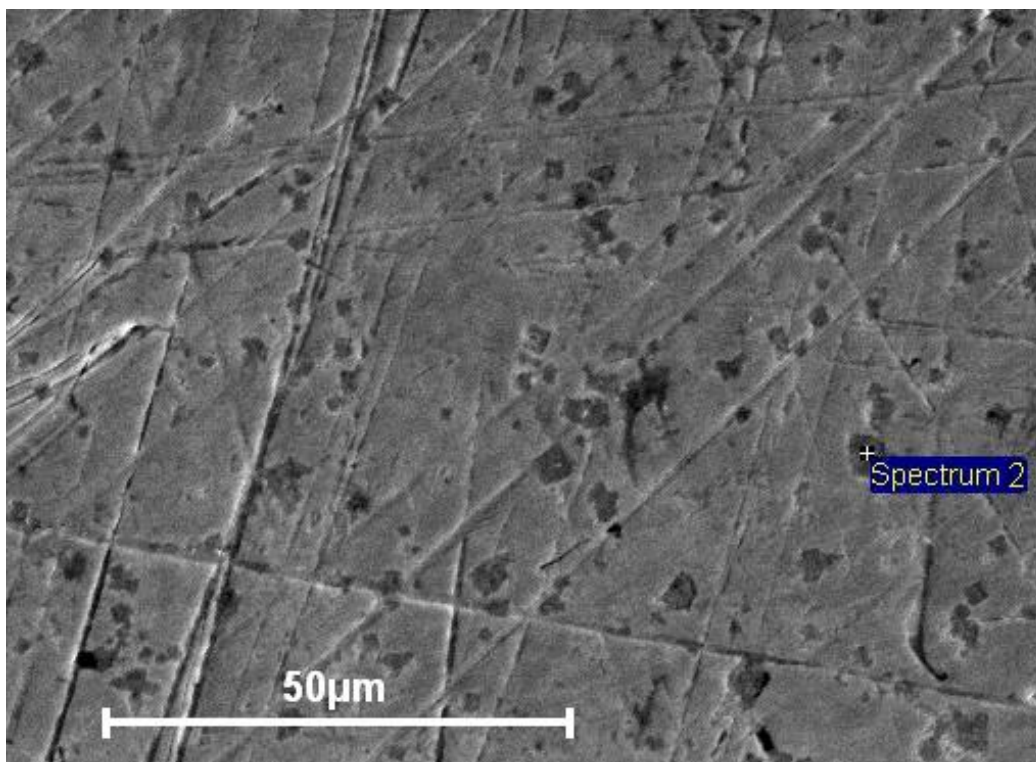
- Μετά από μικροσκοπική παρατήρηση μετρήθηκαν από SEM, σε ποσοστά, 44,68% οξυγόνο, 13,85% σίδηρο, 12,58 % αλουμίνιο, 1,03% πυρίτιο, 19,98%



ασβέστιο, 7,89% τιτάνιο. Όλα τα μέταλλα που εμφανίζονται εκτός από το σίδηρο οφείλονται στο ηλεκτρόδιο και τη σύστασή του, τα οποία είναι αναγκάια για όσο το δυνατόν καλύτερη εναπόθεση.

- Παρατηρείται μεγάλο ποσοστό οξυγόνου, διότι έχει ξεκινήσει η οξείδωση του μετάλλου.
- Παρατηρήθηκαν, πόροι που δημιουργήθηκαν κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου μετά την εναπόθεση. Αυτοί οι πόροι βρίσκονται στην επικάλυψη της αναγόμωσης. Παρατηρούνται επίσης, να έχουν όπως φαίνεται στο σχήμα διάμετρο  $\approx 200\mu\text{m}$ .

Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση  $50\mu\text{m}$  η επιφάνεια του δοκιμίου και διακρίνεται ότι :

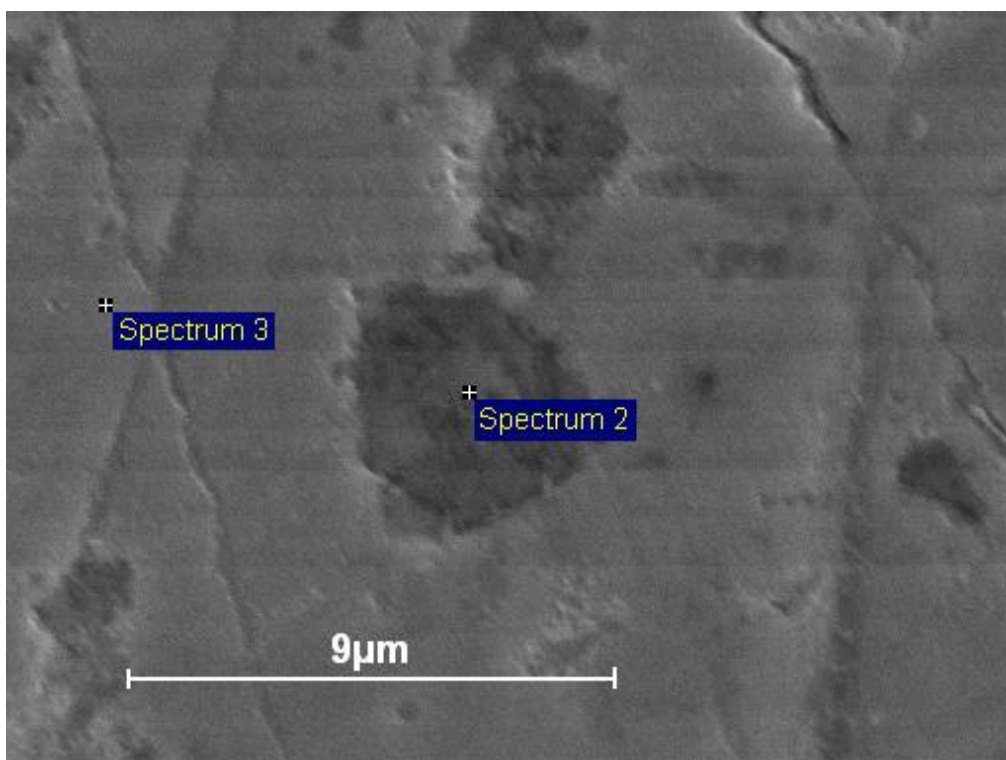


Σχήμα 6.3. Μικρογραφία SEM.

*Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα μικροσκοπίου.*

Spectrum	C	Ti	Fe	Mo
Spectrum 2	47.89	48.85	1.79	1.46

- Η διασπορά των καρβιδίων χαρακτηρίζουν την ποιότητα που θα έχει η αναγώμωση. Τα καρβίδια αυτά, με μέσο μέγεθος ~4,8μm, παρέμειναν άτηκτα κατά την εναπόθεση, και κατανέμονται σχετικά ομοιόμορφα μέσα στην μήτρα, με μέση απόσταση μεταξύ τους ~10-15μm. Τα μεγάλα μεγέθους και βάρους σωματίδια-καρβίδια συγκεντρώνονται στην κεντρική περιοχή και στα «βαθύτερα» σημεία της εναπόθεσης. Αντιθέτως, τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια συγκεντρώνονται σε επιφανειακό στρώμα.
- Τα καρβίδια τείνουν να έχουν σφαιροειδές σχήμα και η κατανομή τους είναι αρκετά ομοιόμορφη.
- Παρατηρώντας τη χημική ανάλυση στο σχήμα 6.3, προκύπτει ότι έχουμε ένα καρβίδιο τιτανίου με τη συγκεκριμένη χημική σύσταση, όπως αναφέρεται στον παραπάνω πίνακα, με 48,85% περιεκτικότητα σε Ti και 47,89% C. Ο σίδηρος εμφανίζει ένα πολύ μικρό ποσοστό Fe 1.79% ενώ έχουμε και ένα ελάχιστο ποσοστό μολυβένιου 1,46%.



*Σχήμα 6.4. Μικρογραφία SEM.*

*Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα μικροσκοπίου.*

Spectrum	C	Ti	Cr	Mn	Fe	Mo
Spectrum 3	0	0	4.77	2.34	92.89	0

- Στο σχήμα 6.4 που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 6.3, βλέπουμε μεγάλη συγκέντρωση σιδήρου, το οποίο μας δείχνει ότι στο συγκεκριμένο σημείο το υλικό μας έχει παραμείνει σχεδόν ανεπηρέαστο. Ο σίδηρος που είναι σε ποσοστό Fe 92,89%. Από το μικροσκοπικό αυτό έλεγχο, παρατηρείται ότι στο συγκεκριμένο σημείο δεν υπάρχει ίχνος τιτανίου και άνθρακα, παρά μόνο Cr, Mn σε μικρά ποσοστά που οφείλονται στη σύσταση του ηλεκτροδίου.
- Από την μεγαλύτερη αυτή μεγέθυνση, διακρίνεται καλύτερα η σφαιροειδής δομή των καρβιδίων και παρατηρούμε επίσης μικρότερα καρβίδια στην επιφάνεια του δοκιμίου, τα οποία έχουν ένα μέσο μέγεθος ~1μm και βρίσκονται σε μέση απόσταση από τα μεγαλύτερα ~5-10μm.

## 6.2 ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΒΑΣΕΙ ΔΟΚΙΜΗΣ ΞΗΡΑΣ ΕΚΤΡΙΒΗΣ

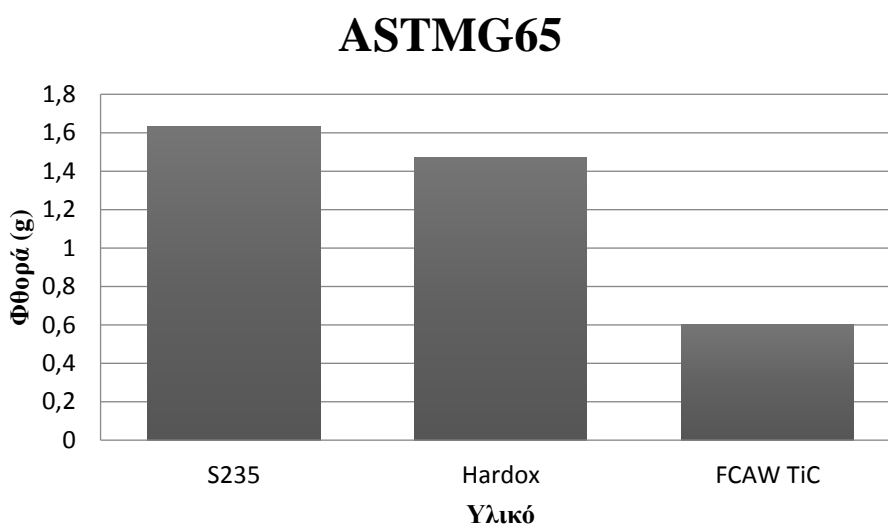
Έχοντας πραγματοποιήσει τη δοκιμή τριβής και έχοντας μετρήσει την μάζα των δοκιμίων πριν αλλά και μετά τη δοκιμή, υπολογίσαμε τη διαφορά τους και έτσι βρήκαμε τη φθορά που έχουν υποστεί τα παρακάτω δοκίμια:

*Πίνακας 6.4. Πίνακας μετρήσεων μάζας και υπολογισμός της διαφοράς τους.*

Υλικό	Αρχική Μάζα (g)	Τελική Μάζα (g)	Φθορά (g)
S235	65,24	63,61	1,63
Hardox	63,59	62,12	1,47
FCAW TiC	219,66	219,06	0,60

Η τριβολογική δοκιμή πραγματοποιήσε 6000 στροφές με 200 (rpm) στροφές το λεπτό για 30 (min) λεπτά βάσει προτύπου ASTM G65.

*Σχήμα 6.5. Διάγραμμα φθοράς.*



Από την σύγκριση της φθοράς των τριών υλικών μετά την δοκιμή ξηράς εκτριβής, προέκυψε ότι το υλικό με την τεχνική FCAW φθείρεται πολύ πιο δύσκολα απ' ότι τα άλλα δύο όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα.

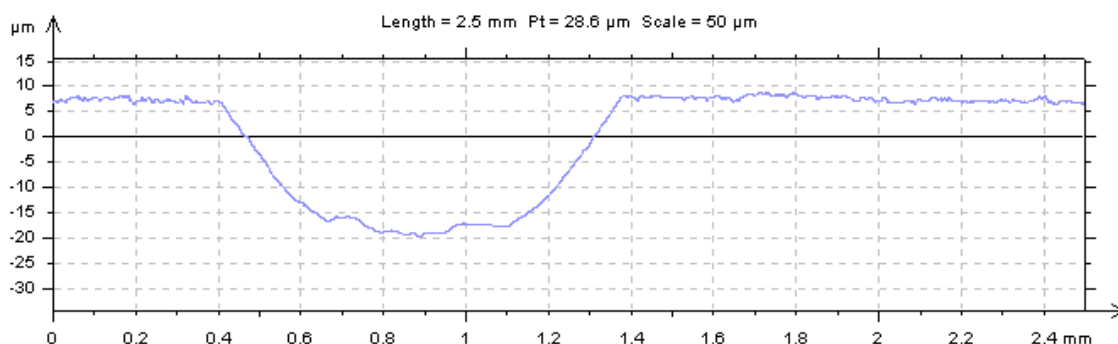


*Σχήμα 6.6. Δοκίμια: α) S235, β) Hardox, γ) FCAW TiC.*

Το ενισχυμένο με καρβίδια δοκίμιο εμφάνισε πολύ καλή αντιτριβική συμπεριφορά σε σχέση με τον εμπορικού χάλυβα αλλά και τον απλό ανθρακούχο S235. Συγκεκριμένα, η απώλεια όγκου φθοράς που παρατηρήθηκε ήταν περίπου 0,6 g για την τεχνική FCAW, ενώ στην περίπτωση του Hardox σημειώθηκε περίπου 1,50 g και 1,60 g για τον απλό S235.

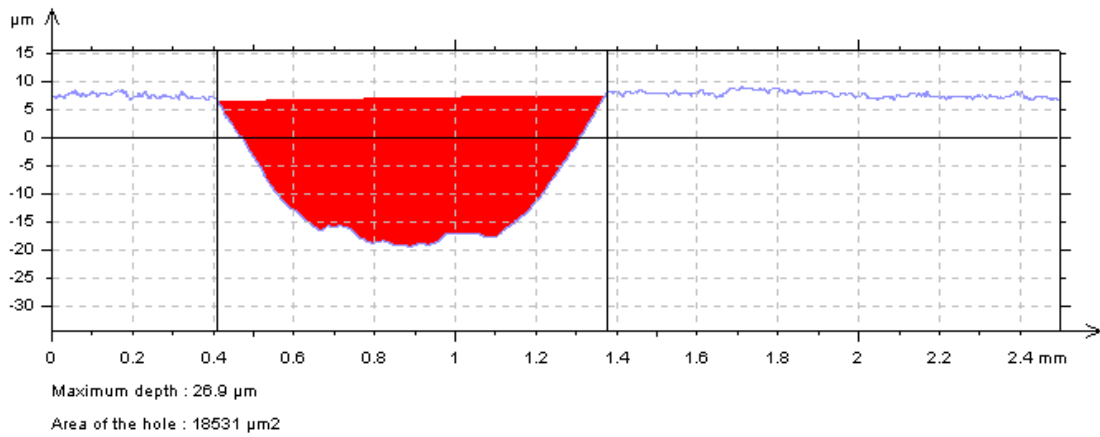
### 6.3 ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΒΑΣΕΙ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ-ΔΙΣΚΟΥ

Μετά τις δοκιμές τριβής φθοράς για όλα τα δοκίμια που θέλουμε να συγκρίνουμε, δηλαδή το αναγομωμένο δοκίμιο με τεχνική FCAW TiC, το δοκίμιο του εμπορικού χάλυβα Hardox και του απλού κατασκευαστικού χάλυβα S235, το οποίο αποτελεί και το υπόστρωμα της εναπόθεσης μας, με την χρήση του ταχυμέτρου-προφιλόμετρου Taylor-Hobson πήραμε μετρήσεις για το προφίλ της εκάστοτε επιφάνειας που δημιουργήθηκε μετά την δοκιμή. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διαφορετικά φορτία των 1N - 2N - 5N - 10N και σε όλα ορίστηκε όριο 200.000 στροφών. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν παρουσιάζονται με την μορφή διαγραμμάτων και μας δείχνουν το προφίλ της επιφάνειας (Σχ. 6.7).



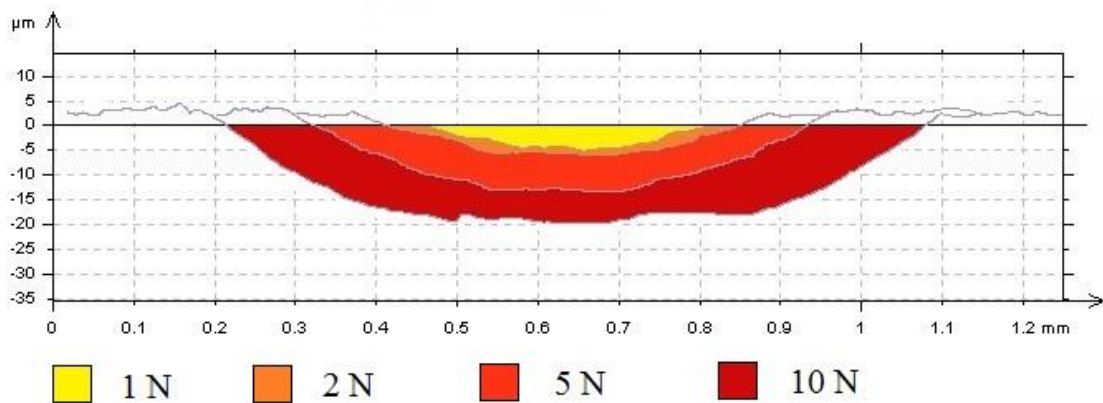
*Σχήμα 6.7. Παράδειγμα προφίλομέτρησης δοκιμίου μετά από δοκιμή.*

Στην συνέχεια από το προφίλ της επιφάνειας μέσω εμβαδομέτρησης (Σχ. 6.8) πήραμε μετρήσεις για το εμβαδό και μετρήσεις για το μέγιστο βάθος διείσδυσης του ανταγωνιστή, και για την απόσταση που διένυσε ο ανταγωνιστής πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Σε όλες τις δοκιμές ορίστηκε ένα μέγιστο όριο στροφών που θα ολοκληρωθεί η διαδικασία και αυτό το όριο ήταν οι 200.000 στροφές οι οποίες στην συνέχεια μεταφράστηκαν σε μέτρα που διένυσε ο ανταγωνιστής πάνω στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου.



*Σχήμα 6.8. Παραδειγμα μέτρησης όγκου φθοράς.*

Για κάθε δοκιμή με διαφορετικό επιβαλλόμενο φορτίο είναι εμφανής η διαφορά στη διείδυση.



*Σχήμα 6.9. Συγκριτικό διάγραμμα κατατομής επιφανειών μετά από δοκιμή με διάφορα φορτία.*

Μέτρηση του αποβαλλόμενου όγκου με χρήση μηχανικού τραχύμετρου. Η γεωμετρία της αύλακας φθοράς αντιστοιχεί στη γεωμετρία του κοπτικού άκρου που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή ολίσθησης.

Ο όγκος του αποβαλλόμενου υλικού επέτρεψε τη μέτρηση της γεωμετρίας της αύλακας φθοράς (Σχημα 6.8) και τον προσδιορισμό του αντίστοιχου συντελεστή φθοράς από τη σχέση:

$$K = \frac{V}{F \times S}$$

Όπου: V, όγκος φθοράς σε (mm<sup>3</sup>)

F, το επιβαλλόμενο φορτίο σε (N)

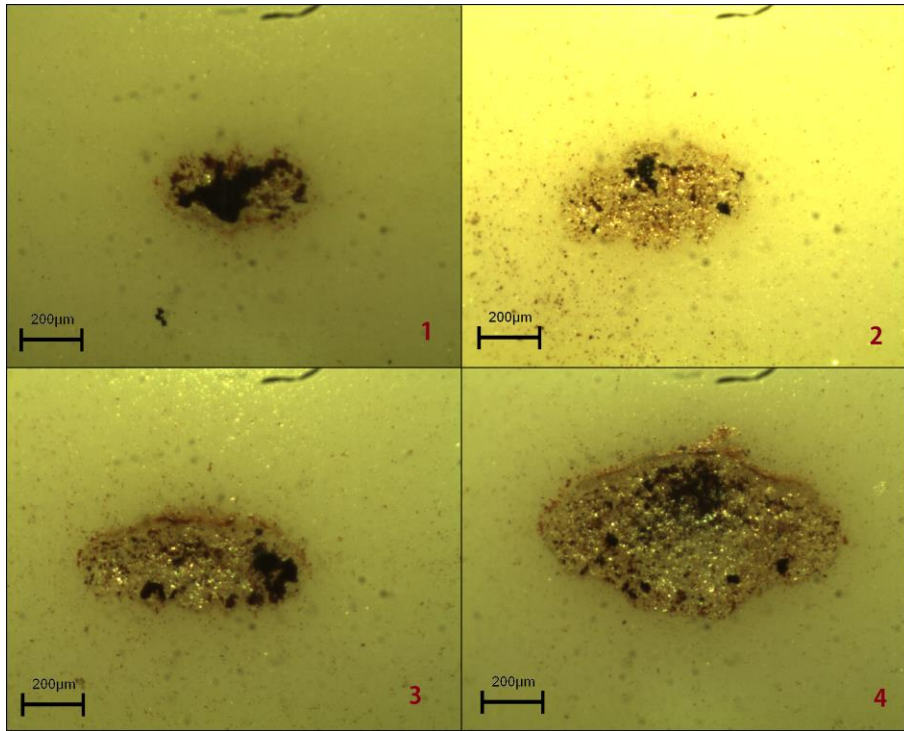
S, η συνολική απόσταση ολίσθησης σε (m)

Η εικόνα του ανταγωνιστή μας που χρησιμοποιήθηκε, στυλίσκου σφαίρας αλουμίνιας που χρησιμοποιήθηκε, εμφάνισε την εξής μορφολογία στην επιφάνειά της έπειτα από τις δοκιμές για εκείνη με τεχνική FCAW και του εμπορικού Hardox, οι οποίες παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες και έχουμε τις εξής παρατηρήσεις:

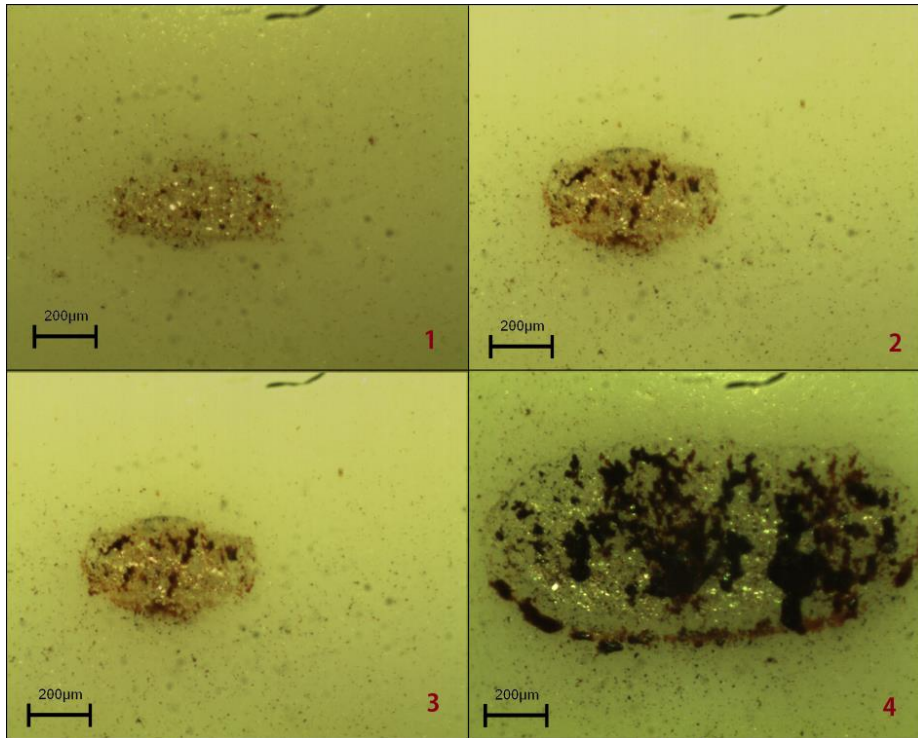
- Αρχικά, στις δύο περιπτώσεις όσο προσθέτουμε βάρος τόσο μεγαλύτερη φθορά έχουμε στον ανταγωνιστή μας. Αν όμως τα κοιτάξουμε ξεχωριστά θα δούμε ότι για τον αναγομωμένο χάλυβα, παρατηρείται μια ομαλή φθορά από το 1N έως τα 10N που σταδιακά αυξάνεται, ενώ για Hardox από 1N έως 5N το υλικό δεν έχει φθαρεί τόσο, όσο στα 10 N και αυτό οφείλεται και από τα διαγράμματα φθοράς, ότι ο Hardox όσο αυξάνουμε το βάρος, τόσο αυξάνεται και η φθορά του απότομα και όχι ανάλογα όπως του χάλυβα με τεχνική FCAW.
- Στον Hardox υπάρχει μεγαλύτερη μεταφορά υλικού στον ανταγωνιστή απ ότι στον αναγομωμένο με τεχνική FCAW.

Από μικροσκοπική ανάλυση στον σφαιρικό ανταγωνιστή της τριβολογικής δοκιμής, διακρίνεται το φαινόμενο της πρόσφυσης. Η διαφορά πρόσφυσης ανάμεσα στην δοκιμή του εμπορικού χάλυβα και σε αυτήν του αναγομωμένου δοκιμίου υποδηλώνει ότι, η επιφάνεια του αναγομωμένου δοκιμίου δεν είναι λεία. Τα καρβίδια καθιστούν τραχιά την επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή ο ανταγωνιστής σε σύγκριση με αυτήν του εμπορικού χάλυβα.





Σχήμα 6.10. Φθορά ανταγωνιστικού υλικού σφαίρας Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επαφή με τον αναγομωμένο χάλυβα.

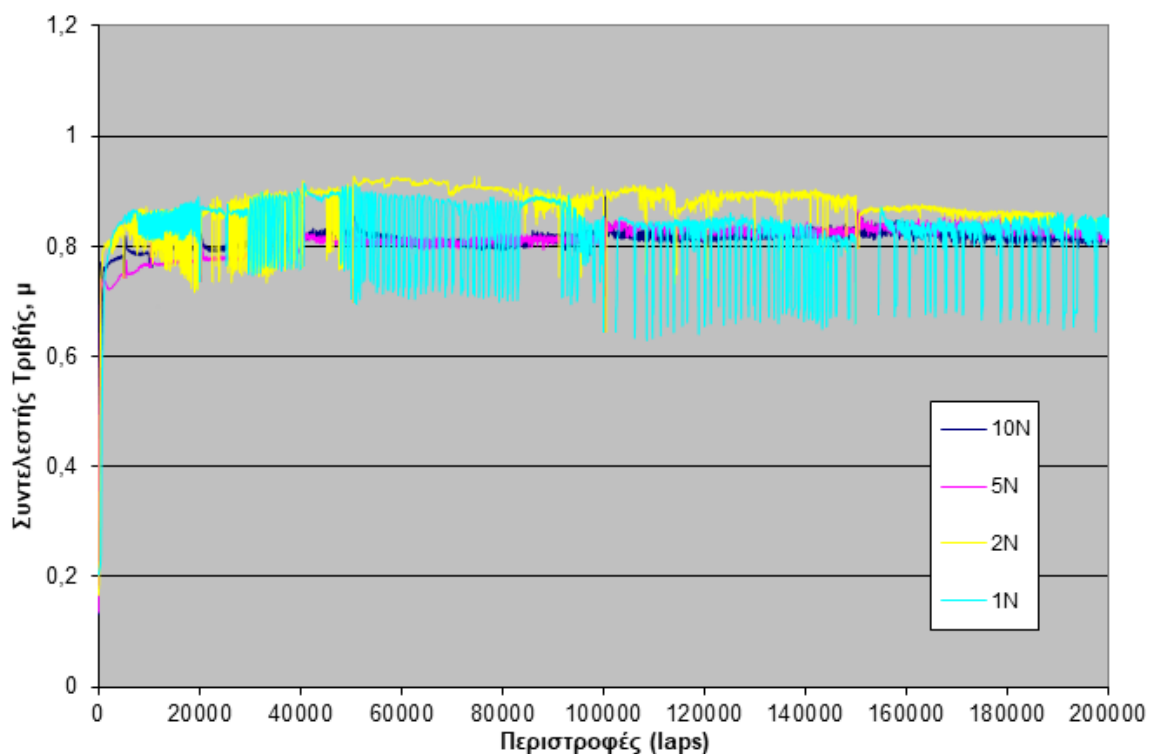


Σχήμα 6.11. Φθορά ανταγωνιστικού υλικού σφαίρας Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε επαφή με εμπορικό αντιτριβικό χάλυβα.

## 6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΡΙΒΗΣ - ΦΘΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ FCAW ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΑΝΤΙΤΡΙΒΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

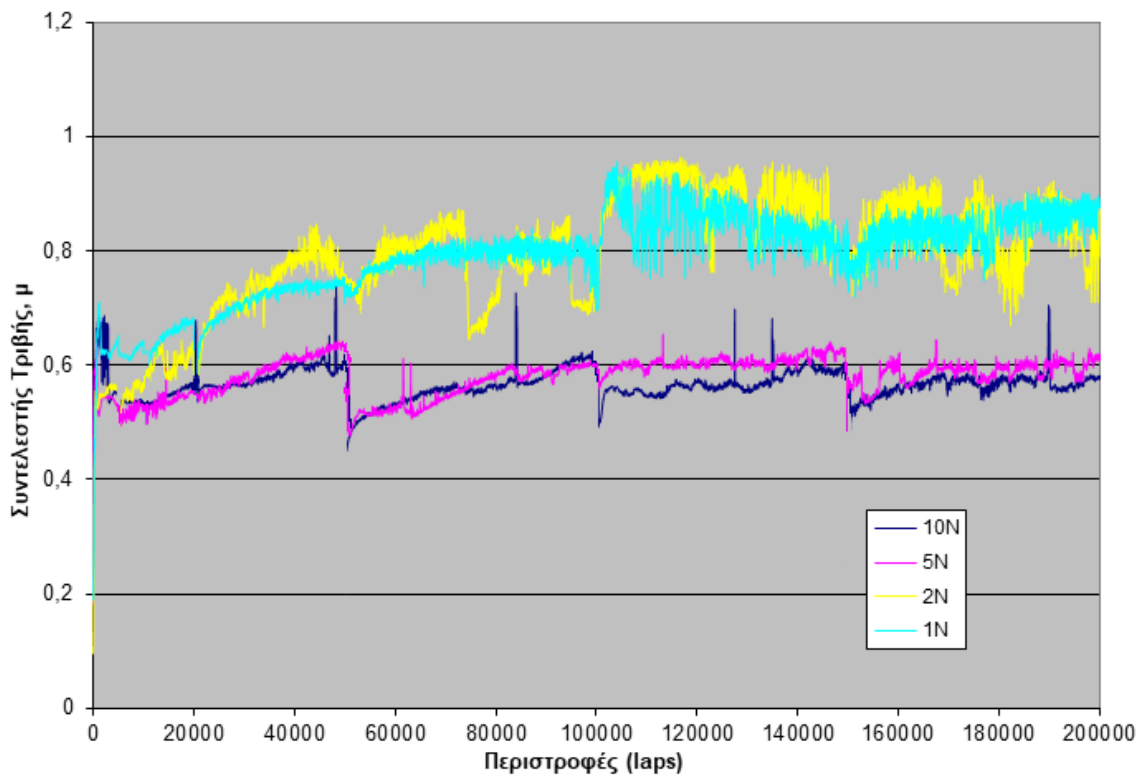
### 6.4.1 ΤΡΙΒΗ – ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ

Έπειτα από επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τα εξής διαγράμματα για τα δύο υλικά και παρατηρείται ότι:



Σχήμα 6.12. Διαγράμματα εξέλιξης του συντελεστή τριβής σε επαφή με την επιγύμωση.

- Στα μικρά φορτία παρατηρούνται έντονες ανομοιομορφίες.
- Στα μεγάλα φορτία ο συντελεστής  $\mu$  είναι μεγαλύτερος, λόγω της αύξησης του φορτίου.
- Ο συντελεστής  $\mu$  είναι σταθερός.



**Σχήμα 6.13.** Διαγράμματα εξέλιξης του συντελεστή τριβής σε επαφή με εμπορικό αντιτριβικό χάλυβα.

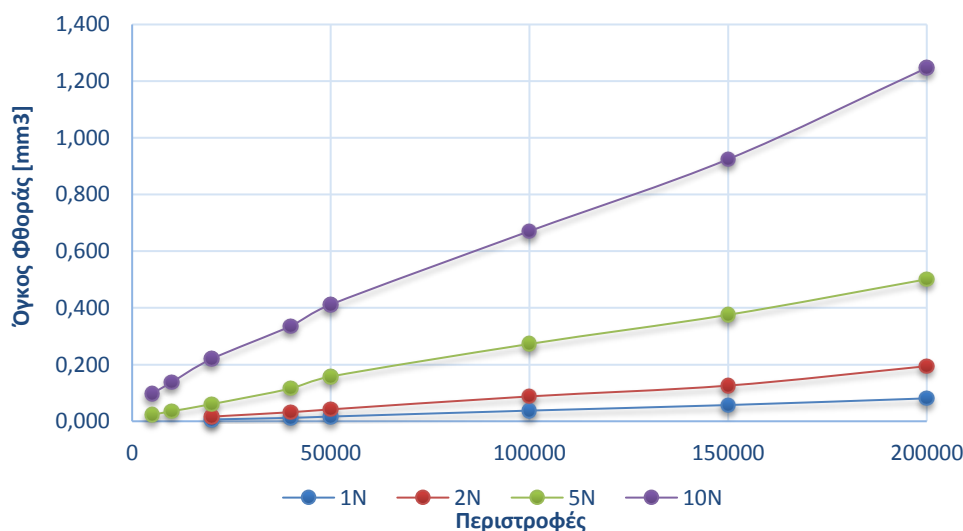
- Με την αύξηση των περιστροφών αυξάνονται οι διακυμάνσεις ειδικά στα μικρά φορτία.
- Στα μικρότερα φορτία ο συντελεστής  $\mu$  είναι μεγαλύτερος.
- Ο συντελεστής  $\mu$  παρουσιάζει μία μικρή σταδιακή αύξηση σε κάθε ένα από τα επιβαλλόμενα φορτία ξεχωριστά.

## 6.4.2 ΦΘΟΡΑ

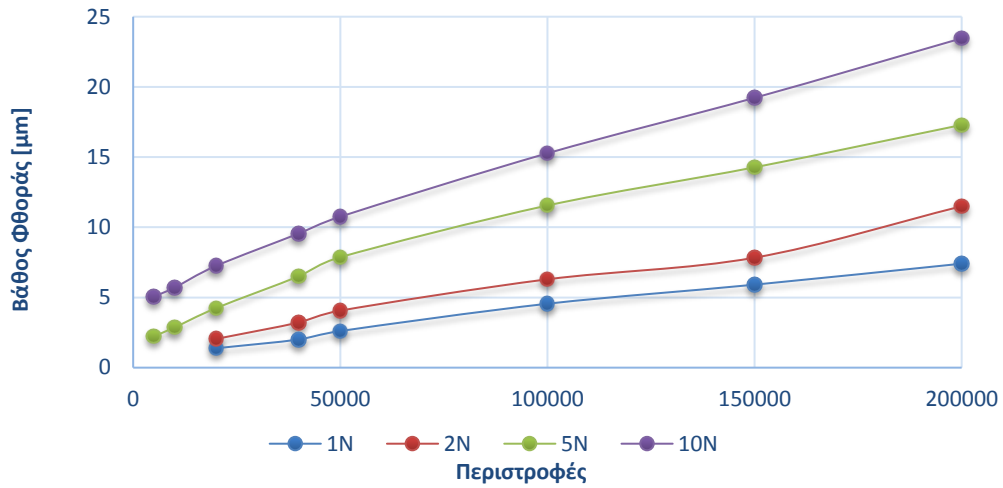
Ως αποτέλεσμα του φαινομένου της τριβής, η φθορά αλλά και οι μεταβλητές της έχουν μεγάλες αποκλίσεις και διαφορές. Με μια πρώτη ματιά και έχοντας τα αποτελέσματα του συντελεστή τριβής για FCAW και hardox διαπιστώνεται ότι τα δυο αυτά υλικά έχουν αποκλίσεις στις μηχανικές ιδιότητες τους αλλά κυρίως στην συμπεριφορά τους ως αντιτριβικά υλικά. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται ουσιαστικά οι διαφορές στα δυο αυτά υλικά.

### FCAW

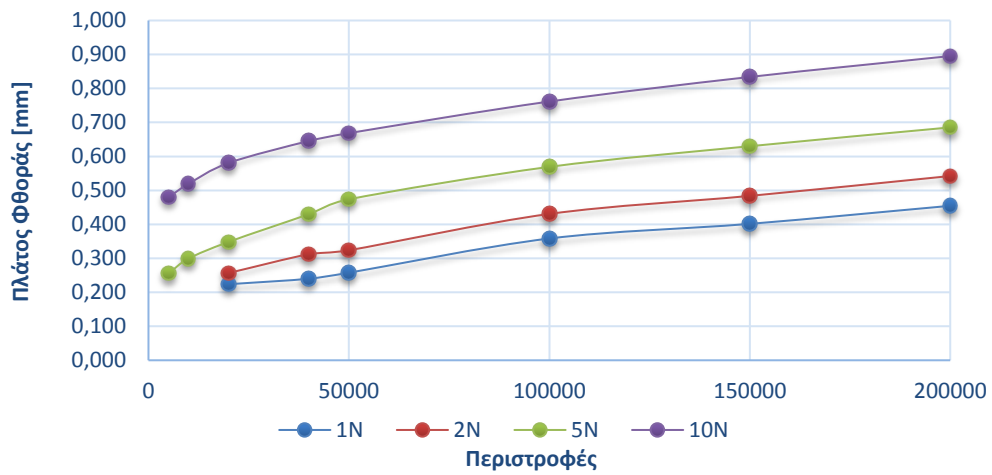
Στο αναγομωμένο δοκίμιο με καρβίδια τιτανίου όπως φαίνεται στα διαγράμματα, με την αύξηση των περιστροφών (Laps) και την αύξηση της διείδυσης του ανταγωνιστή, παράγεται μεγαλύτερος όγκος φθοράς. Το συγκεκριμένο φαινόμενο συμβαίνει σε όλα τα φορτία. Επιπλέον, αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου σημαίνει μεγαλύτερη πίεση του ανταγωνιστή στην επιφάνεια του δοκιμίου το οποίο και μεταφράζεται σε αύξηση του όγκου φθοράς αλλά και άλλων χαρακτηριστικών όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα 6.15 και 6.16 τα οποία αφορούν το βάθος διείδυσης και το πλάτος την επιφάνειας επαφής του ανταγωνιστή με το δοκίμιο.



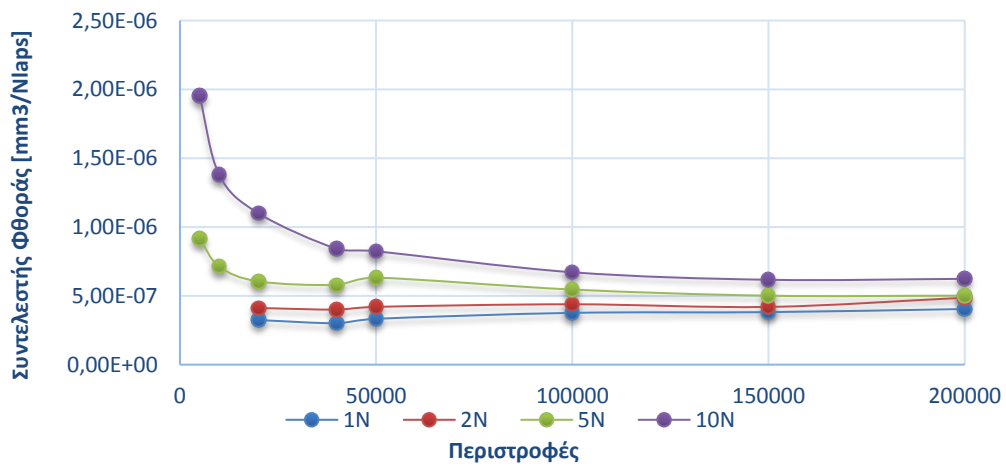
Σχήμα 6.14. Διάγραμμα όγκου φθοράς επιγομώσεων.



Σχήμα 6.15. Διάγραμμα βάθους φθοράς επιγομώσεων.



Σχήμα 6.16. Διάγραμμα πλάτους φθοράς επιγομώσεων.



Σχήμα 6.17. Διάγραμμα συντελεστή φθοράς επιγομώσεων.

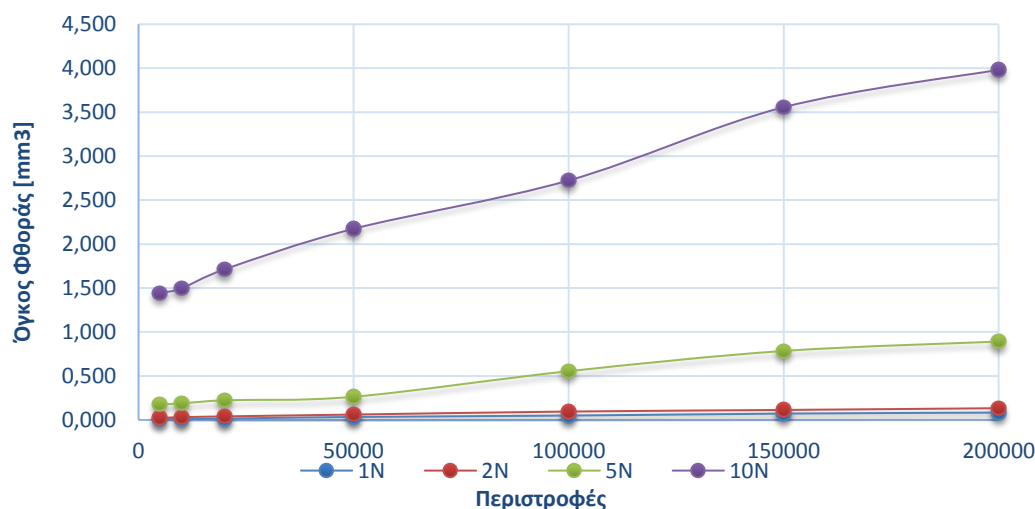
Όσο αφορά τον όγκο φθοράς (Σχήμα 6.14), υπάρχει μια προφανής αναλογική αύξηση του σύμφωνα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Ελάχιστη διαφορά εντοπίζεται ανάμεσα σε 1N και 2N όμως φαίνεται ότι σαν μέγεθος διπλασιάζεται από 0.100mm<sup>3</sup> σε 0.200mm<sup>3</sup> και στην συνέχεια 0.400mm<sup>3</sup> αλλά στην περίπτωση των 10N φτάνει και 1.200 mm<sup>3</sup>

Βάθος διείδυσης και πλάτος αύλακας, ουσιαστικά έχουν τον ίδιο τρόπο με τον οποίο μεταβάλλονται οι καμπύλες από 1N μέχρι και τα 10N. Επίσης, αναλογική μεταβολή και σημαντική παρατήρηση η ύπαρξη της τάσης για σταθεροποίηση της καμπύλης.

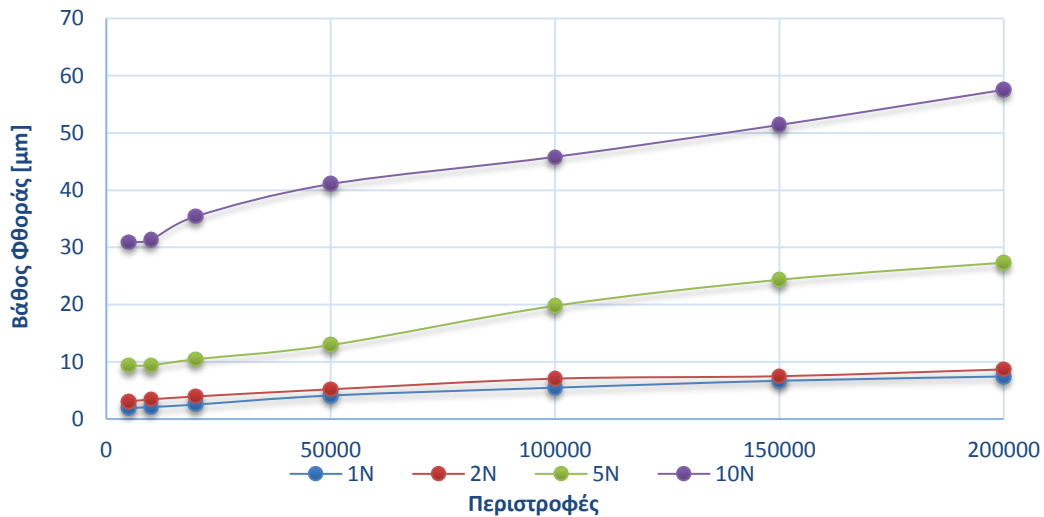
Ο όγκος του αποβαλλόμενου υλικού επέτρεψε τη μέτρηση της γεωμετρίας της αύλακας φθοράς και τον προσδιορισμό του αντίστοιχου συντελεστή όπως προαναφέρθηκε, και από το σχήμα 6.17 φαίνεται ότι ο συντελεστής σταθεροποιείται για όλα τα φορτία και μάλιστα κοντά στις ίδιες τιμές.

## HARDOX

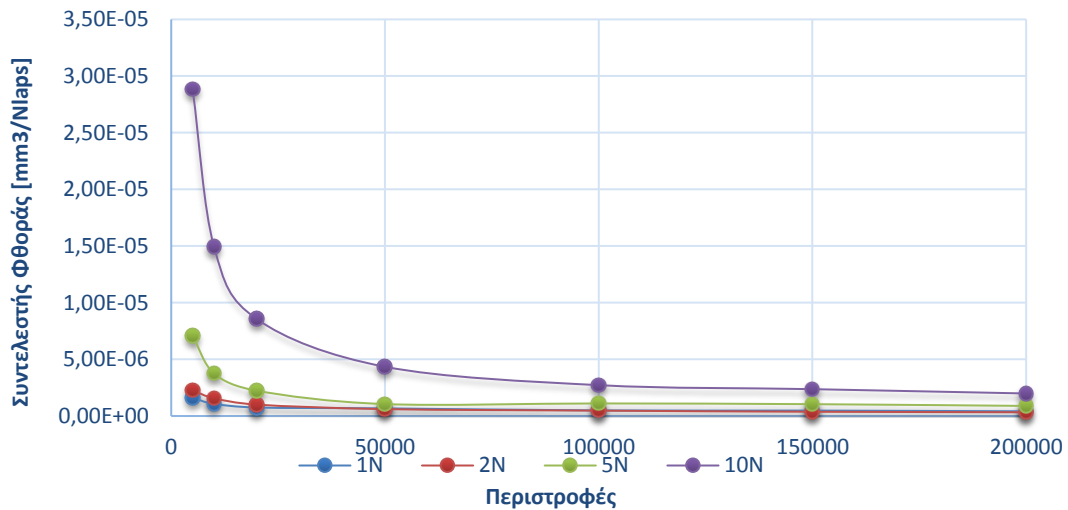
Στην περίπτωση του χάλυβα Hardox πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες για όγκο φθοράς, βάθος διείδυσης και τον συντελεστή φθοράς. Οι σημαντικές διαφορές σε σχέση με το αναγομωμένο δοκίμιο είναι ότι στα 1N και 2N οι καμπύλες και οι τιμές ουσιαστικά ταυτίζονται ενώ στα 5N και 10N οι τιμές αυξάνονται ακαριαία.



Σχήμα 6.18. Διάγραμμα όγκου φθοράς εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα.

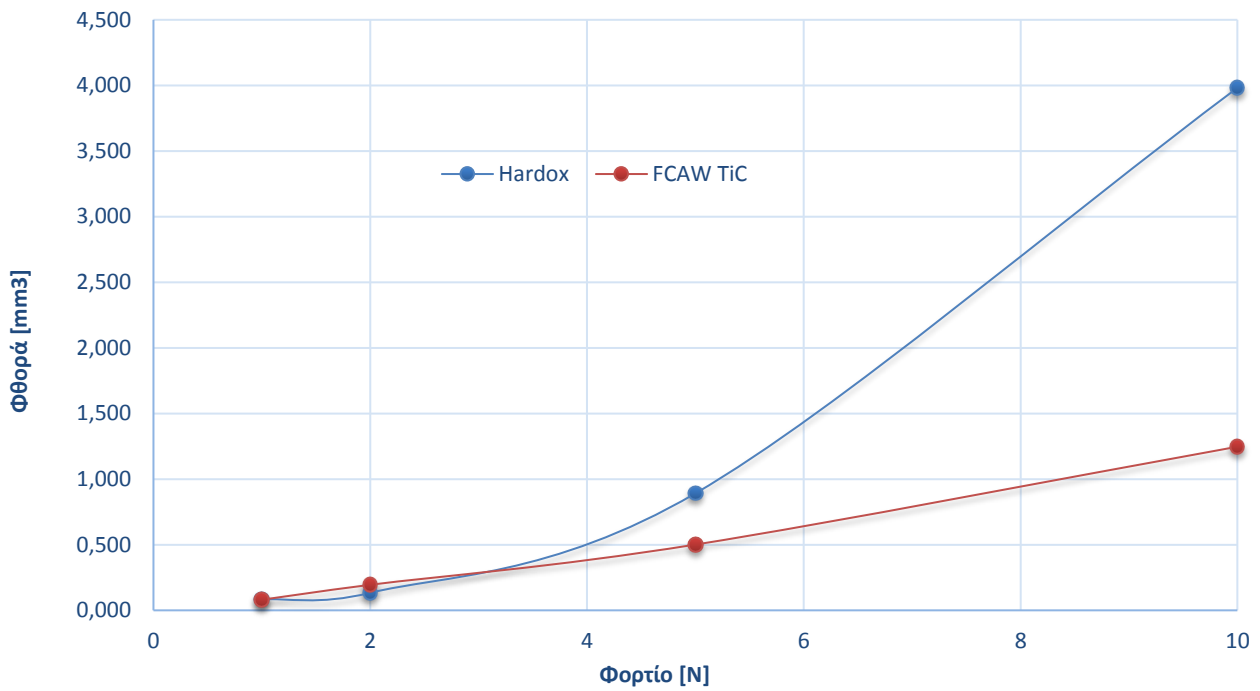


Σχήμα 6.19. Διάγραμμα βάθους φθοράς εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα.

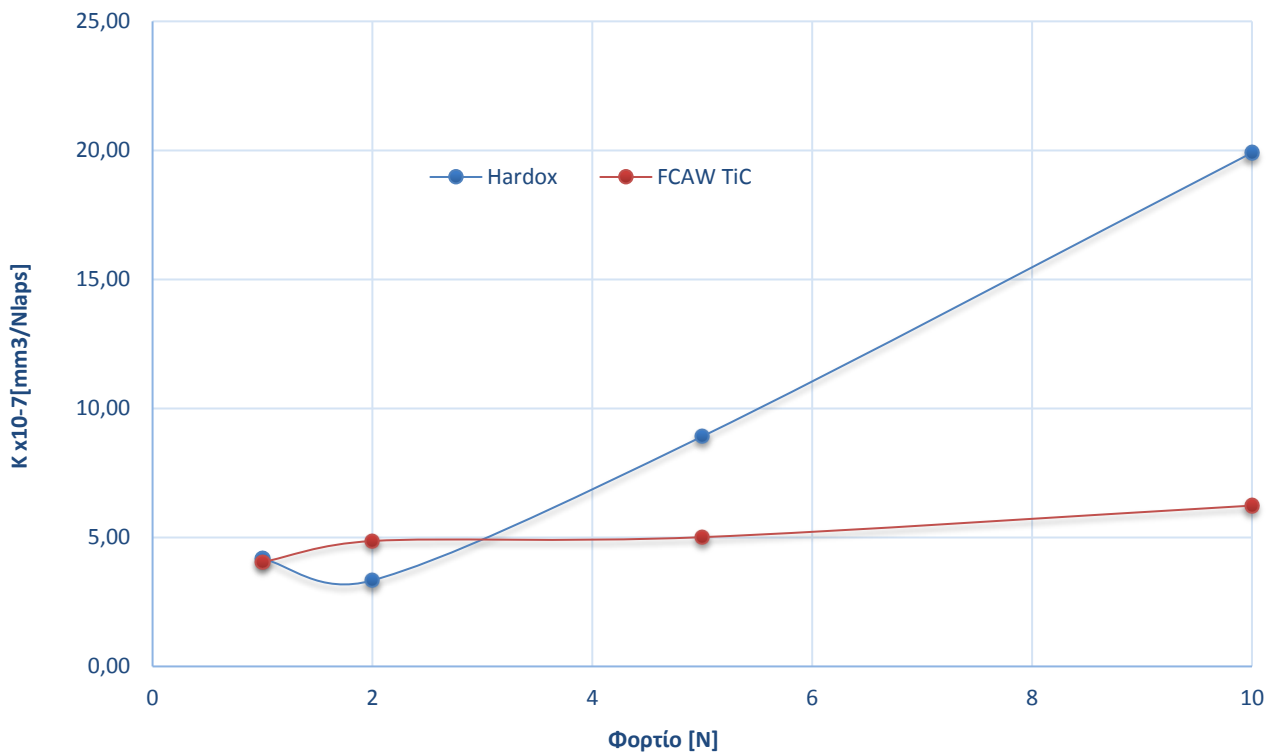


Σχήμα 6.20. Διάγραμμα συντελεστή φθοράς εμπορικού αντιτριβικού χάλυβα.

Στα σχήματα 6.21 και 6.22 φαίνονται συγκριτικά οι διάφορες των δυο δοκιμίων σε όγκο φθοράς και συντελεστή όγκου φθοράς όπου είναι και τα σημαντικά μεγέθη σύγκρισης. Ο αναγομωμένος χάλυβας διακρίνεται για την σχετικά σταθερή του αντοχή σε φθορά καθώς κυμαίνεται από 0,300 mm<sup>3</sup> στα 2N και φτάνει στα 1,300mm<sup>3</sup> στα 10N σε σχέση με τον Hardox που από 0,300 mm<sup>3</sup> στα 2N φτάνει μέχρι και τα 4,00mm<sup>3</sup> στα 10N. Η σταθερότητα του FCAW επιβεβαιώνεται και από τον συντελεστή φθοράς όπου παραμένει σχετικά σταθερός με την εναλλαγή του φορτίου ενώ στον Hardox έχει αναλογική αύξηση.

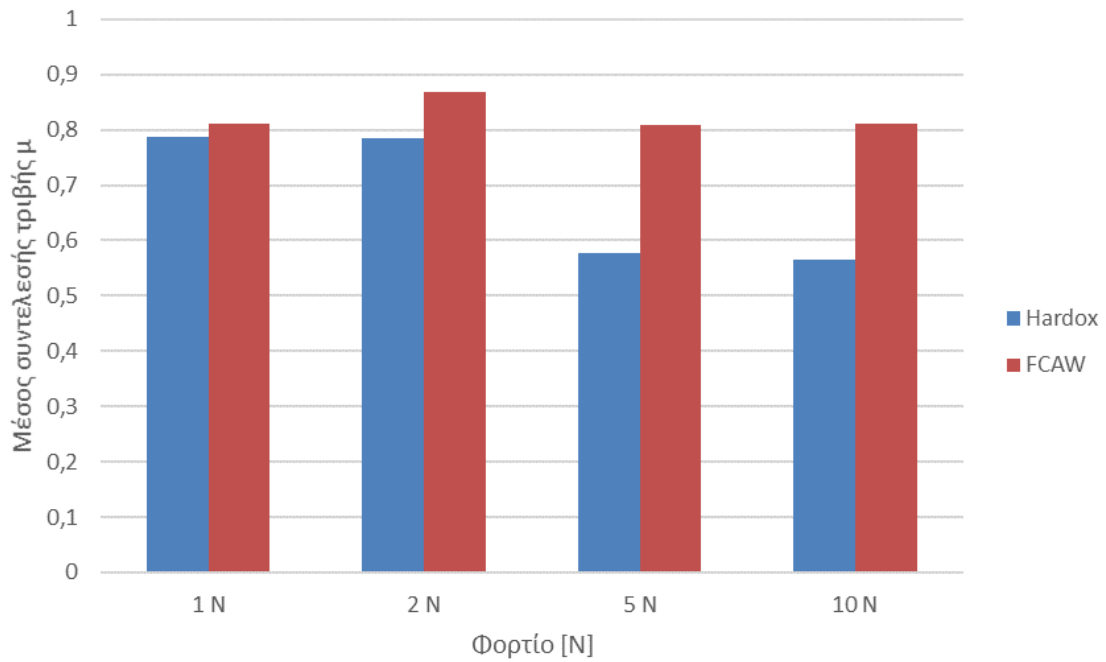


Σχήμα 6.21. Συγκριτικό διάγραμμα φθοράς πειραματικών επιγομώσεων.



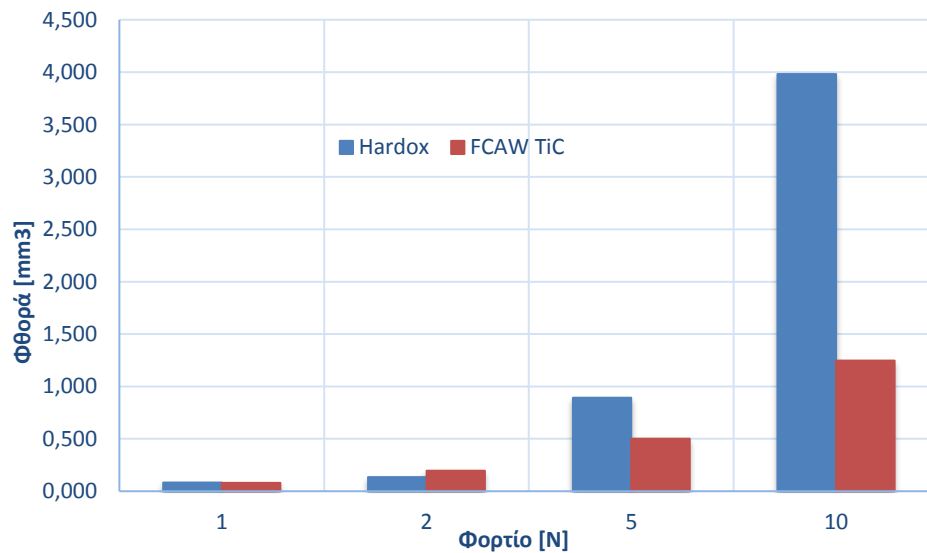
Σχήμα 6.22. Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή φθοράς πειραματικών επιγομώσεων.





**Σχήμα 6.23.** Διάγραμμα σύγκρισης του μέσου συντελεστή τριβής.

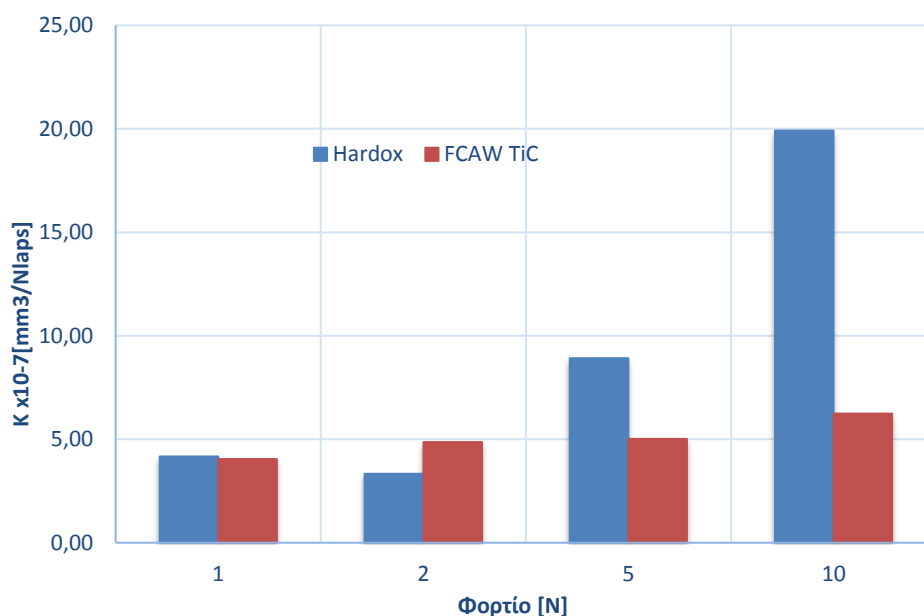
Είναι εμφανές όπως φαίνεται από το διάγραμμα (Σχ. 6.23), ότι ο μέσος συντελεστής τριβής του αναγομωμένου χάλυβα FCAW είναι μεγαλύτερος και πιο σταθερός από εκείνο του Hardox.



**Σχήμα 6.24.** Συγκριτικό διάγραμμα φθοράς πειραματικών επιγομώσεων.

Η φθορά είναι εμφανώς μεγαλύτερη για τον χάλυβα Hardox από εκείνη του αναγομωμένου με τεχνική FCAW (Σχ. 6.24).

Ο συντελεστής φθοράς ( $k$ ) παραμένει σταθερός για τον αναγομωμένο χάλυβα ενώ για τον εμπορικό αυξάνεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχ. 6.22)



**Σχήμα 6.24.** Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή φθοράς πειραματικών επιγομώσεων

Από το (Σχ. 6.24) διακρίνεται ότι ο συντελεστής ( $k$ ) είναι μικρότερος και πιο σταθερός για τον αναγομωμένο χάλυβα με τεχνική FCAW.

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη της μικροδομής και της συμπεριφοράς σε συνθήκες τριβής ολίσθησης δύο διαφορετικών δοκιμίων, η μία είναι ο εμπορικός χάλυβας Hardox και η άλλη είναι η επιγομωμένη επιφάνεια χάλυβα S235 με παραγεμιστό ηλεκτρόδιο με καρβίδιο τιτανίου, που εναποτέθηκε με τεχνική βολταϊκού τόξου στην επιφάνεια του χάλυβα κατασκευής.

Η μεταλλογραφική παρατήρηση των υλικών και η συνεχής καταγραφή του συντελεστή τριβής επέτρεψαν τη συγκριτική αξιολόγησή τους, με κριτήρια την ελαχιστοποίηση ελαττωμάτων μικροδομής και τη μείωση των συντελεστών τριβής και φθοράς. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται παρακάτω:

- Από την μικροσκοπική ανάλυση του αναγομωμένου δοκιμίου, διακρίνονται άτηκτα και σχετικά σφαιρικά καρβίδια. Η κατανομή των καρβιδίων, είναι ομοιόμορφη, όχι μόνο στην επιφάνεια της αναγόμωσης αλλά και στο βάθος αυτής. Οπουδήποτε δηλαδή υπήρξε τήξη του υποστρώματος. Όσο αφορά το μέγεθος των καρβιδίων, κυμαίνεται από 4-5  $\mu\text{m}$ .
- Στην επικάλυψη της αναγόμωσης διακρίνονται κρατήρες και ρωγμές. Οι ασυνέχειες όμως αυτές δεν επηρεάζουν τις μηχανικές και τριβολογικές ιδιότητες του υλικού καθώς η επικάλυψη αυτή αφαιρείται.
- Από μικροσκοπική ανάλυση στον σφαιρικό ανταγωνιστή της τριβολογικής δοκιμής, διακρίνεται το φαινόμενο της πρόσφυσης. Η διαφορά πρόσφυσης ανάμεσα στην δοκιμή του εμπορικού χάλυβα και σε αυτήν του αναγομωμένου δοκιμίου μας δηλώνει ότι, η επιφάνεια του αναγομωμένου δοκιμίου δεν είναι λεία. Τα καρβίδια καθιστούν τραχιά την επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή ο ανταγωνιστής σε σύγκριση με αυτήν του εμπορικού χάλυβα.
- Από την σύγκριση της φθοράς των τριών υλικών μετά την δοκιμή ξηράς εκτριβής, προέκυψε ότι το υλικό με την τεχνική FCAW απέκτησε καλύτερη αντιτριβική συμπεριφορά και φθείρεται πολύ πιο δύσκολα απ' ότι τα άλλα δύο όπως φαίνονται στο διάγραμμα (Σχήμα 6.4).

- Ο συντελεστής τριβής παρατηρείται να είναι σταθερός στην περίπτωση της αναγομωμένης επιφάνειας αλλά και υψηλότερος από αυτής του εμπορικού χάλυβα. Το γεγονός αυτό δηλώνει ότι στα μεγαλύτερα φορτία απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να φθαρεί η αναγόμωση. Ενώ λοιπόν είναι αναμενόμενο το φορτίο να επηρεάζει αναλογικά τον συντελεστή τριβής, παρατηρείται ότι τα καρβίδια έχουν αποδώσει σταθερές αντιτριβικές ιδιότητες στο δοκίμιο, εξαιτίας και της ομοιόμορφης κατανομής τους στο υπόστρωμα.
- Όπως φαίνεται στα διαγράμματα φθοράς, με την αύξηση των περιστροφών (Laps) παράγεται μεγαλύτερος όγκος φθοράς και αυξάνεται η διείδυση του ανταγωνιστή. Το συγκεκριμένο φαινόμενο συμβαίνει για όλα τα φορτία. Η φθορά αυξάνεται αναλογικά και στην περίπτωση του αναγομωμένου χάλυβα αλλά και του εμπορικού χάλυβα Hardox όπως φαίνεται στο διαγράμμα (Σχήμα 6.17). Η φθορά είναι εμφανώς μεγαλύτερη για τον χάλυβα Hardox από εκείνη του αναγομωμένου με τεχνική FCAW (Σχήμα 6.20).
- Ο συντελεστής φθοράς ( $k$ ) παραμένει σταθερός για τον αναγομωμένο χάλυβα ενώ για τον εμπορικό Hardox αυξάνεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχήμα 6.18). Από το (Σχήμα 6.21) διακρίνεται ότι ο συντελεστής ( $k$ ) είναι μικρότερος και πιο σταθερός για τον αναγομωμένο χάλυβα FCAW.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Θ.Α. Διαμαντούδης (2000). Συγκολλήσεις Μετάλλων, Εκδόσεις Θ.Α. Διαμαντούδης.
2. Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος (2010). Εισαγωγή στις συγκολλήσεις, Εκδόσεις Τζιόλα.
3. Dashuang Liu, Renpei Liu, Yanhong Wei, “Surface & Coatings Technology: Effects of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire”, *Surface & Coatings Technology*, **207**, (2012), 579-586
4. S. Chatterjee, T.K. Pal, “Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron”, *Wear*, **255**, (2003), 417-425
5. Xinhong Wang, Min Zhang, Shiyao “Optics and Lasers in Engineering: Development and characterization of (Ti, Mo) C carbides reinforced Fe-based surface composite coating produced by laser cladding”, *Optics and Lasers in Engineering*, **48**, (2010), 893–898, 2010
6. X.D. Hui, Y.S. Yang, “Fabricating TiC particulate reinforced Fe-Cr-Ni matrix composites by a liquid state in-situ synthesis” *J. Mater. Sci. Lett*, **19**, (2000) 1281-1283.
7. Dequiang Chen, Dong Liu, Yuanfu Liu, Huaming Wang, Zheng Huang, “Microstructure and fretting wear resistance of  $\gamma$ /TiC composite coating in situ fabricated by plasma transferred arc cladding”, *Surface & Coatings Technology*, **239**, (2014), 28-33.
8. Q.G. Hou, Y.Z. He, J.S. Gao, “Microstructure and properties of Fe–C–Cr–Cu coating deposited by plasma transferred arc process”, *Surf. Coat. Technol.* **201**, (2006), 3685-3690.
9. Y.F. Liu, Z.Y. Xia, J.M. Han, G.L. Zhang, S.Z. Yang, “Microstructure and wear behavior of (Cr,Fe) 7C3 reinforced composite coating produced by plasma transferred arc weld-surfacing process”, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, (2006), 863-867.
10. S. Economou, M. De Bonte, J.P. Celis, R.W. Smith, E. Lugscheider, “Processing, structure and tribological behaviour of TiC-reinforced plasma sprayed coatings” *Wear* **220**, (1998), 34-50.

11. X.H. Wang, Z.D. Zou, S.Y. Qu, S.L. Song, “Microstructure and wear properties of Fe-based hardfacing coating reinforced by TiC particles”, *Journal of Materials Processing Technology*, **168**, (2005), 89-94.
12. T. Chandra, N. Wanderka, W. Reimers, M. Ionescu, “ASTM G99-04: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus”, *Materials Science Forum*”, **638-642**, (2009) 2446-2451.
13. ISO 28080 (2011), Hardmetals - Abrasion tests for hardmetals.
14. Ερμάλ Τ. Τουκάι (2014). Κατασκευή πειραματικής συσκευής ξηρής εκτριβής, Εκδόσεις Τ.Ε.Ι. Πειραιά.
15. ASTM G 65-00 (2001), Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
16. ASTM D 2240-05 (2010), Test method for rubber property – durometer hardness.
17. ASTM G 105-02, (2002). Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests, ASTM International.
18. EN 10025. Hot rolled products of structural steels