



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**“ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ**  
**ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**  
**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΤΟΞΟΥ ΚΑΙ**  
**ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ LASER - ΤΟΞΟΥ”**

---

**ΜΠΑΚΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δ.Ι. ΠΑΝΤΕΛΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2015**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί έχει τίτλο : «Μελέτη της Μικροδομής και της Συμπεριφοράς σε διάβρωση Συγκολλήσεων Τόξου και Υβριδικών Συγκολλήσεων Laser Τόξου» και εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ .

Με την ολοκλήρωσή της θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παντελή Δ. , Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών , για την ανάθεση αυτού του ενδιαφέροντος θέματος και τη βοήθειά του σε ό,τι χρειάστηκα κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κ. Τσιούρβα Θ. , Χημικό Μηχανικό και μέλος του επιστημονικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας , για την πολύτιμη βοήθειά της και την καθοδήγησή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης , θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βοσνιάκο Γ.Χ. , Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών , για τη δυνατότητα που μας περείχε να γίνει χρήση του εξοπλισμού τρισδιάστατης σάρωσης (structured white light 3D scanner) του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών καθώς και τον κ. Τύρη Δ. , μεταπτυχιακό φοιτητή , για τις δοκιμές που πραγματοποίησε.

Τέλος , ευχαριστώ θερμά όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας και ιδιαίτερα τον κ. Ξάνθη Χ. για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.



## Περιεχόμενα

|             | Σελ. |
|-------------|------|
| Πρόλογος    | iii  |
| Περιεχόμενα | v    |
| Εισαγωγή    | ix   |
| Abstract    | xi   |

## A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Συγκολλήσεις μεταλλικών υλικών</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.1 Εισαγωγή</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.2 Τύποι σύνδεσης</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.3 Σύγχρονες μέθοδοι συγκόλλησης</b>  | <b>4</b>  |
| 1.3.1 Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (Gas Metal Arc Welding – GMAW) | 5         |
| 1.3.2 Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding - FCAW)     | 22        |
| 1.3.3 Συγκόλληση με Laser   | 34        |
| <b>2 Υβριδική συγκόλληση laser – τόξου</b>  | <b>47</b> |
| <b>2.1 Εισαγωγή</b>   | <b>47</b> |
| <b>2.2 Βασικές διατάξεις</b>  | <b>48</b> |
| <b>2.3 Νεότερες , μη συμβατικές διατάξεις υβριδικής συγκόλλησης</b>                         | <b>52</b> |
| 2.3.1 Διατάξεις με περισσότερες από δύο πηγές θερμότητας                                    | 52        |
| 2.3.2 Μέθοδος συγκόλλησης Tandem MIG/MAG  | 54        |
| <b>2.4 Μορφή της υβριδικής συγκόλλησης laser – τόξου</b>                                    | <b>57</b> |
| <b>2.5 Αέρια προστασίας</b>   | <b>59</b> |
| 2.5.1 Εισαγωγή  | 59        |



|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.5.2      | Συνήθη αέρια προστασίας και ιδιότητές τους                                      | 60        |
| 2.5.3      | Αδρανή αέρια  | 62        |
| 2.5.4      | Ενεργά αέρια  | 64        |
| 2.5.5      | Υδρογόνο και άζωτο  | 64        |
| 2.6        | Πλεονεκτήματα της μεθόδου HLAW  | 65        |
| 2.7        | Τυπικά σφάλματα υβριδικών συγκολλήσεων  | 66        |
| <b>3</b>   | <b>Διάβρωση συγκολλήσεων χάλυβα</b>   | <b>67</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Χάλυβες</b>  | <b>67</b> |
| 3.1.1      | Εισαγωγή  | 67        |
| 3.1.2      | Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες  | 67        |
| 3.1.3      | Κραματωμένοι χάλυβες  | 68        |
| <b>3.2</b> | <b>Διάβρωση συγκολλήσεων ανθρακούχων και κραματωμένων χαλύβων</b>               | <b>69</b> |
| 3.2.1      | Εισαγωγή  | 69        |
| 3.2.2      | Η επίδραση της μικροδομής της συγκόλλησης                                       | 69        |
| 3.2.3      | Η επίδραση της χημικής σύστασης του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης | 69        |
| 3.2.4      | Παραμένουσες τάσεις   | 70        |
| 3.2.5      | Επιλεκτική διάβρωση της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)                        | 70        |
| 3.2.6      | Επιλεκτική διάβρωση του μετάλλου συγκόλλησης                                    | 72        |
| 3.2.7      | Τύποι διάβρωσης συγκολλήσεων χάλυβα   | 73        |
| 3.2.8      | Προστασία των συγκολλήσεων από διάβρωση   | 78        |
| <b>B.</b>  | <b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>  |           |
| <b>4</b>   | <b>Πειραματική διαδικασία</b>   | <b>81</b> |
| 4.1        | Εισαγωγή  | 81        |
| 4.2        | Υλικό – Χάλυβας υψηλής αντοχής AH36   | 81        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| 4.2.1      | Χρήση χάλυβα AH36  | 84         |
| <b>4.3</b> | <b>Συγκολλήσεις</b>  | <b>86</b>  |
| <b>4.4</b> | <b>Χημική προσβολή και οπτική μικροσκοπία</b>  | <b>89</b>  |
| <b>4.5</b> | <b>Μικροσκληρότητα</b>   | <b>91</b>  |
| <b>4.6</b> | <b>Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy - SEM)</b>                                  | <b>94</b>  |
| <b>4.7</b> | <b>Κλιματικός θάλαμος – θάλαμος αλατονέφωσης</b>   | <b>96</b>  |
| 4.7.1      | Δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης  | 96         |
| 4.7.1.1    | Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες   | 97         |
| 4.7.1.2    | Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες   | 97         |
| 4.7.2      | Τεχνικά χαρακτηριστικά του θαλάμου   | 100        |
| 4.7.3      | Πρότυπη δοκιμή κατά ISO 14993:2001   | 101        |
| 4.7.4      | Προετοιμασία και σήμανση δοκιμών   | 102        |
| 4.7.5      | Διαδικασία τοποθέτησης – απομάκρυνσης δοκιμών από το θάλαμο αλατονέφωσης (Planned Interval Test)             | 103        |
| 4.7.6      | Υπολογισμός απώλειας μάζας, ρυθμού διάβρωσης   | 104        |
| 4.7.7      | Οργάνωση προγράμματος έκθεσης δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο  | 105        |
| <b>4.8</b> | <b>Τρισδιάστατη σάρωση αντικειμένου με χρήση λευκού δομημένου φωτός (structured white light 3D scanning)</b> | <b>110</b> |
| <b>5</b>   | <b>Αποτελέσματα - Συζήτηση</b>   | <b>113</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Εισαγωγή</b>  | <b>113</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Μεταλλογραφική μελέτη δοκιμών</b>   | <b>113</b> |
| 5.2.1      | Συγκόλληση τύπου FCAW  | 114        |
| 5.2.2      | Υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem   | 117        |
| <b>5.3</b> | <b>Μικροσκληρομετρήσεις</b>  | <b>123</b> |
| 5.3.1      | Συγκόλληση τύπου FCAW  | 123        |
| 5.3.2      | Υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem   | 124        |
| <b>5.4</b> | <b>Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης</b>  | <b>126</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.4.1    | Μακροσκοπικές παρατηρήσεις  | 126        |
| 5.4.1.1  | Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετάλλου βάσης μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο                             | 127        |
| 5.4.1.2  | Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετάλλου βάσης μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης                        | 130        |
| 5.4.1.3  | Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών με συγκόλληση μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο                              | 133        |
| 5.4.1.4  | Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών με συγκόλληση μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης                         | 138        |
| 5.4.2    | Μετρήσεις απώλειας βάρους   | 144        |
| 5.4.3    | Σύγκριση επιφανειών δοκιμών μετά από σάρωσή τους μέσω της μεθόδου λευκού δομημένου φωτός (structured white light 3D scanning) | 156        |
| <b>6</b> | <b>Συμπεράσματα</b>   | <b>159</b> |
|          | <b>Βιβλιογραφία</b>   | <b>161</b> |
|          | <b>Παραρτήματα</b>  | <b>163</b> |

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η συμπεριφορά σε διάβρωση του χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 και συγκολλήσεων του μετά από έκθεση δοκιμίων σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης. Μελετήθηκαν δύο ειδών συγκολλήσεις : υβριδική συγκόλληση laser-τόξου (συγκεκριμένα laser-MAG+tandem) και συγκόλληση τόξου με σωληνοειδές ηλεκτρόδιο , καθώς και δοκίμια μετάλλου βάσης.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη : θεωρητικό και πειραματικό. Στο θεωρητικό μέρος παρατίθενται διεξοδικά πληροφορίες για τις συγκολλήσεις τήξης που χρησιμοποιήθηκαν στα υπό μελέτη δοκίμια (LBW,GMAW,FCAW) και για την υβριδική συγκόλληση laser-τόξου και τη μέθοδο Tandem MIG/MAG. Επίσης εμπεριέχεται κεφάλαιο σχετικά με τις μορφές διάβρωσης των συγκολλήσεων ανθρακούχων και κραματωμένων χαλύβων και τους τρόπους προστασίας αυτών. Στο πειραματικό μέρος περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε : έκθεση των δοκιμίων σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης , μετρήσεις απώλειας βάρους και υπολογισμός ρυθμού διάβρωσης , μικροσκληρομετρήσεις καθώς και οπτική μικροσκοπία. Επίσης, έγινε μια προσπάθεια ψηφιακής αποτύπωσης της επιφάνειας διαβρωμένου δοκιμίου και σύγκρισής της με επιφάνεια δοκιμίου πριν από έκθεσή του στο περιβάλλον διάβρωσης , μέσω τρισδιάστατης σάρωσης με χρήση λευκού δομημένου φωτός. Στη συνέχεια ,παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων καθώς και η ανάλυση και επεξεργασία τους.

Τέλος , παρατίθενται τα ουσιαστικότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.



## **ABSTRACT**

Corrosion behaviour of high tensile strength steel AH36 specimens and its weldments, after exposure of several specimens to accelerated aging conditions, was studied within the present thesis. There were examined two different types of weldments : produced by Hybrid Laser-Arc Welding (specifically Hybrid Laser-MAG+Tandem Welding) and by FCAW , as well as specimens of parent metal.

The thesis consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part includes detailed information on the following fusion welding processes: GMAW, LBW, FCAW and HLAW. In addition a detailed reference on Tandem MIG/MAG Welding is included as well as a chapter referring to forms of weld corrosion and practices to minimize it. The experimental part includes a detailed description of the experimental procedure that was followed: exposure of specimens to accelerated aging conditions, weight loss measurements and calculation of corrosion rate, microhardness tests and optical microscopy. Furthermore, it was attempted to measure the three-dimensional shape of a corroded specimen's surface and compare it with the surface of a non-corroded one, by using a structured white light 3D scanner. Subsequently, all experimental results are presented and analyzed.

Finally, substantial conclusions which have arisen through the entire course of this research are notated.



## Κεφάλαιο 1 : Συγκολλήσεις μεταλλικών υλικών

### 1.1 Εισαγωγή

Ο σύγχρονος κόσμος δε θα είχε την τεχνολογική ανάπτυξη που όλοι γνωρίζουμε, αν δεν υπήρχαν οι συγκολλήσεις, με τις οποίες πραγματοποιούμε μεγάλες και σύνθετες κατασκευές συνδέοντας μεταξύ τους μικρότερα μέρη. Σε όλες τις συνιστώσες της ανθρώπινης τεχνολογικής δραστηριότητας οι συγκολλήσεις αποτελούν βασικό τμήμα, ως κατεργασία σύνδεσης, συναρμολόγησης και γενικότερα ανέγερσης κατασκευών. Με τη χρήση συγκόλλησης μπορούμε να φτάσουμε στο 100% της αντοχής του μετάλλου βάσης, να εξασφαλίσουμε πλήρη στεγανότητα της σύνδεσης, ενώ δεν υπάρχει κανένας περιορισμός πάχους στα υπό σύνδεση ελάσματα. Μέσω της συγκόλλησης μεταφέρονται τα φορτία από το ένα μέλος της κατασκευής στο άλλο.

Διακρίνονται πέντε μεγάλες κατηγορίες μεθόδων ένωσης μετάλλων :

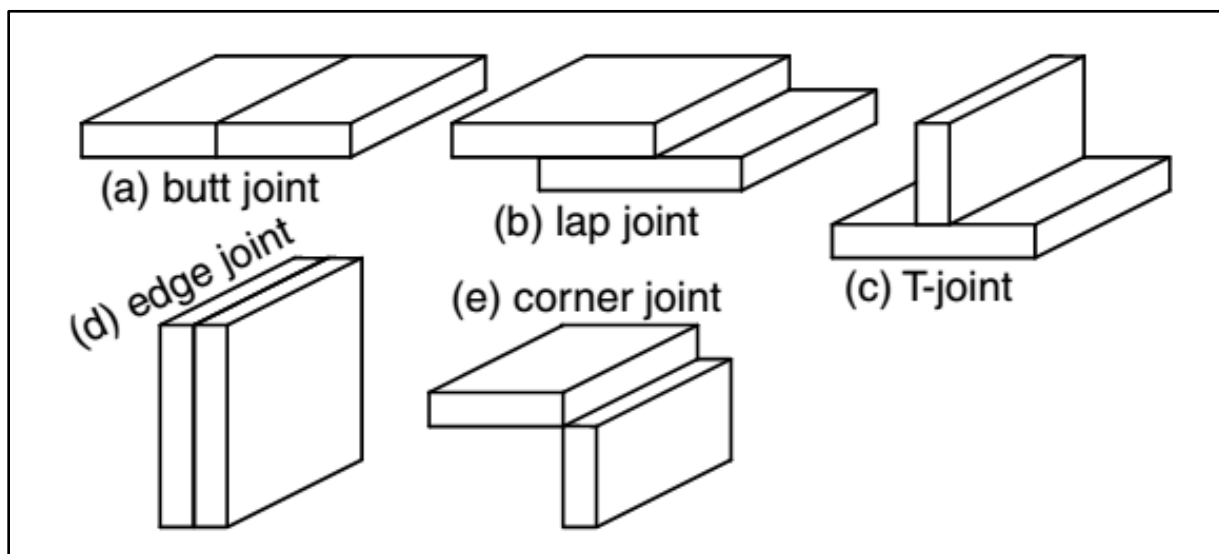
- α. **Συγκόλληση με τήξη (fusion welding)**, όπου προσδίδεται θερμότητα στα υπό ένωση μέταλλα μέχρι να συμβεί σύντηξη. Δεν απαιτείται η εφαρμογή εξωτερικής πίεσης.
- β. **Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (electric – resistance welding)**, όπου πρώτα προσδίδεται θερμότητα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος που περνάει από τα υπό ένωση μέταλλα (φαινόμενο Joule) και στη συνέχεια εφαρμόζεται εξωτερική πίεση.
- γ. **Συγκόλληση σε στερεά φάση (solid – phase welding)**, όπου εφαρμόζεται εξωτερική πίεση χωρίς προηγούμενη τήξη των υπό συγκόλληση μετάλλων, εκτός από ένα πολύ λεπτό στρώμα κοντά στις επιφάνειες συγκόλλησης.
- δ. **Ετερογενής συγκόλληση ή ένωση σε υγρή – στερεή φάση (liquid – solid phase joining)**, όπου τα υπό ένωση μέταλλα θερμαίνονται μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία μικρότερη του σημείου τήξης τους και συγχρόνως προστίθεται διαφορετικό μέταλλο (χαμηλότερου σημείου τήξης) σε υγρή κατάσταση, έτσι ώστε μετά την απόψυξη να δημιουργηθεί η ένωση σε στερεή κατάσταση.
- ε. **Ένωση με κόλλα (adhesive bonding)**, όπου οι ενώσεις δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα της μοριακής έλξης μεταξύ των προς ένωση επιφανειών και της κόλλας.

### 1.2 Τύποι σύνδεσης [7][8][13]

Οι συγκολλήσεις τήξεως (fusion welding) είναι κατεργασίες μέσω των οποίων επιτυγχάνεται συνεχής σύνδεση δύο μεταλλικών στοιχείων, μέσω της τήξης τους από κάποια πηγή θερμότητας, με ή χωρίς τη χρήση πρόσθετου υλικού (filler). Οι βασικοί τύποι σύνδεσης ( joint types ) μεταξύ δύο μελών είναι οι εξής πέντε (Σχ.1.1) :

- A. **Σύνδεση κατά συμβολή (butt joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο μελών που κείνται περίπου στο ίδιο επίπεδο.
- B. **Γωνιακή σύνδεση (corner joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο μελών που κείνται περίπου κάθετα μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν γωνία περίπου 90°.
- Γ. **Σύνδεση T (tee joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο μελών που κείνται περίπου κάθετα μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν το γράμμα ταυ.
- Δ. **Σύνδεση με επικάλυψη (lap joint)**, η σύνδεση μεταξύ δύο επικαλυπτόμενων μελών.
- E. **Σύνδεση κατά ακμή (edge joint)**, η σύνδεση μεταξύ των ακμών δύο ή περισσότερων παράλληλων ή περίπου παράλληλων μελών.





Σχήμα 1.1 : Βασικοί τύποι σύνδεσης μεταξύ δύο μελών.[13]

Κάθε ένας από τους παραπάνω τύπους σύνδεσης μπορεί να γίνει με διάφορους τύπους συγκόλλησης (weld types) ή με συνδυασμό αυτών. Ακολουθούν οι βασικότεροι τύποι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική.

#### A. Συγκόλληση κατά συμβολή (Butt weld)

- 1) **Κλειστή συμβολή** (closed butt or square groove weld) : οι ακμές των υπό συγκόλληση ελασμάτων , χωρίς καμία διαμόρφωση , έρχονται σε επαφή. Η συγκόλληση γίνεται από τη μια ή και τις δύο πλευρές.
- 2) **Ανοικτή συμβολή** (open square butt or open square groove weld) : απομακρύνονται λίγο οι ακμές των ελασμάτων ώστε να δημιουργηθεί ένα κενό μεταξύ τους. Σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη ή μη επιθυμητή η αμφίπλευρη συγκόλληση , είναι δυνατόν να γίνει συγκόλληση πλήρους διείδυσης των ελασμάτων από τη μια μόνο πλευρά με τη βοήθεια της επικαλύπτρας (σχήμα 1.3).
- 3) **Τύπου V** (single V and single bevel groove): σε μεγαλύτερα πάχη ελασμάτων συγκόλληση πλήρους διείδυσης μπορεί να γίνει μόνο με κατάλληλη διαμόρφωση των ακμών των προς συγκόλληση ελασμάτων. Η συνηθέστερη τέτοια διαμόρφωση είναι η V με τις διάφορες παραλλαγές της.
- 4) **Τύπου X** ( double V and double bevel groove): σε πολύ παχιά ελάσματα η διαμόρφωση τύπου V απαιτεί μεγάλες ποσότητες προστιθέμενου μετάλλου, ενώ η συγκόλληση από τη μια μόνο πλευρά δημιουργεί μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών χρησιμοποιείται η συγκόλληση τύπου X , με την οποία μπορούν να συγκολληθούν ελάσματα απεριόριστου πάχους.
- 5) **Τύπου J** (single J and double J groove): ο συγκεκριμένος τύπος συγκόλλησης είναι παραλλαγή της  $\frac{1}{2}$  V και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ελάσματα κάθε πάχους.

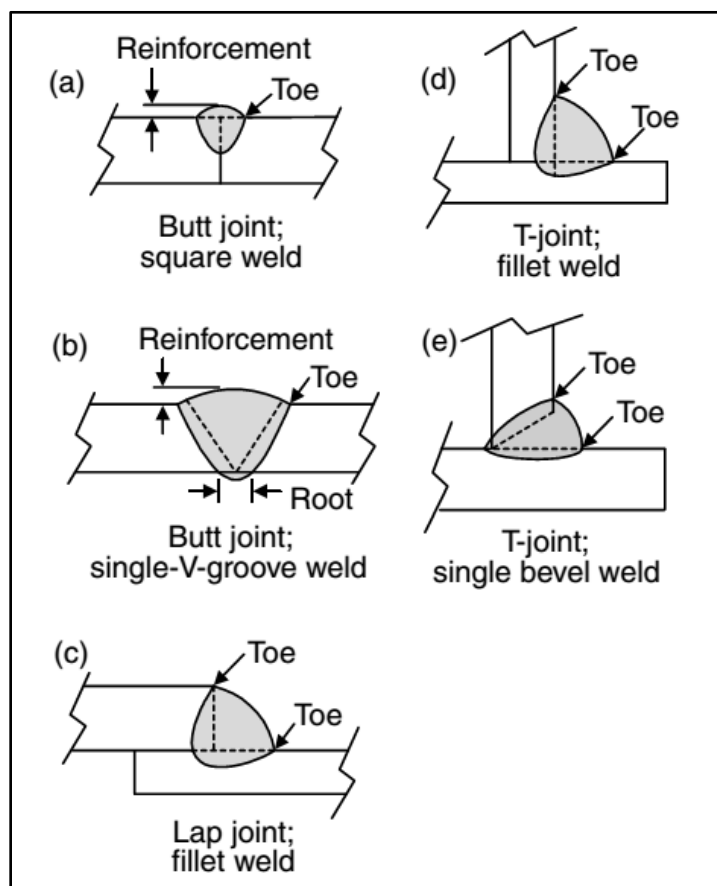
- 6) **Τύπου U** (single U and double U groove): οι ακμές του αυχένα των ελασμάτων έρχονται σε τέλεια επαφή. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ελάσματα πάχους πάνω από 20mm. Η αμφίπλευρη U χρησιμοποιείται για την αποφυγή μεγάλων παραμορφώσεων.

## Β. Αυχενική συγκόλληση (Fillet weld)

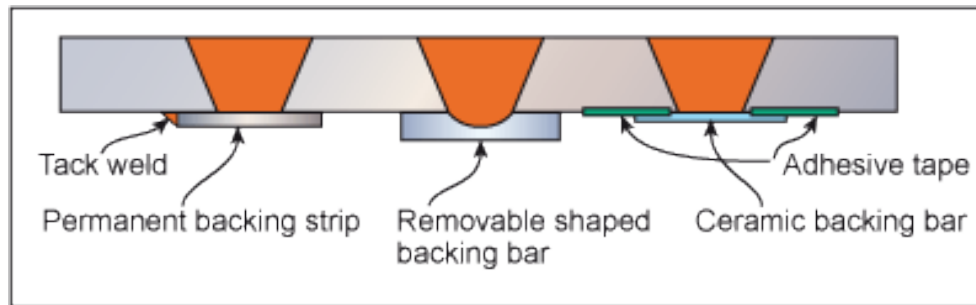
Είναι ο συνηθέστερος τύπος συγκόλλησης που εφαρμόζεται στη ναυπηγική. Θεωρητικά, η γωνία που σχηματίζει το μέταλλο συγκόλλησης με κάθε έλασμα είναι  $45^\circ$ . Δεν απαιτείται ιδιαίτερη προπαρασκευή των ακμών εκτός από εξαιρετικές περιπτώσεις που η συγκόλληση δεν πρέπει να προεξέχει. Ακόμη, δεν απαιτείται η ύπαρξη διάκενου μεταξύ των προς συγκόλληση ελασμάτων.

## Γ. Συγκόλληση με επικάλυψη (Lap welded joint)

Ο τύπος αυτός συγκόλλησης είναι υπόλειμμα της μεθόδου ήλωσης με επικάλυψη και αρμοκαλύπτες. Σήμερα χρησιμοποιείται μόνο σε κάποιες περιπτώσεις σε ναυπηγικές και άλλες σιδηρές κατασκευές, για ορισμένες συνδέσεις μορφοσιδηρών μέσω ελασμάτων (π.χ. σύνδεση αγκώνων με ζυγά και νομείς). Η επικάλυψη πρέπει να είναι ίση προς το τετραπλάσιο του πάχους του λεπτότερου ελασματος, όχι όμως μεγαλύτερη των 50mm.



Σχήμα 1.2 : Σχηματική αναπαράσταση ορισμένων βασικών τύπων συγκόλλησης. [13]



Σχήμα 1.3 : Διάφοροι τύποι χρήσης επικαλύπτρας. [42]

### 1.3 Σύγχρονες μέθοδοι συγκόλλησης

Οι κυριότερες μέθοδοι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται περισσότερο σήμερα και οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία συγκόλλησης με τήξη είναι οι εξής :

- Συγκόλληση με Αέριο και Κοπή με Οξυγόνο (Oxyfuel Gas Welding and Cutting)
- Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding , SMAW)
- Συγκόλληση με Ηλεκτρόδια Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (Gas Tungsten Arc Welding , GTAW)
- Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding , GMAW)
- Συγκόλληση Τόξου με Χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding , FCAW) , που είναι μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW
- Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου (Submerged Arc Welding , SAW)
- Αυτόματες Μέθοδοι Κατακόρυφης Συγκόλλησης (Vertical Automatic Welding Processes) , όπου οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στη ναυπηγική είναι δύο , η electroslag και η electrogas.
- Συγκόλληση και Κοπή με Τόξο Πλάσματος (Plasma Arc Welding , PAW, and Cutting , PAC)
- Συγκόλληση με Laser

Από το σύνολο των 37 δοκιμών με συγκόλληση που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική τα 12 έφεραν συγκολλήσεις τύπου FCAW και τα υπόλοιπα 25 υβριδικές συγκολλήσεις Laser – GMAW. Ως εκ τούτου , από τις μεθόδους συγκολλήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω , στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι εξής :

- GMAW
- FCAW
- Laser

### 1.3.1 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου ( Gas Metal Arc Welding , GMAW ) [7][8][13][16][17][18][19][21][22][25]

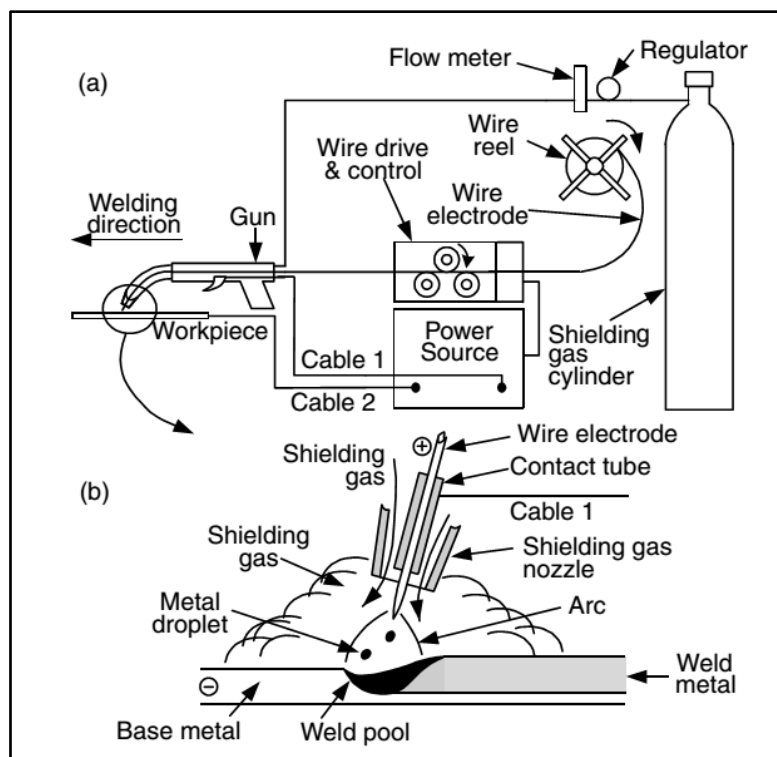
#### 1.3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκόλλησης χρησιμοποιεί προστασία αερίου και η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Στα πρώτα στάδια εμφάνισής της , η μέθοδος αυτή εθεωρείτο μια μέθοδος υψηλής πυκνότητας ρεύματος με γυμνά ηλεκτρόδια μικρής διαμέτρου και με προστασία που δινόταν από παροχή αδρανών αερίων. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείτο για τη συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου. Έτσι της δόθηκε η ονομασία MIG (Metal Inert Gas). Στην πορεία , ακολουθώντας τις εξελίξεις , άρχισαν να χρησιμοποιούνται ρεύματα χαμηλής πυκνότητας καθώς επίσης και παλλόμενο συνεχές ρεύμα. Η χρήση της μεθόδου επεκτάθηκε και σε συγκολλήσεις άλλων μετάλλων (ανθρακούχοι & ανοξείδωτοι χάλυβες,μαγνήσιο,χαλκός,νικέλιο κ.ά.) και πλέον για την επίτευξη προστασίας άρχισαν να χρησιμοποιούνται και ενεργά αέρια (κυρίως CO<sub>2</sub>). Έτσι , η μέθοδος μετονομάστηκε σε GMAW που είναι ερύτερος όρος. Στη μέθοδο GMAW ενδείκνυται η χρήση DCEP (συνεχές ρεύμα ανάστροφης πολικότητας) , καθώς έτσι εξασφαλίζεται σταθερό τόξο , ομαλή ροή μετάλλου με λίγες εκτοξεύσεις και πολύ καλή διείσδυση. Με χρήση DCEN (συνεχές ρεύμα ορθής πολικότητας ) ή AC (εναλλασσόμενο ρεύμα ) η μεταφορά των τηγμένων μεταλλικών σταγόνων είναι αρκετά ακανόνιστη και σταθής.

Μια τυπική διάταξη GMAW φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.4 και αποτελείται από επιμέρους μέρη , τα κυριότερα εκ των οποίων είναι τα εξής :

- η μηχανή συγκόλλησης
- το πιστόλι συγκόλλησης
- το ηλεκτρόδιο
- η τροφοδοσία ηλεκτροδίου
- η παροχή αερίου προστασίας και η ρυθμιστική βαλβίδα
- το ψυκτικό σύστημα του πιστολιού συγκόλλησης
- το τηλεχειριστήριο



Σχήμα 1.4 : Τυπική διάταξη GMAW : (α) συνολική διαδικασία , (β) η περιοχή της συγκόλλησης.[13]

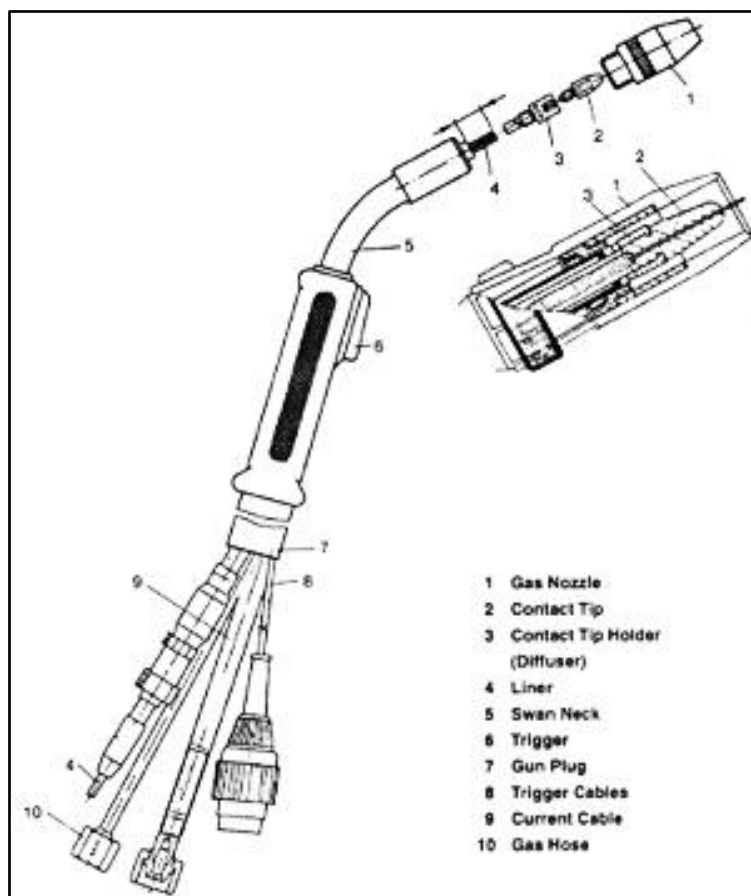
### 1.3.1.2 Ηλεκτρόδια

Στις συγκολλήσεις μαλακών χαλύβων και χαλύβων υψηλής αντοχής με τη μέθοδο GMAW χρησιμοποιούνται δύο τύποι ηλεκτροδίων : (α) συμπαγή και (β) με πυρήνα προστατευτικής σκόνης (flux cored). Στη ναυπηγική βιομηχανία, έχει επικρατήσει η χρησιμοποίηση της δεύτερης κατηγορίας ηλεκτροδίων, καθώς προσφέρει υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού με εξαιρετική όψη ραφής και χαμηλά ποσοστά εκτοξεύσεων. Ουσιαστικά στην περίπτωση (β) πρόκειται για τη μέθοδο FCAW , η οποία είναι μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW.

Τα συμπαγή ηλεκτρόδια με προστασία αδρανούς αερίου έχουν συνήθως την ίδια σύνθεση με το προς συγκόλληση βασικό μέταλλο. Στην περίπτωση , όμως , που το χρησιμοποιούμενο άεριο είναι ενεργό (π.χ. μίγμα με  $O_2$  ή  $CO_2$ ) , τότε είναι απαραίτητη η προσθήκη αποξειδωτικών στο κράμα του ηλεκτροδίου (κυρίως Si και Mn). Οι πιο συνηθισμένες χρησιμοποιούμενες διαμέτροι ηλεκτροδίων κυμαίνονται μεταξύ 1.02 και 1.59 mm (0.045 με 1/16 in) , αλλά υπάρχουν και ηλεκτρόδια μικρότερων (μέχρι 0.5 mm) και μεγαλύτερων (μέχρι 3.18 mm ) διαμέτρων.

### 1.3.1.3 Πιστόλια συγκόλλησης

Στη μέθοδο GMAW υπάρχουν πιστόλια για χειροκίνητη και ημιαυτόματη συγκόλληση. Επειδή το ηλεκτρόδιο προωθείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης , το πιστόλι πρέπει απαραίτητα να διαθέτει μια ολισθαίνουσα ηλεκτρική επαφή (σωλήνα επαφής) για τη διοχέτευση του ρεύματος. Πρέπει , επίσης , να διαθέτει ακροφύσιο για την παροχή του αερίου προστασίας. Η απαιτούμενη ψύξη του πιστολιού γίνεται ή με το αέριο προστασίας ή με κλειστό κύκλωμα νερού ή και με τα δύο. Στο σχήμα 1.5 φαίνεται ένα τυπικό πιστόλι συγκόλλησης GMAW.



Σχήμα 2.5 : Ημιαυτόματο , αερίψυκτο πιστόλι συγκόλλησης GMAW. [39]

#### 1.3.1.4 Χαρακτηριστική μηχανής συγκόλλησης

Η GMAW είναι μέθοδος συγκόλλησης με πολύ υψηλή πυκνότητα έντασης ρεύματος ( $i = 50 \times 10^3 \div 100 \times 10^3 \text{ A/in}^2$ ). Για το λόγο αυτό απαιτεί μηχανή συγκόλλησης σταθερής ή ελαφρά ανερχόμενης τάσης (constant voltage or rising). Ας σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης GMAW, το συνεχές ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα. Μια νεότερη εξέλιξη στον τομέα των μηχανών συγκόλλησης GMAW είναι οι μηχανές παλλόμενου συνεχούς ρεύματος (pulsed d.c. power supply). Οι μηχανές αυτές παρέχουν δύο επίπεδα έντασης ρεύματος : ένα σταθερό ρεύμα χαμηλής έντασης, που δεν είναι σε θέση να προκαλέσει μεταφορά του τηκόμενου υλικού σε σταγονίδια, και ένα ρεύμα υψηλότερης έντασης, υπό μορφή παλμών, που υπερτίθεται στο πρώτο (συχρότητας συνήθως 50 Hz). Η μέγιστη τιμή του συνολικού ρεύματος είναι υψηλότερη της τιμής μετάβασης (transition current), οπότε η μεταφορά γίνεται με ψεκασμό. Το σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι η επιθυμητή μεταφορά με ψεκασμό γίνεται με αποδοτικότερη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

### 1.3.1.5 Τεχνικές μεταφοράς προστιθέμενου μετάλλου

Γενικά , οι παράγοντες που επηρεάζουν τον τύπο μεταφοράς μετάλλου είναι οι εξής :

- η ένταση και το είδος του ρεύματος
- η διάμετρος του ηλεκτροδίου
- η σύσταση του ηλεκτροδίου
- το μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου
- το αέριο προστασίας

Η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου από την άκρη του ηλεκτροδίου στο λουτρό της συγκόλλησης μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους :

**A. Μεταφορά με βύθιση ή βραχυκύκλωση (short circuit transfer) :** Η τεχνική αυτή , γνωστή και ως GMAW-S , αναπτύχθηκε για να γίνει δυνατή η συγκόλληση σε πολύ λεπτά ελάσματα και σε όλες τις θέσεις χωρίς τη χρήση αδρανών αερίων προστασίας. Το τηγμένο μέταλλο στην άκρη του ηλεκτροδίου μεταφέρεται στο λουτρό της συγκόλλησης όταν το ηλεκτρόδιο αγγίζει την επιφάνεια του λουτρού , προκαλώντας δηλαδή βραχυκύκλωμα του τόξου, κάτι που συμβαίνει 20 με 200 φορές το δευτερόλεπτο. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται μικρές εντάσεις ρεύματος (50-220 A) και μικρές τάσεις (12-22 V). Συνήθως , η μέθοδος υποστηρίζει ηλεκτρόδια διαμέτρου 0.6-1.1 mm υπό την προστασία 100% CO<sub>2</sub> ή μίγμα 75%-80% Ar με 20%-25% CO<sub>2</sub>. Υπό προϋποθέσεις , χρησιμοποιείται και τριμερής προστασία αερίου Ar + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>. Τα συνήθη πάχη μετάλλων βάσης είναι 0.6-5.0 mm. Η ραφή που προκύπτει από αυτόν τον τύπο μεταφοράς ψύχεται γρήγορα , γεγονός αρκετά επιθυμητό σε συγκολλήσεις λεπτών ελασμάτων σε οροφιαίες συγκολλήσεις και σε εναποθέσεις ραφών ρίζας με μεγάλο άνοιγμα.

Αναλυτικότερα , η τεχνική μεταφοράς πραγματοποιείται σε πέντε στάδια, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 1.6.

**A.** Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Η τάση του τόξου τείνει στο μηδέν , ενώ η ένταση του τόξου αυξάνεται. Ο ρυθμός αύξησης μέχρι τη μέγιστη τιμή ρεύματος είναι σε άμεση εξάρτηση από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης επαγωγής.

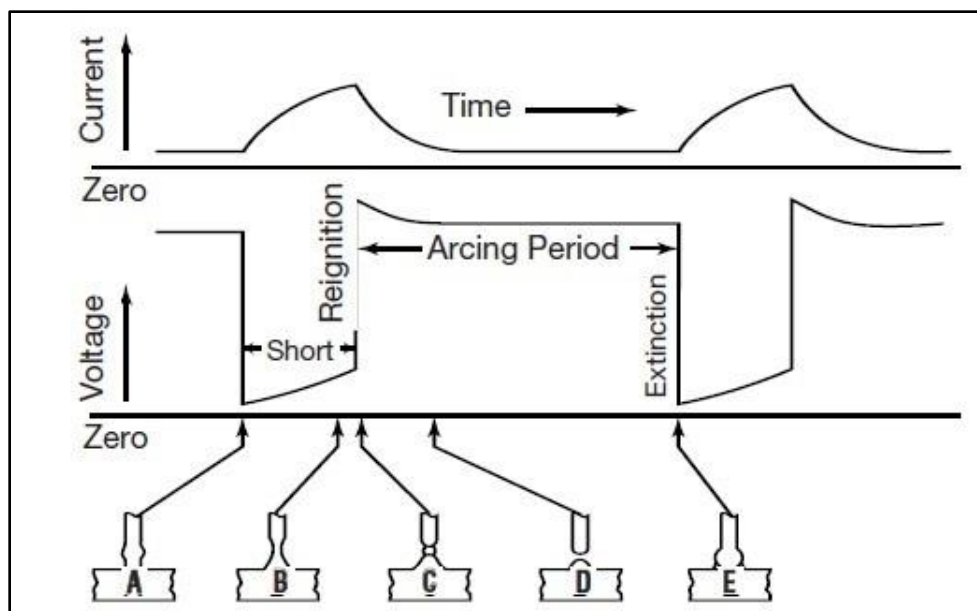
**B.** Στη συνέχεια , οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις ασκούνται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η επίδρασή τους έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία δύναμης η οποία προκαλεί τη συμπίεση της τηγμένης σταγόνας στο άκρο του ηλεκτροδίου (neck or pinch effect). Η τάση του τόξου αυξάνεται σταδιακά , ενώ το ρεύμα συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή του.

**C.** Στο σημείο αυτό , η τηγμένη μεταλλική σταγόνα αποκολλάται από το άκρο του ηλεκτροδίου και το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Οι δυνάμεις αντίδρασης στη λίμνη συγκόλλησης αποτρέπουν την επανένωση της τηγμένης σταγόνας με το ηλεκτρόδιο.

**D.** Η υψηλή τάση που χαρακτηρίζει το σημείο αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη τόξου , ενώ το ρεύμα διατηρεί ελάχιστη τιμή. Κατά την περίοδο αυτή , σχηματίζεται νέα σταγόνα στο άκρο του ηλεκτροδίου.

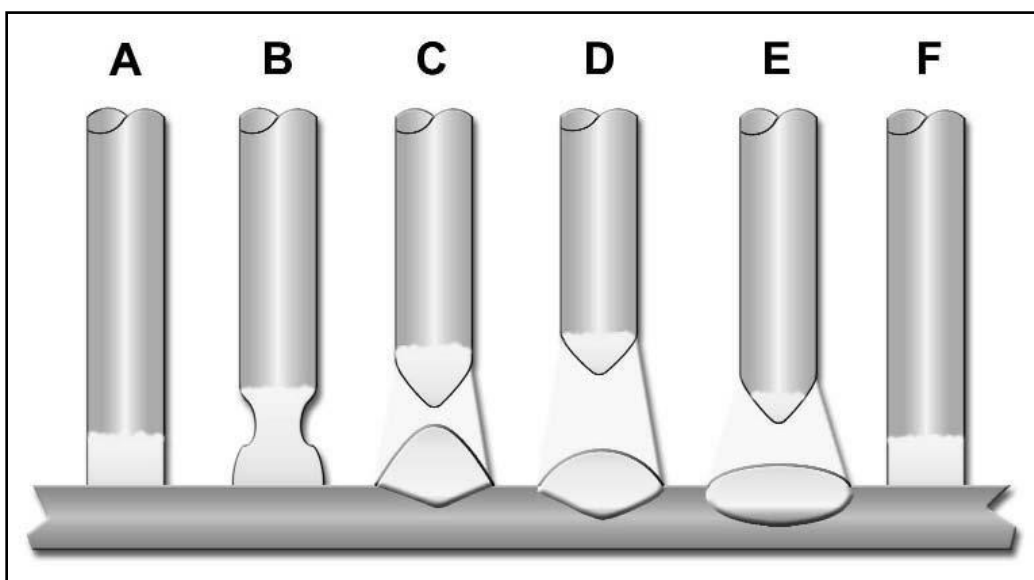
**E.** Το ηλεκτρόδιο βρίσκεται και πάλι σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης με την διαδικασία μεταφοράς να επαναλαμβάνεται. Η συχνότητα των βραχυκυκλωμάτων εξαρτάται από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης και το αέριο προστασίας. Προσθήκη Ar αυξάνει τη συχνότητα βραχυκυκλωμάτων και μειώνει το μέγεθος της τηγμένης μεταλλικής σταγόνας.





Σχήμα 1.6 : Στάδια τεχνικής μεταφοράς με βύθιση [Lincoln Electric 2006].

Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζονται καλύτερα τα στάδια ολοκλήρωσης της τεχνικής αυτής, με αποτέλεσμα να γίνεται καλύτερα κατανοητή η διαδικασία. Στο σχήμα αυτό, επίσης, η διαδικασία ολοκληρώνεται σε έξι στάδια, καθώς φαίνεται μια ενδιάμεση κατάσταση (στάδιο E) κατά την οποία το ηλεκτρόδιο πλησιάζει στο βασικό μέταλλο για νέα βραχυκύκλωση.



Σχήμα 1.7 : Στάδια ολοκλήρωσης μεταφοράς με βραχυκύκλωση : A) φυσική επαφή ηλεκτροδίου με το βασικό μέταλλο, B) «τσιμπημα» ηλεκτροδίου, C) μεταφορά τηγμένης σταγόνας, D) μέγιστο μήκος και τάση τόξου, E) πλησίασμα ηλεκτροδίου στο βασικό μέταλλο, F) εκ νέου βραχυκύκλωση [Miller 2012].



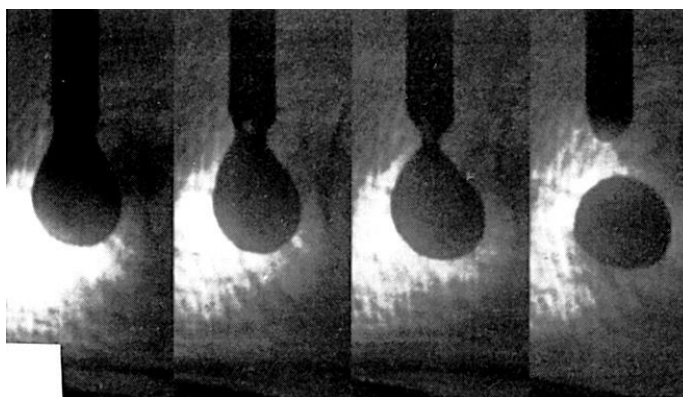
### Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με βραχυκύκλωση.

- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις , όπως επίπεδη , οριζόντια , κατακόρυφη και οροφιαία.
- Ιδανική για συγκολλήσεις τεμαχίων χωρίς κατάλληλη προετοιμασία και για εναποθέσεις ρίζας σε σωληνώσεις.
- Μικρότερη παραμόρφωση , λόγω μικρής πρόσδωσης θερμότητας.
- Βαθμοί απόδοσης ηλεκτροδίου πάνω από 93% .

### Μειονεκτήματα της μεταφοράς με βραχυκύκλωση.

- Περιορισμός σε εφαρμογές εναποθέσεως ρίζας σε παχιά ελάσματα.
- Ανεπαρκής έλεγχος της διαδικασίας μπορεί να οδηγήσει σε ατελή τήξη. Ένα ακόμα σημαντικό σφάλμα της μεταφοράς μετάλλου με την τεχνική αυτή είναι η πρόκληση υπερκαλύψεων.
- Ελλιπής έλεγχος της συγκολλητικής διαδικασίας μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικές εκτοξεύσεις μετάλλου και συνεπώς σε αύξηση του κόστους καθαρισμού της συγκόλλησης.
- Σε εξωτερικές εργασίες , για την αποφυγή απώλειας του αερίου προστασίας , είναι απαραίτητη η χρήση ανεμοθώρακα.

**B. Μεταφορά με σταγόνες (Globular transfer) :** Μεμονωμένες σταγόνες τηγμένου μετάλλου μεταφέρονται μέσα στο τόξο υπό την επίδραση της βαρύτητας. Η αλληλεπίδραση των σταγόνων με την επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης επηρεάζει τη ροή μέσα στη συγκόλληση. Η διάμετρος των σταγόνων είναι περίπου ίδια ή και μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτροδίου (συνήθως 2-4 φορές η διάμετρος του ηλεκτροδίου) ενώ το σχήμα τους ακανόνιστο. Στην εικόνα 1.1 φαίνεται η μεταφορά με χοντρές σταγόνες κατά τη διάρκεια συγκόλλησης GMAW ενός χάλυβα , με ένταση ρεύματος 180 A και προστασία αερίου Ar-2% O<sub>2</sub> . Η μεταφορά με σταγόνες δεν είναι πάντοτε ομαλή και χαρακτηρίζεται από εκτινάξεις μετάλλου εκτός της ραφής (spatter). Ως συνέπεια των εκτοξεύσεων είναι η παραγωγή καπνού , αν και το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από τη μεταφορά των σταγόνων. Ο παραγόμενος καπνός περιέχει βλαβερά προς τον άνθρωπο στοιχεία ( Fe, Cr, Ni ,Mn ) , γι' αυτό και είναι απαραίτητη η πρόβλεψη του βαθμού έκθεσης του συγκολλητή σε αυτά. Σε ορθή πολικότητα και σχετικά χαμηλές εντάσεις ρεύματος η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου γίνεται με σταγόνες , ανεξάρτητα από το αέριο προστασίας. Ωστόσο , με χρήση CO<sub>2</sub> και He παρατηρείται σε όλες τις εντάσεις ρεύματος. Σε συγκολλήσεις GMAW ανθρακούχων και μικροκραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιείται προστασία CO<sub>2</sub> με σκοπό την ελαχιστοποίηση των εκτοξεύσεων.



Εικόνα 1.1 : Μεταφορά μεταλλικών σταγόνων κατά τη συγκόλληση GMAW χάλυβα με προστασία Ar-2% O<sub>2</sub> , με ρεύμα 180 A και τάση 29 V, ανά 3x10<sup>-3</sup> s [Jones 2003].

Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με σταγόνες.

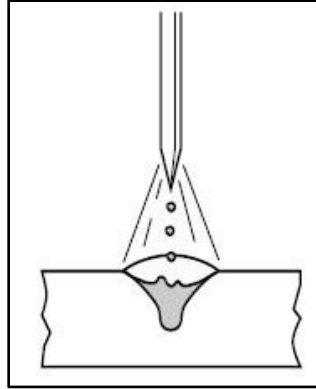
- Χρήση φθηνών αερίων προστασίας όπως CO<sub>2</sub> και μίγματος Ar/ CO<sub>2</sub>.
- Ικανότητα συγκολλήσεων σε υψηλές ταχύτητες.
- Χρήση φθηνών ηλεκτροδίων (συμπαγών ή μεταλλικού πυρήνα).
- Φθηνός εξοπλισμός συγκόλλησης.

Μειονεκτήματα της μεταφοράς με σταγόνες.

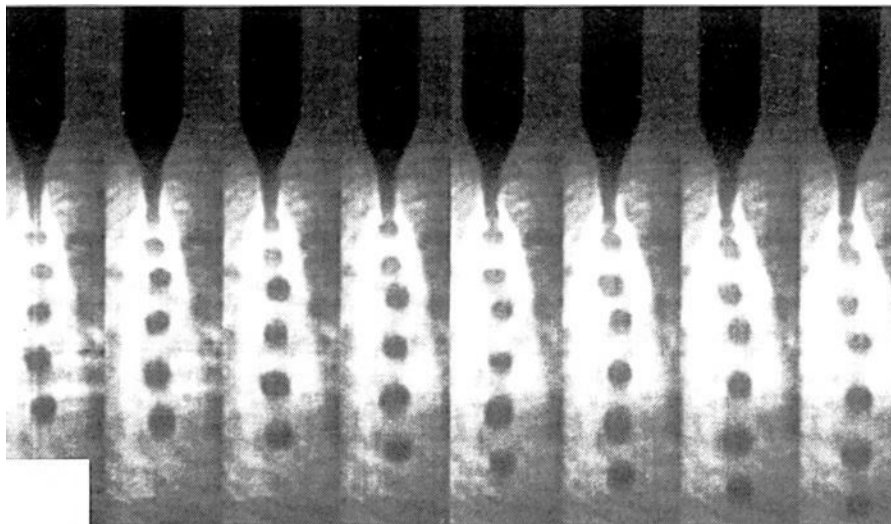
- Τα υψηλά επίπεδα εκτοξεύσεων μετάλλου απαιτούν καθαρισμό των επιφανειών , μια αρκετά πολυέξοδη διαδικασία.
- Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σφαλμάτων υπερκάλυψης , που απαιτούν δαπανηρές επιδιορθώσεις.
- Υπερβολική κυρτότητα ραφής και ελλiptής διαβροχή της βάσης της συγκόλλησης .
- Το υψηλό ποσοστό εκτοξεύσεων οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας των ηλεκτροδίων στα επίπεδα του 87%-93%.

**Γ. Μεταφορά με σταγονίδια (spray transfer) :** Όταν η ένταση του ρεύματος ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή , που καλείται τιμή μετάβασης (  $I_{tr}$  ) , σταγονίδια τηγμένου μετάλλου αρχίζουν να μεταφέρονται μέσα στο τόξο υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικής δύναμης , με μεγαλύτερη ταχύτητα και συχνότητα απ'ότι στο μηχανισμό μεταφοράς χοντρών σταγόνων. Η κρίσιμη τιμή του ρεύματος (ρεύμα μετάβασης) δεν είναι σταθερή , αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το προς συγκόλληση υλικό , η διάμετρος και η προέκταση του ηλεκτροδίου και , τέλος , από τη σύνθεση του αερίου προστασίας. Η μεταφορά με σταγονίδια είναι η τεχνική μεταφοράς μετάλλου με την υψηλότερη ενέργεια , όπου το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο , με αποτέλεσμα τη δημιουργία ροής μικρών τηγμένων σταγονιδίων τα οποία μεταφέρονται αξονικά κατά μήκος του τόξου . Επίσης , είναι σταθερότερη διαδικασία και επειδή τα τηγμένα σταγονίδια είναι μικρότερα του μήκους τόξου δε συμβαίνουν βραχυκυκλώσεις και έτσι δεν προκύπτουν εκτοξεύσεις. Το φαινόμενο παρατηρείται σε ανάστροφη πολικότητα , ενώ απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη Ar στο περιβάλλον προστασίας. Συχνά χρησιμοποιούνται μίγματα Ar+1-5% O<sub>2</sub> ή Ar+CO<sub>2</sub> , όπου τα επίπεδα CO<sub>2</sub> κυμαίνονται κάτω του 18%. Στη διαδικασία χρησιμοποιούνται συμπαγή ηλεκτρόδια ή ηλεκτρόδια μεταλλικού πυρήνα. Επίσης , συναντάται σε όλα τα κοινά κράματα , όπως κράματα αλουμινίου , χαλκού , νικελίου , ανοξειδωτου χάλυβα και μαγνησίου. Η μεγάλη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης περιορίζει τη χρήση της τεχνικής σε μετωπικές και επίπεδες θέσεις συγκόλλησης. Ωστόσο , σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.

Σε ανθρακούχους χάλυβες η μεταφορά με σταγονίδια εφαρμόζεται σε παχέα ελάσματα σε αυχενικές συγκολλήσεις και σε συγκολλήσεις κατά συμβολή. Η διείσδυση είναι αρκετά μεγάλη και επηρεάζεται απο τα υπάρχοντα μαγνητικά πεδία. Η χρήση μίγματος Ar σε ποσοστό 95% με O<sub>2</sub> , ελαττώνει το προφίλ της μακρόστενης διείσδυσης (deep finger-like penetration profile) και δίνει διείσδυση με πιο ομαλοποιημένη μορφή. Η αξονική μεταφορά με σταγονίδια , λοιπόν, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων και της δυνατότητας συγκόλλησης σε μετωπικές και επίπεδες θέσεις. Η τελική όψη της ραφής είναι πολύ καλή , ειδικά αν οι προς συγκόλληση επιφάνειες είναι καθαρές χωρίς υπολείμματα σκουριάς , ελαίου και άλλων ακαθαρσιών.



Σχήμα 1.8 : Τεχνική μεταφοράς τηγμένου μετάλλου με σταγονίδια [Lincoln Electric 2006]



Εικόνα 1.2 : Στιγμιότυπα, ανά  $2.5 \times 10^{-4}$  s, μεταφοράς με σταγονίδια σε συγκόλληση χάλυβα για 320A και 29V [Jones 2003].

#### Πλεονεκτήματα της μεταφοράς με σταγονίδια.

- Υψηλός ρυθμός εναπόθεσης.
- Υψηλή αποδοτικότητα ηλεκτροδίου , μεγαλύτερη από 98%.
- Δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλο εύρος προστιθέμενων μετάλλων και διαμέτρων ηλεκτροδίων.
- Εξαιρετική όψη ραφής.
- Πολύ μικρές απαιτήσεις διαδικασιών καθαρισμού μετά τη συγκόλληση.
- Απουσία εκτοξεύσεων μετάλλου.
- Εξαιρετική τήξη συγκόλλησης.
- Χρησιμοποιείται σε ρομποτικές και ημιαυτόματες εφαρμογές.

#### Μειονεκτήματα της μεταφοράς με σταγονίδια.

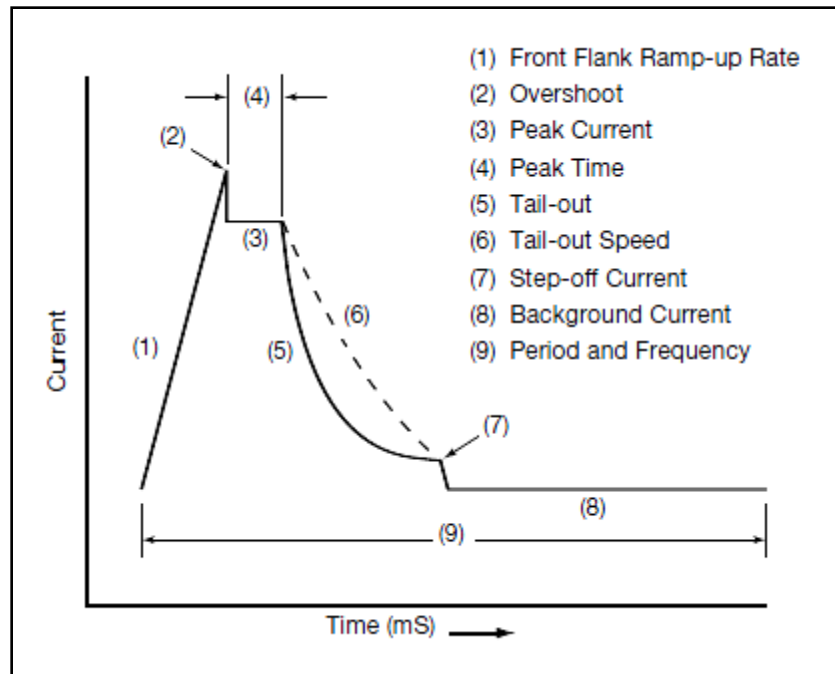
- Δεν είναι δυνατή η χρήση της σε επίπεδη και μετωπική συγκόλληση.
- Υψηλό ποσοστό παραγωγής καπνού.

- Απαιτήση αυστηρών μέτρων προστασίας για τον συγκολλητή , λόγω της υψηλής θερμότητας και ακτινοβολίας του τόξου.
- Απαραίτητη η χρήση ανεμοθώρακα στην περίπτωση χρήσης της διαδικασίας σε εξωτερικό χώρο.
- Το κόστος του χρησιμοποιούμενου αερίου προστασίας είναι , λόγω της ύπαρξης του Ar , μεγαλύτερο από ότι σε περίπτωση χρήσης 100% CO<sub>2</sub> .

**Δ. Παλμική μεταφορά με σταγονίδια (pulsed spray transfer) :** Η συγκεκριμένη τεχνική είναι μια παραλλαγή της μεταφοράς με σταγονίδια. Στην περίπτωση αυτή , η τιμή της έντασης του ρεύματος εναλλάσσεται μεταξύ δύο τιμών , μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης (high peak current & low background current αντίστοιχα). Η μεταφορά της τηγμένης σταγόνας πραγματοποιείται τη στιγμή που η ένταση του ρεύματος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Η τεχνική αυτή , γνωστή και ως GMAW-P , αναπτύχθηκε για δύο λόγους : τον έλεγχο των εκτοξεύσεων του τηγμένου μετάλλου και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων λόγω ατελούς τήξης. Ωστόσο , παρουσιάζει και αρκετά πλεονεκτήματα. Η τεχνική εφαρμόστηκε αρχικά στη ναυπηγική βιομηχανία σε συγκολλήσεις γάστρας βασικών μετάλλων από μικροκραματωμένο χάλυβα υψηλής αντοχής. Είναι αρκετά διαδεδομένη για τους εξής λόγους : η απόδοση των ηλεκτροδίων σε σύγκριση με τη FCAW είναι μεγαλύτερη και οι πιθανότητες προσρόφησης υδρογόνου από τη λίμνη συγκόλλησης αρκετά περιορισμένες. Η GMAW-P εφαρμόζεται κυρίως σε συμπαγή ηλεκτρόδια διαμέτρου 0.8-1.6 mm και σε ηλεκτρόδια μεταλλικού πυρήνα διαμέτρου 1.1-2.0 mm. Επίσης , χρησιμοποιείται σε συγκολλήσεις διαφόρων υλικών με προστασία αερίου μίγματος Ar + έως 18% CO<sub>2</sub> .

Η τιμή της έντασης του ρεύματος εναλλάσσεται , όπως προαναφέρθηκε , μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής , αλλά η μέση τιμή της είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στη μεταφορά με σταγονίδια. Ο χρόνος εναλλαγής ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές ονομάζεται περίοδος ή κύκλος. Στην GMAW-P η μέγιστη τιμή ρεύματος είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης στη μεταφορά με σταγόνες , ενώ η ελάχιστη τιμή είναι μικρότερη εκείνης στη μεταφορά με βραχυκύκλωση. Όταν το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του , αποκολλάται η τηγμένη σταγόνα από το άκρο του ηλεκτροδίου και μεταφέρεται κατά μήκος του τόξου προς τη λίμνη συγκόλλησης. Το χαμηλότερο ρεύμα της GMAW-P εξασφαλίζει σταθερότητα στο τόξο και παρέχει τη συνολική θερμότητα στη συγκόλληση. Βασικοί παράμετροι της τεχνικής αυτής είναι : η τιμή της μέγιστης έντασης ρεύματος ( $I_p$ ) , η διάρκεια της μέγιστης έντασης ( $T_p$ ) , η τιμή της ελάχιστης έντασης ρεύματος ( $I_B$ ) και η διάρκεια ελάχιστης έντασης ( $T_B$ ).

Ο αριθμός των περιόδων που παρατηρούνται ανά δευτερόλεπτο ορίζεται ως συχνότητα. Η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας παροχής του προστιθέμενου μετάλλου. Από την υπέρθεση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής ρεύματος προκύπτει μια μέση ένταση , με την οποία εξασφαλίζονται συγκολλήσεις σε όλες τις θέσεις και για μεγάλα πάχη ελασμάτων. Στο σχήμα 1.9 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της τεχνικής GMAW-P.



Σχήμα 1.9 : Στάδια μηχανισμού GMAW-P κατά τη διάρκεια μια περιόδου [Lincoln Electric 2006].

Πλεονεκτήματα της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια.

- Περιορισμένες έως και μηδαμινές εκτοξεύσεις τηγμένου μετάλλου.
- Ανθεκτικότερη τεχνική σε σφάλματα λόγω ατελούς τήξης σε σύγκριση με άλλες τεχνικές μεταφοράς μετάλλου.
- Εξαιρετική όψη ραφής.
- Δυνατότητα ελέγχου του παραγόμενου , εκ της συγκόλλησης , καπνού.
- Πολύ χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.
- Περιορισμένη προσρόφηση υδρογόνου.
- Περιορισμένη ευαισθησία σε μαγνητικό φύσημα.
- Πολύ καλή απόδοση του μηχανισμού μεταφοράς ακόμη και όταν οι επιφάνειες των δοκιμών δεν έχουν προετοιμασθεί κατάλληλα.
- Χαμηλού κόστους διαδικασία , υψηλής αποδοτικότητας ηλεκτρόδια (έως 98%), συγκριτικά με τις μεθόδους SMAW, FCAW και GMAW-S.
- Χρησιμοποιείται σε ρομποτικές και αυτοματοποιημένες εφαρμογές.
- Δυνατότητα ανάπτυξης υψηλών ταχυτήτων συγκόλλησης (έως 120 cm/min).

Μειονεκτήματα της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια.

- Ο εξοπλισμός είναι αρκετά ακριβότερος από τον παραδοσιακό εξοπλισμό.
- Τα μίγματα Ar που χρησιμοποιούνται για προστασία είναι ακριβότερα του CO<sub>2</sub>.
- Υψηλές απαιτήσεις προστασίας για το συγκολλητή , λόγω της υψηλής ενέργειας τόξου.
- Απαιτήση ανεμοθώρακα για εξωτερικές δραστηριότητες.

### 1.3.1.6 Αέρια προστασίας

Για τα μη σιδηρούχα μέταλλα , καθώς επίσης και για τους ανοξειδωτους και κραματωμένους χάλυβες , χρησιμοποιούνται ως αέρια προστασίας το αργό , το ήλιο και μίγματά τους. 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 συγκόλλησης με τόξο πλάσματος Ar , έχει μια στενότερη παραβολική μορφή σε σχέση με την αντίστοιχη του He (σχήμα 1.10) .

Στα σιδηρούχα μέταλλα , το He ως αέριο προστασίας μπορεί να παράγει εκτινάξεις (spatter), ενώ το Ar μπορεί να προκαλέσει αβαθή διείδυση. 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 συγκόλλησης , τη μεγαλύτερη διείδυση 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.

Τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση μετάλλων και κραμάτων τους αναφέρονται συγκεντρωτικά παρακάτω :

#### Αλουμίνιο

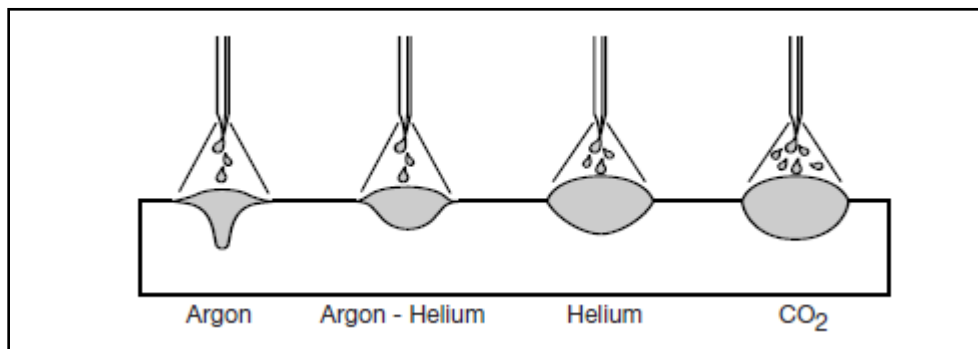
- Αργό για μικρά πάχη (μέχρι 25 mm).
- Μίγμα 75% He+25% Ar για πάχη από 25 μέχρι 76 mm.
- 90% He+10% Ar για πολύ μεγάλα πάχη.

#### Μαλακός χάλυβας

- Μίγμα Ar+5% O<sub>2</sub>.
- Για μεταφορά με βύθιση Ar+25% CO<sub>2</sub> για πάχη μικρότερα από 3.2 mm , Ar+50% CO<sub>2</sub> για μεγαλύτερα πάχη , ή σκέτο CO<sub>2</sub> για μεγαλύτερη διείδυση.

#### Ανοξειδωτος χάλυβας

- Μίγμα αργού με 1-2% O<sub>2</sub>.
- Για μεταφορά με βύθιση , μίγμα 90% He+7.5% Ar+2.5% CO<sub>2</sub> .



Σχήμα 1.10 : .Προφίλ διείδυσης ανάλογα με το αέριο προστασίας [ Lincoln Electric, 2006].



### 1.3.1.7 Παράμετροι της μεθόδου

Οι παράμετροι της μεθόδου GMAW , με τον έλεγχο των οποίων μπορούμε να έχουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα από τη διαδικασία , αναλύονται στη συνέχεια :

**Ρεύμα συγκόλλησης :** Πρακτικά , δηλαδή , ο ρυθμός τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου. Αλλάζοντας το ρυθμό τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου , αλλάζει και η τιμή του ρεύματος συγκόλλησης 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 διείσδυσης , του ρυθμού απόθεσης και του μεγέθους της ραφής.

**Πολικότητα :** Η πλειοψηφία των συγκολλήσεων με τη μέθοδο GMAW γίνεται με το ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο στο θετικό πόλο της πηγής (συνδεσμολογία ανάστροφης πολικότητας-DCEP) , διότι προσφέρει σταθερότητα στο τόξο , χαμηλό ποσοστό εκτοξεύσεων (spatter) , καλό προφίλ ραφής και μεγαλύτερη διείσδυση.

**Τάση του τόξου :** Πρακτικά , δηλαδή , το μήκος του 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 , η τάση με το μήκος του τόξου συνδέονται ως εξής : 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 ευρύτερα 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 σύνδεσης. Όταν όλες οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές , η διείσδυση της συγκόλλησης 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 διείσδυση. 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 (travel angle) και με τη γωνία μεταξύ του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας στην οποία γίνεται η συγκόλληση (work angle). Όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει σε κατεύθυνση αντίθετη με αυτή της ταχύτητας , έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία οπισθέλκουσας γωνίας (trail angle). Αντίθετα , όταν το ηλεκτρόδιο δείχνει προς την κατεύθυνση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πρόσω γωνίας (lead angle). 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 διείσδυση 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 συγκόλλησης , 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 mm για μεταφορά με περιοδικές βραχυκυκλώσεις του τόξου και μεταξύ 13-25 mm για 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 ότι 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 διείσδυση , αλλά μπορεί να μην επιτρέπουν τη χρήση κάποιων ηλεκτροδίων σε κατακόρυφη ή οροφιαία θέση.

Μια πιο γενική εικόνα για την επίδραση των παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης GMAW , φαίνεται στον πίνακα 1.1 που ακολουθεί.



Πίνακας 1.1 : Επίδραση παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης GMAW

| Welding variables to change | Desired changes |           |                 |               |               |               |               |               |
|-----------------------------|-----------------|-----------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                             | Penetration     |           | Deposition rate |               | Bead size     |               | Bead width    |               |
|                             | Increase        | Decrease  | Increase        | Decrease      | Increase      | Decrease      | Increase      | Decrease      |
| Current and wire feed speed | Increase        | Decrease  | Increase        | Decrease      | Increase      | Decrease      | Little effect | Little effect |
| Voltage                     | No effect       | No effect | Little effect   | Little effect | Little effect | Little effect | Increase      | Decrease      |
| Travel speed                | No effect       | No effect | Little effect   | Little effect | Decrease      | Increase      | Decrease      | Increase      |
| Electrode extension         | Decrease        | Increase  | Increase(a)     | Decrease(a)   | Increase      | Decrease      | Decrease      | Increase      |
| Wire diameter               | Decrease        | Increase  | Decrease        | Increase      | Little effect | Little effect | Little effect | Little effect |
| Shield gas %                | Increase        | Decrease  | Little effect   | Little effect | Little effect | Little effect | Increase      | Decrease      |
| Gun angle                   | Drag            | Push      | Little effect   | Little effect | Little effect | Little effect | Push          | Drag          |

(a) Will result in desired change if current levels are maintained by adjustment of wire feed speed

### 1.3.1.8 Τυπικά σφάλματα μεθόδου GMAW

Τα κυριότερα σφάλματα που εμφανίζονται στη συγκεκριμένη διαδικασία συγκόλλησης είναι τα εξής :

**Αστάθεια κατά το άναμμα του τόξου (arc star instability) :** Είναι ένα τυπικό πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου. Αν το άναμμα του τόξου δεν είναι επιτυχές , είναι αδύνατη η εναπόθεση μετάλλου μέχρι το τόξο να ξανανάψει , με αποτέλεσμα να παρατηρούνται έντονες εκτοξεύσεις. Συνεπώς , η συγκόλληση θα παρουσιάσει περιορισμένη διείσδυση και κακή ποιότητα επιφάνειας. Όταν το τόξο αδυνατεί να ανάψει , το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με το προς συγκόλληση τεμάχιο , θερμαίνεται και αρχίζει να αναλύεται ( electrode disintegration ) , με αποτέλεσμα τη δημιουργία εκτοξεύσεων (spatter).

**Εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter) :** Είναι ένα πολύ συχνό πρόβλημα της GMAW και μπορεί να έχει διάφορα αίτια. Συνήθως συμβαίνουν όταν η ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου ή η τάση κυμαίνονται σε πολύ υψηλές τιμές. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα της συγκόλλησης παίζει η καθαρότητα της επιφάνειας του βασικού μετάλλου. Για το λόγο αυτό πριν την πραγματοποίηση της συγκόλλησης ενδείκνυται ο σχολαστικός καθαρισμός των προς συγκόλληση τεμαχίων για την απομάκρυνση διαφόρων ακαθαρσιών (λάδι ,σκουριά , μπογιά κλπ.). Όσο πιο καθαρή είναι η επιφάνεια των βασικών μετάλλων , τόσο μειώνεται η πιθανότητα εκτοξεύσεων. Εξίσου καθαρό και στεγνό πρέπει να είναι το ηλεκτρόδιο. Τέλος , απαραίτητη είναι η επαρκής παροχή αερίου προστασίας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης , καθώς αν το τόξο δεν προστατεύεται πλήρως προκαλούνται εκτοξεύσεις και η ραφή έχει άγρια όψη.

**Πόροι (porosity) :** Το πιο συνηθισμένο αίτιο του φαινομένου είναι η ανεπαρκής αέρια προστασία κατά τη συγκόλληση. Ως εκ τούτου , είναι αναγκαία η λήψη μέτρων για εξασφάλιση επαρκούς ροής αερίου , ο καθαρισμός του ακροφύσιου παροχής , ο έλεγχος στους σωλήνες παροχής για τυχόν διαρροές και η διατήρηση μικρής απόστασης μεταξύ όπλου και λίμνης συγκόλλησης μετά το πέρας της διαδικασίας μέχρι να στερεοποιηθεί το τηγμένο μέταλλο. Ωστόσο , πολλές φορές το σφάλμα μπορεί να οφείλεται στο ίδιο το αέριο. Σε μια τέτοια περίπτωση , το αέριο πρέπει να αντικαθίσταται με το κατάλληλο για την εφαρμογή.

**Ατελής τήξη (incomplete fusion) :** Ορίζεται ως η αδυναμία επίτευξης πλήρους τήξης του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό μέταλλο και οφείλεται σε ακαθαρσίες της επιφάνειας του βασικού μετάλλου. Για το λόγο αυτό πρέπει να εξασφαλίζεται η καθαρότητα των επιφανειών πριν την έναρξη της διαδικασίας. Άλλο πιθανό αίτιο του προβλήματος είναι η ανεπαρκής πρόσδοση θερμότητας κατά τη συγκόλληση , πράγμα που διορθώνεται με αύξηση της τάσης ή της ταχύτητας παροχής προστιθέμενου μετάλλου. Τέλος , την ποιότητα τήξης μπορεί να επηρεάσει η χρησιμοποιούμενη τεχνική συγκόλλησης , καθώς αν δεν είναι η κατάλληλη η τελική όψη ραφής δεν είναι η επιθυμητή.

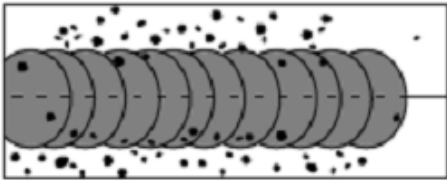
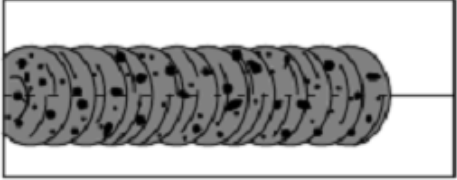

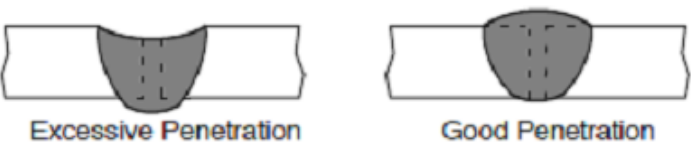
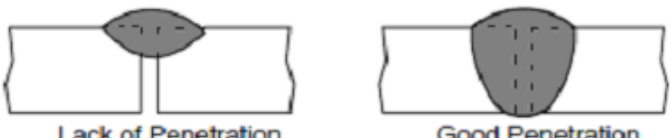
**Ατελής διείσδυση (lack of penetration) :** Προκύπτει όταν η διείσδυση που επιτεύχθηκε είναι μικρότερη από την απαιτούμενη , με αποτέλεσμα η συγκόλληση να είναι ανεπαρκής για την προοριζόμενη εφαρμογή. Συνήθως , το πρόβλημα οφείλεται σε ακατάλληλη προετοιμασία των τεμαχίων και του διάκενου μεταξύ τους ή όταν τα προς συγκόλληση ελάσματα έχουν μεγαλύτερο πάχος από αυτό που υποστηρίζει η διαδικασία συγκόλλησης. Πολύ σημαντικό ρόλο στο τελικό προφίλ διείσδυσης παίζει και ο προσανατολισμός του ηλεκτροδίου. Η προετοιμασία της διάταξης πρέπει να είναι τέτοια , ώστε να εξασφαλίζεται πρόσβαση στην βάση της συμβολής , ικανοποιητική προέκταση ηλεκτροδίου και κατάλληλα χαρακτηριστικά τόξου. Τέλος , για την εξασφάλιση ικανοποιητικής

διείσδυσης , πρέπει η τεχνική που εφαρμόζεται να είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή και η πρόσδοση θερμότητας επαρκής.

**Υπερβολική διείσδυση (excessive penetration) :** Προκύπτει όταν η ποσότητα του μετάλλου συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη , με αποτέλεσμα να παρατηρείται υπέρμετρη ενίσχυση στη ρίζα της συγκόλλησης , ειδικά αν αυτή γίνεται μονόπλευρα. Παρουσιάζεται σε περιπτώσεις υπερβολικής πρόσδοσης θερμότητας στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί , αν αυξηθεί η ταχύτητα της συγκόλλησης ή αν ελαττωθεί η τάση ή η ταχύτητα παροχής προστιθέμενου μετάλλου.

Άλλα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη μέθοδο GMAW είναι τρέξιμο μετάλλου (burn through) , ανώμαλη επιφάνεια όψης της ραφής , παραμορφώσεις καθώς επίσης και υπερκαλύψεις (cold laps or overlaps) . Η εμφάνιση υπερκαλύψεων μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ποιότητα και την αντοχή της συγκόλλησης. Γενικά , τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW , έχουν μεταλλουργικό και μορφολογικό χαρακτήρα και προκαλούν υποβάθμιση της ποιότητας της συγκόλλησης. Στον πίνακα 1.2 φαίνονται μερικά από τα σφάλματα που περιγράφηκαν παραπάνω.

Πίνακας 1.2 : Τυπικά σφάλματα μεθόδου GMAW [Miller Electric 2012].

|   |                             |
|---|-----------------------------|
|   | <p>Εκτοξεύσεις</p>          |
|  | <p>Πόροι</p>                |
|  | <p>Ατελής τήξη</p>          |
|  | <p>Υπερβολική διείσδυση</p> |
|  | <p>Ατελής διείσδυση</p>     |

### 1.3.1.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου GMAW

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής :

- Δυνατότητα χρήσης της μεθόδου για συγκολλήσεις μιας μεγάλης ποικιλίας μετάλλων και κραμάτων καθώς και πάχος ελασμάτων.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.
- Πολύ καλή όψη ραφής .
- Μπορεί να γίνει σε μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με άλλες μεθόδους (SMAW).
- Ο ρυθμός απόθεσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος συγκριτικά με τη SMAW.
- Βαθύτερη διείσδυση συγκριτικά με τη SMAW , άρα και δυνατότητα χρήσης μικρότερων ραφών σε αυχενικές συγκολλήσεις για ίδια αντοχή.
- Χαμηλότερα επίπεδα αναθυμιάσεων συγκριτικά με τις SMAW και FCAW.
- Υψηλότερος ρυθμός εναπόθεσης υλικού συγκριτικά με τη GTAW.
- Οικονομικός και άμεσα διαθέσιμος εξοπλισμός συγκριτικά με άλλες , υψηλού κόστους διαδικασίες (laser).
- Υψηλότερη αποδοτικότητα ηλεκτροδίων συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους συγκόλλησης (93-98%) .
- Χαμηλά επίπεδα εκτοξεύσεων και απουσία βαριάς σκουριάς , με αποτέλεσμα της ελαχιστοποίηση απαίτησης καθαρισμού μετά τη συγκόλληση.
- Κατάλληλη μέθοδος για υψηλούς ρυθμούς παραγωγής σε ημι-αυτοματοποιημένες και πλήρως αυτοματοποιημένες υψηλών ταχυτήτων.

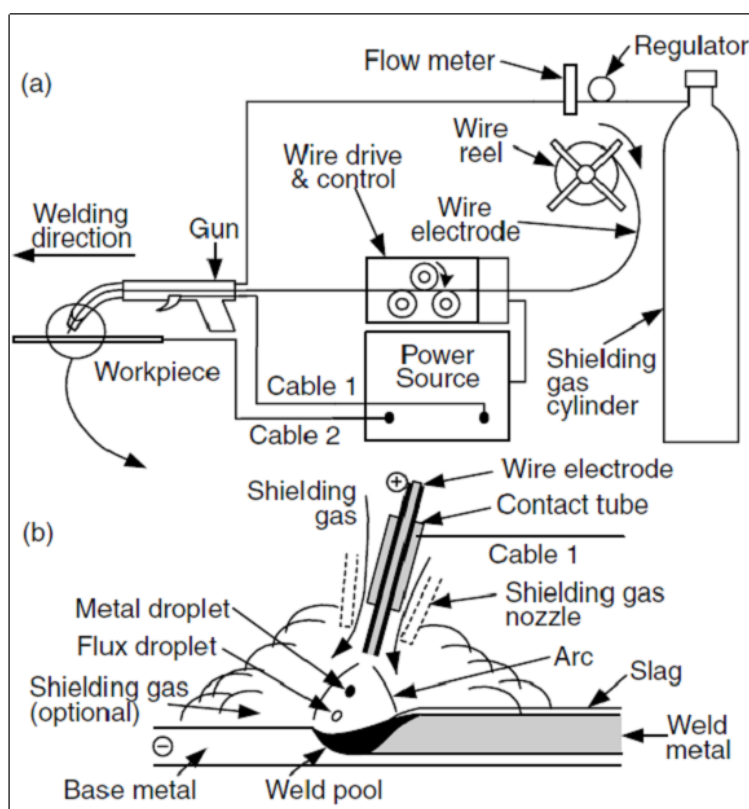
Αντίθετα , όπως όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης , έτσι και η GMAW υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς :

- 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.
- Η GMAW δεν είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις ενός περάσματος σε ελάσματα μεγάλου πάχους. Για το λόγο αυτό απαιτούνται συγκολλήσεις πολλαπλών περασμάτων , που έχουν ως συνέπεια της μεγάλη πρόσδοση θερμότητας και τη σημαντική κατανάλωση υλικών πλήρωσης.
- Απαιτήση πρόσθετου εξοπλισμού σε σχέση με τη μέθοδο SMAW , με αποτέλεσμα να μειώνεται η φορητότητα.
- Δαπανηρή η χρήση μιγμάτων αερίων προστασίας με βάση το αργό , για τις τεχνικές παλμικής και μη μεταφοράς μετάλλου με σταγονίδια , σε σχέση με άλλες τεχνικές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί 100% CO<sub>2</sub> .

### 1.3.2 Συγκόλληση τόξου με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding - FCAW) [7][8][13][15][20][21][23][24][25]

#### 1.3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

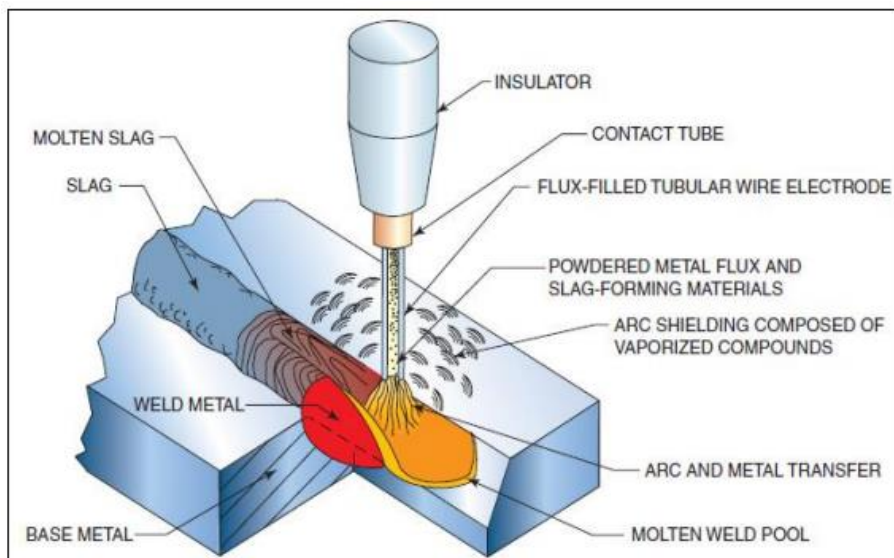
Η συγκόλληση με χρήση σωληνοειδών ηλεκτροδίων (FCAW) είναι παρόμοια με τη GMAW όπως φαίνεται στο σχήμα 1.11. Όμως, το σωληνοειδές ηλεκτρόδιο περιέχει στον πυρήνα του συλλίπασμα (flux) και δεν είναι συμπαγές όπως στη GMAW. Δηλαδή, το ηλεκτρόδιο είναι ένας μεταλλικός σωλήνας ο οποίος περιέχει τη σκόνη συλλιπάσματος και ενδεχομένως κραματικές προσμίξεις και αποξειδωτικά σιδηροκράματα. Ο ρόλος της σκόνης (flux) είναι παρόμοιος με εκείνο του συλλιπάσματος των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων της συγκόλλησης SMAW, δηλαδή η δημιουργία ενός στρώματος σκουριάς πάνω από το λουτρό και η προστασία από την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από τον αέρα.



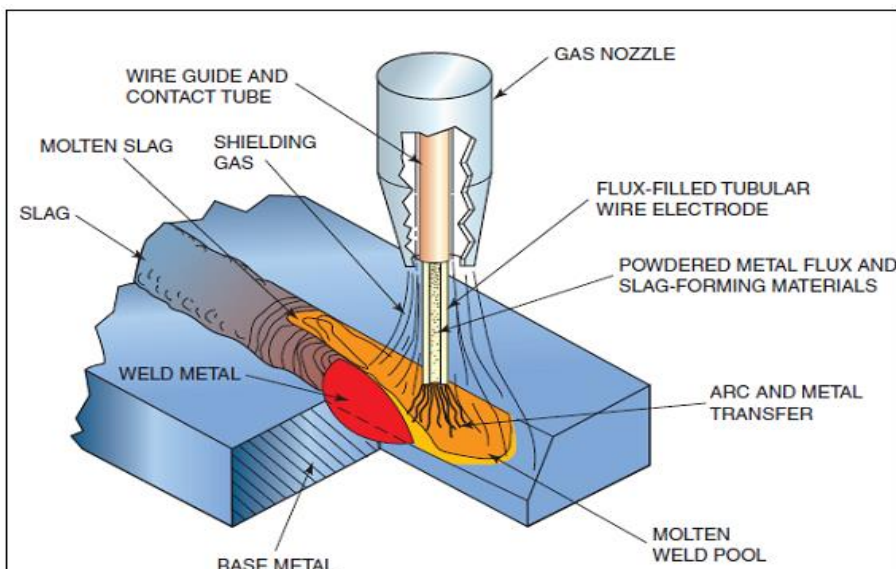
Σχήμα 1.11 : Συγκόλληση FCAW : (a) συνολική διαδικασία, (b) η περιοχή της συγκόλλησης. [13]

Ανάλογα με τη χρήση ή μη αερίου για την προστασία του τόξου και της λίμνης συγκόλλησης από την απορρόφηση οξυγόνου και αζώτου από την ατμόσφαιρα, η μέθοδος FCAW διακρίνεται σε δύο παραλλαγές. Η πρώτη, γνωστή και ως αυτοπροστατευόμενη συγκόλληση με σωληνοειδή ηλεκτρόδια FCAW-S (self shielded-FCAW), προστατεύει το μέταλλο συγκόλλησης μέσω διάσπασης και εξάτμισης της προστατευτικής σκόνης, με ενέργεια που παρέχεται από τη θερμότητα του τόξου (σχήμα 1.12). Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε κατασκευές εξωτερικού χώρου, όπου η παρουσία ανέμων θα μπορούσε να επηρεάσει την προστασία αερίου. Η δεύτερη παραλλαγή είναι η μέθοδος FCAW με

προστασία αερίου , FCAW-G ( gas shielded-FCAW ) , η οποία χρησιμοποιεί σωληνοειδή ηλεκτρόδια με πυρήνα προστατευτικής σκόνης καθώς και προστασία αερίου (σχήμα 1.13). Έχει , δηλαδή , διπλή προστασία (dual shield). Με τη FCAW-G μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκολλήσεις κατά συμβολή , όπου η απόσταση ανάμεσα στα δοκίμια , η γωνία συμβολής και το άνοιγμα ρίζας έχουν μικρές τιμές. Στη FCAW-S , όμως , όπου η διείσδυση είναι σχετικά μικρότερη, η γωνία διαμόρφωσης πρέπει να έχει μεγαλύτερη τιμή. Επιπλέον , σε επίπεδες συγκολλήσεις κατά συμβολή χωρίς χρήση επικαλύπτρας , η προέκταση του ηλεκτροδίου και το άνοιγμα της ρίζας πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητικό προφίλ διείσδυσης. Σε περίπτωση , όμως , χρήσης επικαλύπτρας η διαμόρφωση της συμβολής πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει επαρκή και ολοκληρωμένη διείσδυση.



Σχήμα 1.12 : Αυτοπροστατευόμενη FCAW (self shielded FCAW or FCAW-S).[Jeffus & Bower 2009]



Σχήμα 1.13 : FCAW με προστασία αερίου (gas shielded FCAW or FCAW-G).[Jeffus & Bower 2009]



Και στις δύο περιπτώσεις εξασφαλίζεται η παρουσία προστατευτικού στρώματος σκουριάς στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης , για την ικανοποιητική προστασία του μετάλλου συγκόλλησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της FCAW-G έναντι της FCAW-S είναι τα μικρότερα ποσοστά εκλυόμενου καπνού και αναθυμιάσεων. Επίσης , η σχεδίαση και χρήση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων με προστασία αερίου είναι ευκολότερη από αυτή των αυτοπροστατευόμενων.

Η FCAW παρουσιάζει τρία βασικά χαρακτηριστικά , στα οποία έγκεινται και τα πλεονεκτήματά της : 1) την παραγωγικότητα που εξασφαλίζεται με συνεχή παροχή ηλεκτροδίου , 2) τη σκουριά που προστατεύει και δίνει σχήμα στη ραφή και 3) τα μεταλλουργικά οφέλη που προσφέρει η χρήση της προστατευτικής σκόνης.

Στη μέθοδο FCAW-G το αέριο προστασίας , που συνήθως είναι CO<sub>2</sub> ή μίγμα Ar+CO<sub>2</sub> , προστατεύει το τηγμένο μέταλλο από το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας δημιουργώντας προστατευτικό περίβλημα γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης. Ωστόσο , αυτό δεν είναι απόλυτο , καθώς μπορεί να προκύψει δημιουργία κάποιας ποσότητας οξυγόνου από τη διάσπαση του CO<sub>2</sub> σε CO και O<sub>2</sub> . Στη μέθοδο FCAW-S η προστασία εξασφαλίζεται από τα εξατμιζόμενα στοιχεία της προστατευτικής σκόνης , τα οποία απομονώνουν την περιοχή συγκόλλησης από τον αέρα και από τα στοιχεία σκουριάς τα οποία περιβάλλουν τις τηγμένες μεταλλικές σταγόνες .

Η μέθοδος FCAW είναι συνήθως ημιαυτοματοποιημένη. Ωστόσο , μπορεί να εφαρμοστεί σε πλήρως αυτόματες και ρομποτικές συγκολλήσεις.

### 1.3.2.2 Ιδιότητες και παράμετροι της συγκόλλησης FCAW

Παρακάτω παρατίθενται οι παράμετροι της μεθόδου FCAW και οι τρόποι που επηρεάζουν τη διαδικασία και τα αποτελέσματά της :

**Ταχύτητα συγκόλλησης :** Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα συγκόλλησης , τόσο μικρότερη είναι η εναπόθεση μετάλλου. Αν η τιμή της ταχύτητας είναι πολύ μεγάλη , το προστιθέμενο μέταλλο δε μπορεί να μεταφερθεί αρκετά γρήγορα ώστε να καλύψει τη ραφή , με αποτέλεσμα να δημιουργούνται υποκοπές στην ένωση του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό μέταλλο στο πρόσωπο της συγκόλλησης. Μικρότερες τιμές ταχύτητας αυξάνουν τη διείδυση και το προστιθέμενο μέταλλο που εναποτίθεται.

**Προέκταση του ηλεκτροδίου :** Υπολογίζεται από το σημείο όπου το ηλεκτρόδιο συναντά το σωλήνα επαφής μέχρι το άκρο του όπου ξεκινά το τόξο. Η προέκταση που απαιτείται στη FCAW είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη GMAW , καθώς βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης. Κατά τη διαρροή του ηλεκτροδίου από ρεύμα προκαλείται προθέρμανση της προστατευτικής σκόνης , λόγω της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου. Η προθέρμανση αυτή αυξάνει τη σταθερότητα του τόξου και ελαττώνει τις εκτοξεύσεις (spatter). Αντίθετα , αν η προέκταση είναι πολύ μικρή , η σκόνη δεν έχει προλάβει να προθερμανθεί αρκετά κατά το άναμμα του τόξου , με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζει επαρκή καθαρισμό και κραμάτωση της τηγμένης λίμνης συγκόλλησης. Επίσης , σε αυτή την περίπτωση , μπορεί να προκύψουν εγκλείσματα σκουριάς στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης. Αν η προέκταση είναι πολύ μεγάλη , η σκόνη μπορεί να καεί πριν δράσει , με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν αστάθεια και έντονες εκτοξεύσεις.

**Ένταση του ρεύματος :** Είναι ανάλογη του ρυθμού παροχής του ηλεκτροδίου. Αν η ταχύτητα παροχής προστιθέμενου μετάλλου αυξηθεί , αυξάνεται και η ένταση. Αύξηση της έντασης ρεύματος αυξάνει το ρυθμό εναπόθεσης του ηλεκτροδίου , τη διείδυση και το πλάτος ραφής , εφόσον οι υπόλοιπες

παράμετροι παραμένουν σταθερές. Ένταση μεγαλύτερη της προβλεπόμενης , οδηγεί σε αλλοίωση της ποιότητας συγκόλλησης και σε μεγάλη κυρτότητα της επιφάνειας. Αντίθετα , μικρή ένταση ρεύματος προκαλεί έντονες εκτοξεύσεις και μεταφορά υλικού με μεγάλες σταγόνες. Τα περισσότερα σωληνοειδή ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα να συνδυάζονται με μεταφορά με σταγόνες , αλλά σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος μπορεί να προκύψει μεταφορά τηγμένου μετάλλου με ψεκασμό. Στα σωληνοειδή ηλεκτρόδια με προστασία αερίου , αν χρησιμοποιηθεί αέριο μίγμα , μπορεί να προκύψει αξονική μεταφορά με σταγονίδια σε μεγαλύτερες τιμές έντασης ρεύματος.

**Τάση συγκόλλησης :** Είναι η απόσταση από το άκρο του ηλεκτροδίου μέχρι το μέταλλο βάσης (μήκος του τόξου). Οι μηχανές συγκόλλησης σταθερής τάσης διατηρούν μια συγκεκριμένη τάση σταθερή προκειμένου να είναι σταθερό το μήκος του τόξου. Οι μηχανές σταθερού ρεύματος διαθέτουν αισθητήρες μέτρησης της τάσης συγκόλλησης. Έτσι , ανάλογα με τη μετρούμενη τάση , προσαρμόζεται η ταχύτητα παροχής μετάλλου προκειμένου να διατηρείται σταθερό το μήκος του τόξου και κατ'επέκταση σταθερή τάση στη συγκόλληση. Κάθε ένταση ρεύματος απαιτεί συγκεκριμένη τάση , ώστε να εξασφαλισθεί βέλτιστη ποιότητα συγκόλλησης. Η βέλτιστη τάση για την εφαρμογή εξαρτάται από το μέγεθος του ηλεκτροδίου , το πάχος του βασικού μετάλλου , τη θέση συγκόλλησης , τον τύπο συμβολής και το είδος του αερίου προστασίας (αν χρησιμοποιείται). Πολύ μεγάλη τάση προκαλεί ανομοιόμορφες ραφές και μεγάλα επίπεδα εκτοξεύσεων. Πολύ μικρή τάση προκαλεί μικρή διείσδυση και μικρό πλάτος ραφής καθώς και μεγάλες ποσότητες εκτοξεύσεων.

**Μέγεθος του ηλεκτροδίου :** Η μέθοδος FCAW ενδύκνεται για συγκολλήσεις παχέων ελασμάτων , συνεπώς απαιτεί ηλεκτρόδια μεγαλύτερης διαμέτρου και εξασφαλίζει μεγαλύτερους ρυθμούς εναπόθεσης. Ηλεκτρόδια μικρότερης διαμέτρου δίνουν μεγαλύτερη διείσδυση και υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης για την ίδια ταχύτητα κίνησης και το ίδιο ρεύμα. Αυτό συμβαίνει γιατί η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη για τα μικρότερα ηλεκτρόδια. Παρόλα αυτά , ηλεκτρόδια μεγαλύτερου μεγέθους μπορούν να τρέξουν με μεγαλύτερες εντάσεις ρεύματος , αν το πάχος των προς συγκόλληση τεμαχίων είναι σημαντικό.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο , στη FCAW δύναται να χρησιμοποιηθεί προστασία αερίου , συνήθως CO<sub>2</sub> ή μίγμα Ar+20-25% CO<sub>2</sub> , ακόμη και στην περίπτωση συγκόλλησης με ανοξείδωτο σύρμα. Με το CO<sub>2</sub> η μεταφορά του μετάλλου στο λουτρό της συγκόλλησης γίνεται με χοντρές σταγόνες, ενώ με το μίγμα Ar+20-25% CO<sub>2</sub> η μεταφορά προσεγγίζει τον ψεκασμό λεπτών σταγόνων. Η μεταφορά με βραχυκυκλωμένο τόξο δεν βρίσκει εφαρμογή. Το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν χρησιμοποιείται προστατευτικό αέριο, είναι πάντα DC+, ενώ όταν δε χρησιμοποιείται (κυρίως στην υπαίθρια ηλεκτροσυγκόλληση) ενδέχεται να είναι DC+ ή DC-, ανάλογα με το είδος του σύρματος.



Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων της μεθόδου δίνονται στον πίνακα 1.3 :

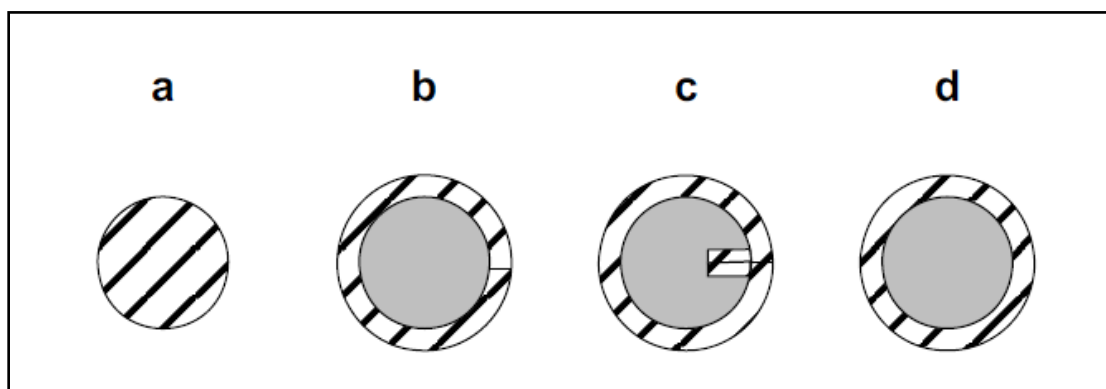
Πίνακας 1.3 : Παράμετροι της μεθόδου FCAW (ενδεικτικές τιμές οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτροδίου)

|  |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Διάμετρος σύρματος (mm)</b>           | 1.0     | 1.2     | 1.4     | 1.6     | 2.4     |
| <b>Τάση τόξου (V)</b>                    | 14-30   | 16-32   | 16-34   | 18-36   | 30-38   |
| <b>Ταχύτητα συγκόλλησης (m/min)</b>      | 2.5-10  | 1.8-12  | 2-9     | 1.5-8.5 | 3-5     |
| <b>Ένταση ηλ.ρεύματος (A)</b>            | 80-250  | 100-320 | 120-380 | 140-450 | 350-500 |
| <b>Ποσότητα απόθεσης μετάλλου (kg/h)</b> | 1.2-4.2 | 1.3-7.5 | 1.6-7.5 | 1.6-8   | 5.5-8.5 |
| <b>Παροχή αερίου (l/min)</b>             | 10-12   | 10-12   | 11-13   | 12-14   | 18-22   |

### 1.3.2.3 Σωληνοειδή ηλεκτρόδια και τυποποίησή τους

Τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια αποτελούνται συνήθως από μεταλλικό , κυλινδρικό , εξωτερικό περίβλημα παρόμοιας σύστασης με το βασικό μέταλλο και από πυρήνα μεταλλικής , προστατευτικής σκόνης , η σύσταση της οποίας εξαρτάται από την κατηγοριοποίηση του ηλεκτροδίου και τον κατασκευαστή του.

Τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των συμπαγών , όπως : υψηλότεροι ρυθμοί εναπόθεσης λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας ρεύματος που τα χαρακτηρίζει , προσθήκη κραματικών στοιχείων στη σκόνη , προστασία της λίμνης συγκόλλησης λόγω της δημιουργίας του προστατευτικού στρώματος σκουριάς , καλύτερη σταθερότητα του τόξου , ανοχή σε λιγότερο καθαρή επιφάνεια του βασικού μετάλλου και , τέλος , ανάγκη για λιγότερο εξειδικευμένο προσωπικό. Μερικά είδη σωληνοειδών ηλεκτροδίων παρουσιάζονται στο σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14 : Εγκάρσιες τομές συνήθων ηλεκτροδίων : a) συμπαγές ηλεκτρόδιο , b-d) σωληνοειδή ηλεκτρόδια [Pires 2006].

Η προστατευτική σκόνη βρίσκεται στεγανά κλεισμένη στο εσωτερικό των σωληνοειδών ηλεκτροδίων. Υπάρχουν δύο μέθοδοι παραγωγής τους. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει πρώτα τη δημιουργία ενός λεπτού ελάσματος σε σχήμα U. Στη συνέχεια συγκεκριμένη ποσότητα σκόνης διοχετεύεται στο διαμορφωμένο έλασμα και ακολούθως συμπιέζεται. Έπειτα , το έλασμα σχήματος U περνάει από μια

σειρά ραούλων και διαμορφώνεται ώστε να πάρει το τελικό του σχήμα και να σφραγιστεί η σκόνη στο εσωτερικό του. Στη δεύτερη μέθοδο παραγωγής, η διαδικασία ξεκινά με σωλήνα χωρίς ραφές, ο οποίος συνήθως έχει διάμετρο 2.54cm (1in). το ένα άκρο του είναι σφραγισμένο, ενώ η είσοδος της σκόνης γίνεται από το ανοιχτό άκρο. Κατά το γέμισμα, ο σωλήνας υφίσταται ταλαντώσεις, ώστε να εξασφαλιστεί 100% πληρότητα σε σκόνη. Μετά την πλήρωση του σωλήνα, σφραγίζεται το ανοιχτό άκρο και όλο το σύστημα διέρχεται από μια σειρά ραούλων προς την τελική του διαμόρφωση. Και στις δύο μεθόδους παραγωγής, ο σωλήνας και το έλασμα παρασκευάζονται από το επιθυμητό κράμα. Επίσης, και στις δύο περιπτώσεις η σκόνη σφραγίζεται και στεγανοποιείται στο εσωτερικό του ηλεκτροδίου, κάτι το οποίο βοηθάει στη σταθερή και ομαλή λειτουργία του ηλεκτροδίου. Τα ηλεκτρόδια διατίθενται σε διαμέτρους από 0.8mm ως 3.9mm. Τα μικρότερης διαμέτρου ηλεκτρόδια είναι σημαντικά πιο ακριβά, καθώς η διαδικασία πλήρωσης τους με σκόνη είναι ακριβότερη. Τα μεγαλύτερης διαμέτρου ηλεκτρόδια παράγουν πολύ μεγάλες ραφές που δε μπορούν να ελεγχθούν σε όλες τις θέσεις. Οι πιο διαδεδομένες διαμέτρους κυμαίνονται από 0.9mm ως 2.3mm.

Όπως είναι φυσικό, τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια υπόκεινται και σε ορισμένους περιορισμούς. Αυτοί είναι οι εξής: Η ποσότητα των παραγόμενων αναθυμιάσεων είναι αρκετά μεγάλη, οι οποίες θεωρούνται τοξικές. Είναι αναγκαία η αφαίρεση της σκουριάς, ειδικά σε συγκολλήσεις με πολλά πάσα. Τέλος, τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια είναι ακριβότερα από τα συμπαγή, αλλά αυτή η διαφορά στο κόστος αντισταθμίζεται από την απόδοσή τους, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλότερους ρυθμούς τήξης σε σχέση με τα συμπαγή.

Γενικά, η προστατευτική σκόνη αποτελείται κυρίως από πυρίτιο (Si), μαγγάνιο (Mn), τιτάνιο (Ti), αλουμίνιο (Al) και ζιρκόνιο (Zr). Τα στοιχεία αυτά έχουν αντιοξειδωτική και αντινιτριδική δράση. Τα κραματικά στοιχεία που περιέχονται συνήθως στον πυρήνα των σωληνοειδών ηλεκτροδίων είναι το νικέλιο (Ni), το βανάδιο (V), το πυρίτιο (Si), το χρώμιο (Cr), το κοβάλτιο (Co) και το μαγγάνιο (Mn). Κάθε ένα από αυτά συμβάλλει στη βελτίωση των χαρακτηριστικών της συγκόλλησης. Αυτά τα συστατικά, υπό τη θερμότητα του τόξου, ενώνονται με το τηγμένο μεταλλικό περίβλημα του ηλεκτροδίου και μεταφέρονται στο βασικό μέταλλο. Στην περίπτωση των αυτοπροστατευόμενων ηλεκτροδίων, τα κύρια στοιχεία της σκόνης, εκτός από μεταλλικά, είναι ανθρακικά και φθοριούχα άλατα καλίου (K) και αλκαλικών γαιών (π.χ ασβέστιο, Ca). Τα φθοριούχα άλατα έχουν χαμηλό σημείο τήξης και είναι αυτά που ατμοποιούνται πρώτα και παρέχουν την απαραίτητη αέρια προστασία γύρω από το ηλεκτρόδιο. Ωστόσο, τα αέρια αυτά είναι άκρως επικίνδυνα για το συγκολλητή λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τοξικού φθορίου και ενώσεών του.

Η προστατευτική σκόνη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο FCAW έχει τις ίδιες ιδιότητες και εξυπηρετεί τους ίδιους σκοπούς με τη σκόνη των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων της μεθόδου SMAW. Παρέχει, δηλαδή, στη συγκόλληση τα εξής:

- **Αποξειδωτικά μέσα (deoxidizers)**, τα οποία ενώνονται με το ελεύθερο οξυγόνο από τη διάσπαση του CO<sub>2</sub> και σχηματίζουν αβλαβείς ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές είτε γίνονται μέρος της προστατευτικής σκουριάς και επιπλέον ή σχηματίζουν πολύ μικρά εγκλείσματα. Σε κάθε περίπτωση, η δέσμευση του οξυγόνου ελαττώνει την εμφάνιση πόρων και βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.
- **Στοιχεία βελτίωσης ροής (fluxing agents)**, τα οποία αυξάνουν τη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης και ευνοούν την κίνησή της προς τις παρειές, ώστε να μην δημιουργούνται υποκοπές.
- **Κραματικά στοιχεία (alloying elements)**, τα οποία προστίθενται στην προστατευτική σκόνη για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες και την αντίσταση σε διάβρωση του μετάλλου συγκόλλησης. Πολλές φορές, τα κραματικά στοιχεία προστίθενται για να αυξήσουν τους ρυθμούς εναπόθεσης τηγμένου μετάλλου.
- **Στοιχεία σχηματισμού σκουριάς (slag formers)**, τα οποία ευνοούν τη δημιουργία προστατευτικού στρώματος πάνω από την τηγμένη λίμνη συγκόλλησης. Στην τηγμένη

κατάσταση , η σκουριά αντιδρά με τις ακαθαρσίες του μετάλλου και τις αφαιρεί. Ακόμη , μπορεί να στερεοποιηθεί σε υψηλή θερμοκρασία συμβάλλοντας στη διατήρηση του σχήματος της συγκόλλησης και στην ελάττωση του ρυθμού απόψυξης της.

- **Σταθεροποιητές τόξου (arc stabilizers)** , δηλαδή χημικές ουσίες που περιέχονται στη σκόνη του ηλεκτροδίου και συμβάλλουν στη σταθερότητα του τόξου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η διεύθυνση , η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου καθώς και το παραγόμενο ποσοστό εκτοξεύσεων.
- **Αέρια προστασία (shielding gas)** , η οποία εξασφαλίζεται από την ατμοποίηση των συστατικών μερών της σκόνης. Με την ατμοποίηση δημιουργείται νέφος προστασίας μεγάλου όγκου, που προστατεύει τη συγκόλληση από οξείδωση.

Η τυποποίηση που υποχρεωτικά ισχύει στη χώρα μας είναι κατά ISO, EN και ΕΛΟΤ. Στην πράξη , όμως , στην τεχνολογία των συγκολλήσεων , είναι διαδεδομένη και η πολύ απλή τυποποίηση κατά AWS. Το χαρακτηριστικό της τυποποίησης κατά AWS είναι η απλότητά της και η ευκολία απομνημόνευσης που προσφέρει. Επίσης , πρόκειται για ένα πλήρες σύστημα τυποποίησης , όπου συμπεριλαμβάνονται τα πάντα , όπως π.χ. η τυποποίηση των ηλεκτροδίων του αλουμινίου και των χυτοσιδήρων για τα οποία δεν υπάρχουν αντίστοιχα πρότυπα κατά ISO. Η τυποποίηση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων είναι αρκετά πιο περίπλοκη από εκείνη των συμπαγών λόγω των πολλών δυνατών συνδυασμών που υπάρχουν , χωρίς όμως να φθάνει την περιπλοκότητα των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων.

## Τυποποίηση κατά EN

### α. Τυποποίηση σωληνοειδών ηλεκτροδίων ανθρακούχων και λεπτόκοκκων χαλύβων

Η τυποποίηση γίνεται με βάση το πρότυπο EN-758. Δεν υπάρχει πρότυπο ISO για τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια. Το βασικότερο σημείο που διαφοροποιείται η τυποποίηση από αυτή των συμπαγών ηλεκτροδίων, είναι ότι προτάσσεται το γράμμα T αντί του G.

Παράδειγμα συμβολισμού : το ηλεκτρόδιο T424BC

Το 42 σημαίνει όριο ελαστικότητας 420 Μpa, το 4 ότι η δυσθραυστότητα είναι 47 J , όταν η θερμοκρασία είναι -30°C και το C σημαίνει ότι το αέριο προστασίας είναι το CO<sub>2</sub>. Δηλαδή , αυτά έχουν την ίδια σημασία που έχουν και στα συμπαγή σύρματα. Όταν δεν απαιτείται αέριο υπάρχει το γράμμα N. Οι συμβολισμοί για τα αέρια προστασίας φαίνονται στον πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4 : Συμβολισμοί αερίων προστασίας

| Αέριο                     | Συμβολισμός |
|---------------------------|-------------|
| Ar+20-25% CO <sub>2</sub> | M           |
| CO <sub>2</sub>           | C           |
| Χωρίς αέριο               | N           |

Το στοιχείο «B» στο συμβολισμό σημαίνει ότι το ηλεκτρόδιο είναι παραγεμισμένο με σκόνη συλλιπάσματος. Για συλλίπασμα ρουτιλίου χρησιμοποιείται το R ή το P, ενώ για γέμιση με σκόνη σιδήρου το M. Στην τελευταία περίπτωση δεν υπάρχει προστατευτική σκουριά από το συλλίπασμα. Στον πίνακα 1.5 φαίνονται όλα τα είδη συλλιπάσματος των σωληνοειδών ηλεκτροδίων.

Πίνακας 1.5 : Συμβολισμοί , απαιτήσεις και ιδιότητες για το είδος του περιεχόμενου συλλιπάσματος

| Σύμβολο | Περιγραφή                 | Απαιτήσεις αερίου | Ιδιότητες                            |
|---------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| K       | Ρουτιλίου                 | Ναι               | Σκουριά βραδείας πήξης               |
| P       | Ρουτιλίου                 | Ναι               | Σκουριά ταχείας πήξης                |
| B       | Βασικό                    | Ναι               |                                      |
| M       | Μεταλλική (σκόνη σιδήρου) | Ναι               | Χωρίς σκουριά από το συλλίπασμα      |
| V       | Βασικό ή Ρουτιλίου        | Όχι               | Ακατάλληλο για ραφή με πολλαπλά πάσα |
| W       | Βασικό ή Ρουτιλίου        | Όχι               | Σκουριά βραδείας πήξης               |
| Y       | Βασικό ή Ρουτιλίου        | Όχι               | Σκουριά ταχείας πήξης                |
| Z       | Οτιδήποτε άλλο            |                   |                                      |

Εκτός από τα παραπάνω ενδέχεται να υπάρχουν και δύο προαιρετικοί συμβολισμοί. Παράδειγμα συμβολισμού με τα προαιρετικά σύμβολα: το T424BC1H5

- Το «1», που ακολουθεί το σύμβολο του αερίου, σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι δυνατή σε όλες τις θέσεις. Αν υπάρχει το «3», σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι δυνατή μόνο στις θέσεις PA, PB, PC (συμβολισμοί κατά ISO για την επίπεδη, επίπεδη υπό γωνία και μετωπική συγκόλληση, αντίστοιχα). Αν και υπάρχουν και άλλα σύμβολα για τις θέσεις συγκόλλησης, όπως φαίνονται στον πίνακα 1.6 , στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως σύρματα που εμπίπτουν στις κατηγορίες «1» και «3».
- Όταν το σύρμα (ηλεκτρόδιο) είναι χαμηλού υδρογόνου , υπάρχει επιπλέον ο συμβολισμός Hx που σημαίνει ότι περιέχονται το πολύ μέχρι  $x \text{ cm}^3$  αερίου ανά 100 g προστιθέμενου μετάλλου (όπως και στα επικαλυμμένα ηλεκτρόδια κατά ISO ή EN). Το x μπορεί να είναι 5 , 10 ή 15.

Πίνακας 1.6 : συμβολισμός των θέσεων συγκόλλησης σωληνοειδών ηλεκτροδίων κατά EN 758

| Ψηφίο | Θέσεις συγκόλλησης για τις οποίες προορίζεται το ηλεκτρόδιο        |
|-------|--|
| 1     | Κατάλληλο για συγκόλληση σε όλες τις θέσεις                        |
| 2     | Κατάλληλο για όλες τις θέσεις εκτός της PG (κατακόρυφης με κάθοδο) |
| 3     | Κατάλληλο μόνο για PA , PB , PC                                    |
| 4     | Κατάλληλο μόνο για PA , PB   |
| 5     | Κατάλληλο PA , PB , PC , PG  |

Στην περίπτωση που υπάρχουν προσμίξεις και άλλων μεταλλικών στοιχείων , τότε αυτές αναφέρονται πριν από το γράμμα που υποδηλώνει τη γέμιση του σύρματος. Παράδειγμα :

T4641NiPM1H5: με 1% Ni

T46AMoPM1H5: περιέχει Mo (κάτω του 1%, συνήθως είναι γύρω στο 0,5%)

T46AZPM1H5: περιέχει προσμίξεις που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις τυποποιημένες προσμίξεις που προβλέπει το πρότυπο και πρέπει να προδιαγράφονται από τον προμηθευτή του ηλεκτροδίου.

Οι τυποποιημένοι συνδυασμοί προσμίξεων είναι οι: Mo, MnMo, 1Ni, 2Ni, 3Ni, Mn1Ni και 1NiMo. Όταν η σύσταση του εναποτιθέμενου μετάλλου δεν ανήκει σε κάποιον από αυτούς τους τυποποιημένους συνδυασμούς , χρησιμοποιείται το Z.

Εκτός από το πρότυπο EN-758, υπάρχουν ακόμη δύο πρότυπα , τα EN-12071 και EN-12535 , που αναφέρονται σε σωληνοειδή ηλεκτρόδια ελαφρά κραματωμένων χαλύβων για ειδικές εφαρμογές. Ο τρόπος τυποποίησης των σωληνωτών συρμάτων σε αυτά τα πρότυπα μοιάζει αρκετά με τον τρόπο που γίνεται στο EN-758 , αλλά έχουν διαφορετικούς τυποποιημένους συνδυασμούς προσμίξεων.

Παραδείγματα ονομασίας:

- Κατά EN-12071: TCrMo1BC3H5 (δεν υπάρχουν σύμβολα για την αντοχή και τη δυσθραυστότητα)
- Κατά EN-12535: T696Mn2NiCrMoBC53H5 , T894ZBM3H5 (έχουν υψηλά όρια ελαστικότητας)

#### β. Ανοξειδωτα σωληνοειδή ηλεκτρόδια κατά EN

Η τυποποίηση των ανοξειδωτων σωληνωτών συρμάτων ακολουθεί το πρότυπο EN-12072. Οι ονομασίες είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν για τα σωληνωτά ηλεκτρόδια των ανθρακούχων χαλύβων , έχοντας και τους ίδιους συμβολισμούς για το συλλίπασμα , το αέριο και τη θέση συγκόλλησης. Παράδειγμα ονομασίας: T119RLM1.

### Τυποποίηση κατά AWS

Η τυποποίηση των σωληνοειδών ηλεκτροδίων κατά AWS , για τις συγκολλήσεις ανθρακομαγνητιούχων χαλύβων γίνεται με τη βοήθεια του παρακάτω ορισμού:

E X X T - XX π.χ. E 7 0 T - 11

όπου:

- Στην πρώτη θέση , το γράμμα E υποδεικνύει την ύπαρξη ηλεκτροδίου.
- Στη δεύτερη θέση εισάγεται αριθμός , ο οποίος πολλαπλασιασμένος επί 10 , δίνει την αντοχή του ηλεκτροδίου σε εφελκυσμό.
- Στην τρίτη θέση εισάγεται είτε ο αριθμός 0 είτε ο αριθμός 1 , και υποδεικνύουν τη θέση συγκόλλησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ηλεκτρόδιο. Το 0 αντιστοιχεί σε επίπεδες και οριζόντιες θέσεις , ενώ το 1 χρησιμοποιείται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- Στην τέταρτη θέση , το γράμμα T υποδεικνύει σωληνοειδές ηλεκτρόδιο.
- Ο αριθμός στην πέμπτη θέση (X = 1-14) υποδηλώνει τη χρήση του ηλεκτροδίου. Στο άνωθεν παράδειγμα , ο αριθμός 11 αντιστοιχεί σε ηλεκτρόδιο το οποίο κατά την τήξη του μεταφέρεται στη λίμνη συγκόλλησης με τη μέθοδο των σταγονιδίων , χρησιμοποιείται με συνεχές εύμα ανάστροφης πολικότητας , δύναται να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης και είναι κατάλληλο για υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και πολλαπλά πάσα.
- Η έκτη θέση υποδηλώνει το είδος της προστασίας. Για προστασία αέριου μίγματος Ar+20-25% CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται το γράμμα M , για προστασία αερίου 100% CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται το γράμμα C , ενώ αν η θέση είναι κενή δε χρησιμοποιείται αέρια προστασία.

Η τυποποίηση ,κατά AWS, για τον πυρήνα σωληνοειδών ηλεκτροδίων δίνεται από τα ακόλουθα πρότυπα:

|                |  |
|----------------|--|
| AWS A5.20-1979 | → Ηλεκτρόδια ανθρακούχου χάλυβα                      |
| AWS A5.22-1980 | → Ηλεκτρόδια με πυρήνα χρωμίου και χρωμίου-νικελίου. |
| AWS A5.29-1980 | → Ηλεκτρόδια χαμηλά κραματωμένων χαλύβων.            |

#### 1.3.2.4 Τυπικά σφάλματα μεθόδου FCAW

Τα συνηθέστερα σφάλματα που εντοπίζονται σε συγκολλήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με σωληνοειδή ηλεκτρόδια , αναλύονται στη συνέχεια :

**Εμφάνιση πόρων :** Μπορεί να προκύψουν από υγρασία στην προστατευτική σκόνη , από ύπαρξη ακαθαρσιών στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης ή από ακατάλληλο χειρισμό του πιστολιού συγκόλλησης.

Εξαιτίας της ευαισθησίας της προστατευτικής σκόνης στην υγρασία του περιβάλλοντος , τα ηλεκτρόδια πρέπει να αποθηκεύονται σε χώρους με ξηρή ατμόσφαιρα. Ειδικά τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στην απορρόφηση υγρασίας από το περιβάλλον. Γενικά αν η πάσα απορροφήσει υγρασία , η αφαίρεσή της είναι πάρα πολύ δύσκολη. Το νερό , υπό την παρουσία του τόξου , διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο μπορεί να απορροφηθεί από τη λίμνη συγκόλλησης , ενώ το οξυγόνο ευνοεί το σχηματισμό οξειδίων.

Τα χαλύβδινα ελάσματα που έχουν υποστεί θερμή έλαση καλύπτονται συνήθως από ένα σκούρο γκρι ή μαύρο επιφανειακό στρώμα οξειδίων του σιδήρου. Παρόλο που το στρώμα αυτό είναι αρκετά λεπτό , μπορεί να αποτελέσει πηγή επαρκούς ποσότητας οξυγόνου που θα προκαλέσει εμφάνιση πόρων στη



συγκόλληση. Οι πόροι που δημιουργούνται από το στρώμα αυτό των οξειδίων συνήθως κατανέμονται ομοιόμορφα στο μέταλλο συγκόλλησης. Αν, όμως, το στρώμα οξειδίων έχει μεγάλο πάχος, οι πόροι δεν είναι ορατοί στην επιφάνεια της συγκόλλησης, καθώς βρίσκονται κάτω από αυτή. Σε κάθε περίπτωση, τα οξείδια πρέπει να αφαιρούνται από την επιφάνεια του βασικού μετάλλου πριν τη συγκόλληση.

Στη FCAW-G, το πιστόλι πρέπει να βρίσκεται αρκετά κοντά στη λίμνη συγκόλλησης προκειμένου να εξασφαλίζεται επαρκής αέρια προστασία. Αν κατά τη διαδικασία συγκόλλησης υπάρχουν ισχυρά ρεύματα αέρα ή το πιστόλι δεν είναι επαρκώς κοντά στη λίμνη συγκόλλησης, δεν εξασφαλίζεται κατάλληλη αέρια προστασία, με αποτέλεσμα τον κίνδυνο εμφάνισης πόρων. Αν η συγκόλληση πραγματοποιείται σε εξωτερικό χώρο ή σε περιοχή με ρεύματα, είναι αναγκαία η αύξηση της παροχής του αερίου προστασίας ή η χρήση ανεμοθώρακα.

Ένα πολύ κοινό σφάλμα στη μέθοδο FCAW είναι ένα είδος πόρων που ονομάζεται «worm tracks». Το φαινόμενο εκδηλώνεται ως μια γραμμική επιφάνεια κενών κοντά στην κεντρική γραμμή συγκόλλησης, παράλληλα με την επιφάνεια ραφής. Κύρια αιτία του φαινομένου είναι ο εγκλεισμός αερίων στο μέταλλο συγκόλλησης κατά τη στερεοποίηση της συγκόλλησης. Το προστατευτικό στρώμα σκουριάς στερεοποιείται πριν προλάβουν τα αέρια να δραπετεύσουν εντελώς από το μέταλλο συγκόλλησης, με αποτέλεσμα να παγιδεύονται ανάμεσα στη σκουριά και τη λίμνη συγκόλλησης. Έτσι, δημιουργείται η επιφάνεια πόρων που φαίνεται στην εικόνα 1.3. Η εμφάνιση πόρων αυτής της μορφής είναι πιθανότερη όταν χρησιμοποιείται αέρια προστασία μίγματος Ar/CO<sub>2</sub>, παρά 100% CO<sub>2</sub>.



Εικόνα 1.3 : Γραμμική ένωση πόρων, γνωστή ως «worm tracks».

Αιτίες του φαινομένου μπορεί να είναι μια ή περισσότερες από τις εξής :

- Υγρασία από ακαθαρσίες στο εσωτερικό ή στην επιφάνεια του βασικού μετάλλου.
- Υγρασία στο μέταλλο συγκόλλησης που μπορεί να εισέλθει και από το ίδιο το ηλεκτρόδιο.
- Μεγάλη παροχή αερίου, με αποτέλεσμα την πρόκληση τυρβώδους ροής και, ως εκ τούτου, εισροή ατμοσφαιρικού αέρα στην περιοχή του τόξου.
- Απορρόφηση ακαθαρσιών από το μέταλλο συγκόλλησης, λόγω διαρροής στους σωλήνες παροχής αερίου προστασίας.
- Λιγότερο πιθανό, το αέριο προστασίας να έχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας ή υψηλό σημείο υγροποίησης.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου λαμβάνονται οι απαραίτητες προφυλάξεις για την κάθε μια από τις προαναφερθείσες αιτίες. Κατ'αρχάς είναι απαραίτητος ο καθαρισμός των επιφανειών των προς συγκόλληση τεμαχίων πριν την έναρξη της διαδικασίας. Πρέπει να απομακρυνθούν, δηλαδή,

υπολείμματα ελαίου , λιπαντικών ή γράσου , που μπορεί να έχουν μείνει από την κατεργασία των τεμαχίων. Επίσης είναι πολύ σημαντικός ο έλεγχος των σωληνώσεων μεταφοράς αερίου για τυχόν διαρροές , καθώς και ο έλεγχος του ρυθμού παροχής του αερίου κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Επιπλέον , είναι αναγκαίο τα ηλεκτρόδια να φυλάσσονται σε ξηρό μέρος. Στην περίπτωση που το ηλεκτρόδιο έχει απορροφήσει υγρασία , μπορεί να τοποθετηθεί σε φούρνο συγκεκριμένης θερμοκρασίας για ένα χρονικό διάστημα , ώστε να επανέλθει στην επιθυμητή κατάσταση. Τέλος , απαραίτητη είναι η εκλογή του κατάλληλου ηλεκτροδίου κατά περίπτωση.

**Εμφάνιση ρωγμών :** Οφείλεται σε υπέρμετρη εντατική κατάσταση της ραφής , χρήση ακατάλληλου ηλεκτροδίου και ανεπαρκή ποσότητα αποξειδωτικών στοιχείων στον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Για την πρόληψη του φαινομένου , θα πρέπει να εξασφαλίζεται ραφή με όσο το δυνατόν μικρότερες παραμένουσες τάσεις και να χρησιμοποιείται αρκετά όγκιμο βασικό μέταλλο. Επίσης , κατά την επιλογή του ηλεκτροδίου , πρέπει να ελέγχεται η σύσταση της προστατευτικής σκόνης.

**Ατελής τήξη και ατελής διείσδυση :** Τα συγκεκριμένα προβλήματα προκύπτουν από εφαρμογή ακατάλληλων παραμέτρων συγκόλλησης , λανθασμένο σχεδιασμό της συμβολής συγκόλλησης και λανθασμένους χειρισμούς. Αν η επιλογή των παραμέτρων είναι ακατάλληλη , θα πρέπει να γίνουν αλλαγές σε ρεύμα και ταχύτητα παροχής ηλεκτροδίου , ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα της συγκόλλησης. Αν ο σχεδιασμός της συμβολής είναι λάθος , θα πρέπει να γίνει αλλαγή στο άνοιγμα της ρίζας. Τέλος , ο ακατάλληλος χειρισμός οδηγεί σε λανθασμένη τοποθέτηση του ηλεκτροδίου ως προς τη λίμνη συγκόλλησης , οπότε θα πρέπει να τοποθετηθεί στην κατάλληλη θέση.

### 1.3.2.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής :

- Καλή όψη ραφής και μικρά ποσοστά εκτοξεύσεων.
- Υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης.
- Καλές μηχανικές ιδιότητες συγκόλλησης.
- Δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.
- Στην περίπτωση της FCAW-G , πολύ υψηλή απόδοση των ηλεκτροδίων (άνω του 90%) , πολύ μικρά ποσοστά υδρογόνου στο μέταλλο συγκόλλησης και εύκολο άναμμα τόξου.
- Στην περίπτωση της FCAW-S , πολύ εύκολη η εφαρμογή της σε εξωτερικούς χώρους και με περιορισμένες επανενάψεις του τόξου. Επίσης , δεν απαιτεί μεγάλη καθαρότητα μετάλλου βάσης και , τέλος , μειώνεται σημαντικά το κόστος της διαδικασίας , καθώς δε χρησιμοποιείται αέρια προστασία.

Ωστόσο , υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή :

- Αρκετά υψηλά ποσοστά αναθυμιάσεων.
- Είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της σκουριάς μετά το πέρας της διαδικασίας , κάτι το οποίο είναι αρκετά χρονοβόρο , ειδικά σε συγκολλήσεις με πολλαπλά πάσα.
- Στην περίπτωση της FCAW-G , η συγκόλληση σε εξωτερικό χώρο παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες.
- Στην περίπτωση της FCAW-S , μπορεί να παρουσιαστούν εκτοξεύσεις μετάλλου , ενώ , προκειμένου να γίνει επανένωση του τόξου πρέπει να κοπεί ένα μέρος της προέκτασης του ηλεκτροδίου.



### 1.3.3 Συγκόλληση με Laser [7][8][13][25][40][41][43][44][45][46]

#### 1.3.3.1 Αρχή λειτουργίας Laser

Ο όρος “LASER” προέκυψε ως ακρωνύμιο των λέξεων της φράσης “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” που αποδίδεται στα ελληνικά ως «ενίσχυση φωτός με διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας». Το Laser αποτελεί μία ειδική δέσμη φωτεινής ακτινοβολίας, που δεν υπάρχει σε φυσικές συνθήκες, αλλά παράγεται μόνο στο εργαστήριο με ειδικό τεχνολογικό εξοπλισμό. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί τύποι Laser, διαφορετικοί ως προς τα χαρακτηριστικά και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, υπάρχουν ορισμένες βασικές αρχές στη λειτουργία τους που είναι κοινές για όλους τους τύπους.

Ειδικότερα, το Laser αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία :

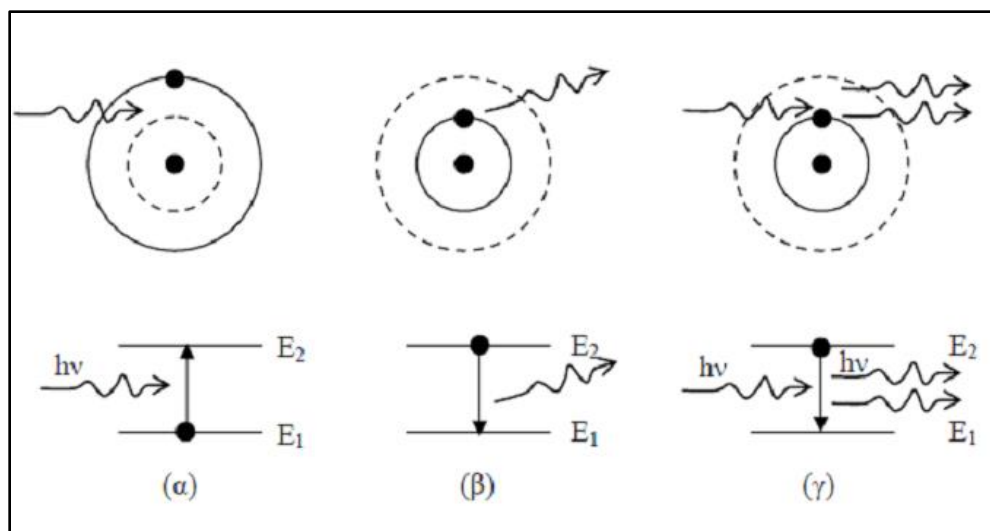
- Το ενεργό μέσο ή μέσο ενίσχυσης
- Την πηγή άντλησης
- Την οπτική κοιλότητα ή κοιλότητα συντονισμού ή οπτικό αντηχείο

**Ενεργό μέσο :** Η ύλη και το φως, ως γνωστόν, αλληλεπιδρούν. Όταν ένα άτομο ύλης εκτίθεται σε μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η κατανομή του ηλεκτρικού του φορτίου επηρεάζεται περιοδικά από την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας. Συνεπώς, λαμβάνει χώρα μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στα φωτόνια και το άτομο.

Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις αλληλεπιδράσεως :

- Θεωρούμε ένα άτομο που χαρακτηρίζεται από τις ενεργειακές στάθμες  $E_1$  και  $E_2$  ( $E_1 < E_2$ ), και έστω ότι προσπίπτει σε αυτό ακτινοβολία κάποιας ενέργειας με την οποία αλληλεπιδρά. Τότε, το άτομο περνάει από τη στάθμη  $E_1$  στη διεγερμένη στάθμη  $E_2$ . Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **απορρόφηση** και είναι αναστρέψιμη, οπότε συνοδεύεται από εκπομπή φωτός.
- Ως γνωστόν, η θεμελιώδης στάθμη είναι η σταθερότερη. Αυτό σημαίνει ότι μετά την πάροδο κάποιου χρόνου, το διεγερμένο άτομο αποδιεγείρεται αυθόρμητα στη θεμελιώδη στάθμη. Αποδίδει λοιπόν ενέργεια ίση με  $E_2 - E_1$  υπό μορφή ενός φωτονίου με τέτοια συχνότητα, ώστε  $h\nu = E_2 - E_1$ . Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας**.
- Επιπλέον, αν στο διεγερμένο άτομο προσπέσει ένα φωτόνιο που προέρχεται από το εξωτερικό του ατόμου και που έχει ακριβώς την ίδια ενέργεια με αυτήν του φωτονίου που προέρχεται από την μετάβαση από τη στάθμη  $E_2$  στη στάθμη  $E_1$ , το άτομο εκπέμπει ένα δεύτερο φωτόνιο. Το προσπίπτον και το εκπεμπόμενο φωτόνιο έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά (διεύθυνση, συχνότητα, φάση, πόλωση). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **εξαναγκασμένη εκπομπή**. Η λήψη laser επιτυγχάνεται χάρη στην εξαναγκασμένη εκπομπή.

Το μέσο μέσα στο οποίο μπορούμε να έχουμε εκπομπή Laser ονομάζεται ενεργό μέσο και μπορεί να βρίσκεται σε στερεά, υγρά ή αέρια φάση.



Σχήμα 1.15 : (α) Εξαναγκασμένη απορρόφηση , (β) Αυθόρμητη εκπομπή , (γ) Εξαναγκασμένη εκπομπή

**Πηγή άντλησης :** Σύμφωνα με τη θεωρία των ενεργειακών καταστάσεων, η αντιστροφή πληθυσμών, η οποία είναι και απαραίτητη για τη λήψη δράσης laser, απαιτεί τη διέγερση ατόμων σε ένα ανώτερο επίπεδο ενέργειας , κάτι το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Αυτό ονομάζεται άντληση. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι άντλησης, όπως :

- Οπτική
- Ηλεκτρονική
- Χημική
- Θερμική
- Με βαρέα στοιχεία
- Με ιονίζουσες ακτινοβολίες

**Οπτική κοιλότητα :** Η ενίσχυση του φωτός εξαρτάται εκτός από την ισχύ της πηγής εξωτερικής άντλησης και από την αύξηση των διαστάσεων του ενεργού μέσου. Αυτό έχει προφανώς περιορισμένες διαστάσεις , οπότε και πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία η οποία θα επιτρέπει την εκμετάλλευση πολλαπλών περασμάτων της εξαναγκασμένης ακτινοβολίας μέσα από το εκάστοτε μέσο ενίσχυσης. Το παραπάνω το επιτυγχάνουμε χρησιμοποιώντας μια κοιλότητα συντονισμού η οποία αποτελείται από δυο κάτοπτρα, εκ των οποίων το ένα, ημιπερατό, επιτρέπει σε κάποιο ποσοστό της ακτινοβολίας να εξέλθει, στέλνοντας εξ ανακλάσεως το υπόλοιπο ποσοστό μέσα στο ενεργό μέσο, τα διεγερμένα άτομα του οποίου και παράγουν εκ νέου εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Αυτή η κοιλότητα ονομάζεται και οπτικό αντηχείο, εφόσον οι περιοχές συχνότητας που μας απασχολούν ανήκουν στο υπέρυθρο, το ορατό ή το υπεριώδες.

Τα χαρακτηριστικά μιας δέσμης Laser είναι τα εξής :

- **Συμφωνία φάσης :** Είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της δέσμης laser. Μια ακτινοβολία ονομάζεται συμφωνική χωρικά ή χρονικά, όταν μπορούμε να υπολογίσουμε τη φάση του κύματος και το πλάτος του, για κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο, ξεκινώντας από κάποιες γνωστές τιμές. Η συμφωνία φάσης μπορεί να διακριθεί σε χρονική και χωρική.
- **Κατευθυντικότητα :** Οι συμβατικές πηγές φωτός εκπέμπουν ακτινοβολία σε όλες τις διευθύνσεις. Συνεπώς η ένταση της ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο του χώρου μειώνεται με το τετράγωνο της απόστασης αυτού του σημείου από την πηγή. Έτσι, λόγω των ιδιοτήτων του αντηχείου, εκπομπή φωτός πραγματοποιείται μόνο παράλληλα και πολύ κοντά στον οπτικό άξονα της κοιλότητας.
- **Πυκνότητα ισχύος :** Η ένταση της δέσμης μπορεί να είναι πολύ ψηλή, καθώς η αποδιδόμενη ενέργεια είναι εστιασμένη σε μια πολύ μικρή επιφάνεια. Η λειτουργία ενός laser μπορεί να είναι συνεχής ή παλμική. Για την παλμική λειτουργία, η ενέργεια αποδίδεται σε έναν παλμό ή σε μια σειρά επαναλαμβανόμενων παλμών. Δεδομένου ότι η διάρκεια ενός παλμού μπορεί να είναι της τάξης των  $10^{-9}$  sec, η ισχύς είναι πάρα πολύ μεγάλη (1MW) ακόμα και αν η συνολική αποδιδόμενη ενέργεια είναι πολύ χαμηλή ( $10^{-3}$  J).
- **Ενεργειακή κατανομή στο χώρο :** Η κατανομή της ενέργειας σε μια διατομή μιας δέσμης laser καθορίζει την ενεργειακή της κατανομή. Η μορφολογία της ενεργειακής κατανομής καθορίζεται από τη διαμόρφωση του αντηχείου. Διάφορες μορφολογίες είναι εφικτές κάτω από την ονομασία Transverse Electromagnetic Mode ή Εγκάρσιος Ηλεκτρομαγνητικός Ρυθμός. Οι δείκτες  $x$ ,  $y$  είναι θετικοί ακέραιοι και εκφράζουν τις κατανομές έντασης κατά μήκος των δυο αξόνων  $x$ ,  $y$  κάθετων στον άξονα  $z$  (ο άξονας της δέσμης).

### 1.3.3.2 Τύποι Laser

Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα Laser χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες με τη σειρά τους σε υποομάδες, ως εξής :

1. Τα Laser στερεάς κατάστασης, που χωρίζονται σε :
  - i. Μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη, σαπφείρου).
  - ii. Ημιαγωγών (διόδων).
2. Τα Laser αερίων, που χωρίζονται σε :
  - i. Ατομικά (π.χ. He-Ne, He-Cd).
  - ii. Μοριακά ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , χημικά, μακρινού υπερύθρου, excimer).
  - iii. Ατμών μετάλλου (Cu, Au).
  - iv. Ιοντικά ( $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Kr}^+$ ).
3. Τα υγρά Laser, τα οποία είναι κυρίως χρωστικών dye.
4. Τα ειδικά Laser, όπως :
  - i. Ακτίνων X.
  - ii. Ελεύθερου ηλεκτρονίου.

### 1.3.3.2.1 Laser στερεάς κατάστασης

Τα άτομα στη στερεά κατάσταση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν. Γι' αυτό το εύρος των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των αερίων. Ευρύ φάσμα απορρόφησης σημαίνει πως η προσφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από πηγή φωτός και μάλιστα όχι απαραίτητα laser.

Το ενεργό υλικό στο laser στερεάς κατάστασης είναι ένα συγκεκριμένο υλικό, στο οποίο έχει γίνει έγχυση άλλου υλικού με τη μορφή ιόντων. Τα ιόντα του υλικού πρόσμιξης αντικαθιστούν άτομα του υλικού βάσης και είναι αυτά που παρέχουν τα κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα για τη μεταπήδηση laser. Το υλικό βάσης επηρεάζει λίγο το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το ίδιο υλικό πρόσμιξης σε δύο διαφορετικά υλικά βάσης έχει ως αποτέλεσμα παρόμοια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία laser. Το υλικό βάσης καθορίζει, όμως, τις φυσικές ιδιότητες του ενεργού υλικού, όπως θερμοχωρητικότητα, διαστολή και επομένως τη μέγιστη δυνατή εκπεμπόμενη ισχύ.

Το στερεό ενεργό υλικό που διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία είναι κρύσταλλος ή γυαλί, συνήθως σε σχήμα κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο. Η ενέργεια εισέρχεται από την παράπλευρη επιφάνεια, ενώ το laser εξέρχεται από μια από τις βάσεις.

Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή laser με παλμούς είναι συνήθως από λάμπες ξένου ή κρυπτού χαμηλής πίεσης. Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή συνεχούς laser είναι συνήθως από λάμπες αλογόνου ή υδραργύρου υψηλής πίεσης. Τα τελευταία χρόνια εξελίχθηκε και η τεχνολογία των laser διόδων τα οποία έχουν εφαρμογή και στην προσφορά ενέργειας για laser στερεάς κατάστασης, επειδή το μήκος κύματος των laser διόδων μπορεί να προσαρμοστεί και να ταιριάζει στο φάσμα απορρόφησης του ενεργού (στερεού) υλικού.

### 1.3.3.2.2 Laser αερίων

Τα περισσότερα αέρια (άτομα ή μόρια) μπορούν να οδηγηθούν σε κατάσταση κατάλληλη για εκπομπή laser, κυρίως όταν βρίσκονται υπό χαμηλή πίεση.

Η ύπαρξη χαμηλής πίεσης διευκολύνει τη διαδικασία για τους εξής δύο λόγους :

- για να είναι δυνατή η ηλεκτρική εκκένωση μακράς πορείας, κατά μήκος του σωλήνα με το ενεργό υλικό, στα δυο άκρα του οποίου εμβαπτίζονται τα δύο ηλεκτρόδια.
- για να παραχθεί ηλεκτρομαγνητικό φάσμα πολύ μικρού εύρους, το οποίο ευρύνεται όταν παρεμβάλλονται συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων.

Τα αέρια Laser μπορούν να διεγερθούν με ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται με εφαρμογή υψηλού δυναμικού στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα. Ηλεκτρόνια αποσπώνται από την κάθοδο, επιταχύνονται προς την άνοδο, συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και τους μεταδίδουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας διεγείροντάς τα (η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται στις λάμπες φθορισμού).

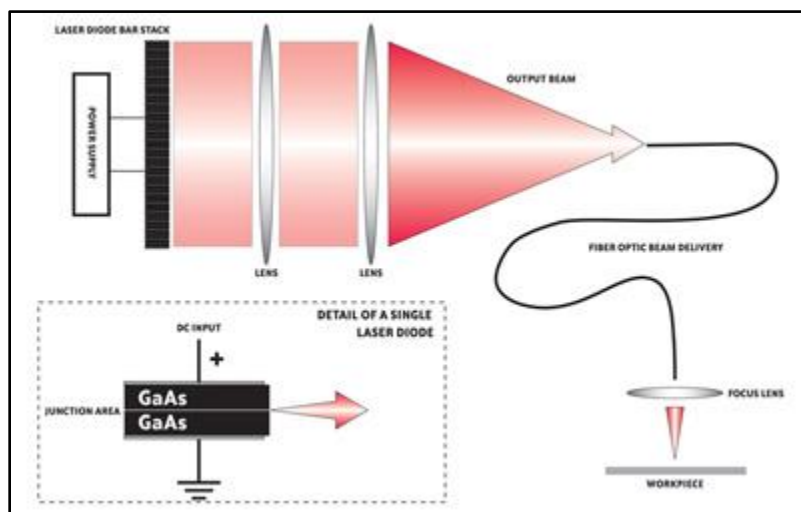
Η οπτική άντληση ως μέθοδος διέγερσης είναι δύσκολη για τα laser αερίου. Για να απορροφηθεί αρκετό ποσό ενέργειας απαιτείται το φάσμα απορρόφησης του υλικού να είναι παρόμοιο με το φάσμα εκπομπής της πηγής. Όμως οι κοινές πηγές φωτός έχουν ευρύ φάσμα εκπομπής, ενώ τα άτομα του αερίου απορροφούν σε «λεπτές γραμμές». Γενικά η οπτική άντληση δεν επιλέγεται για τη διέγερση του ενεργού υλικού αερίων laser. Εξάιρεση είναι η χρήση της δέσμης laser CO<sub>2</sub> για την οπτική άντληση του ενεργού υλικού του μακρινού υπέρυθρου αερίου laser.

### 1.3.3.2.3 Laser ημιαγωγών , διόδων (Semiconductor/Diode Laser)

Τα laser διόδων είναι πολύπλοκοι ημιαγωγοί οι οποίοι μετατρέπουν ηλεκτρικό ρεύμα σε φως. Η διαδικασία μετατροπής είναι αρκετά αποδοτική κατά το ότι παράγει μικρό ποσό θερμότητας συγκρινόμενο με το λαμπρό φως.

Όταν το ρεύμα περνάει μέσα από μία ημιαγωγή ένωση , προκαλείται μία αναστροφή πληθυσμού (population inversion) , στην οποία τα ηλεκτρόνια στη στοιβάδα αγωγιμότητας (conduction band) ξεπερνούν αυτά που βρίσκονται στη στοιβάδα σθένους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι πιο πιθανή η πτώση ενός ηλεκτρονίου από την στοιβάδα αγωγιμότητας στη στοιβάδα σθένους παράγοντας ένα επιπλέον φωτόνιο , από ότι το αντίστροφο. Έτσι , όταν το φως διέρχεται από μία τέτοια ένωση , αυξάνεται η έντασή του. Τα τοιχώματα της κοιλότητας laser είναι απέναντι το ένα από το άλλο , έτσι ώστε η μεγαλύτερη ποσότητα από το ενισχυμένο φως να ανακλαστεί μέσα στην κοιλότητα, όπου θα ενισχυθεί επιπλέον. Αν η απώλεια στη διαδρομή επιστροφής του φωτός είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες στο τέλος της κοιλότητας , τότε θα δημιουργηθούν περιοδικές μεταβολές στη συχνότητα. Οι συχνότητες στις οποίες δημιουργούνται αυτές οι μεταβολές καθορίζονται από τις διαστάσεις της κοιλότητας.

Σε γενικές γραμμές , οι μεταβολές αυτές θα δημιουργηθούν σε κάθε συχνότητα , όπου το μήκος της κοιλότητας είναι ένα ακέραιο πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος , με την προϋπόθεση ότι στη διαδρομή επιστροφής η απώλεια του laser είναι θετική για τη συχνότητα αυτή. Μια σχηματική παράστασή ενός τέτοιου laser φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.16 :



Σχήμα 1.16 : Βασική διάταξη των laser διόδων.[40]

Τα laser αυτά είναι αρκετά ελκυστικά , καθώς παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα :

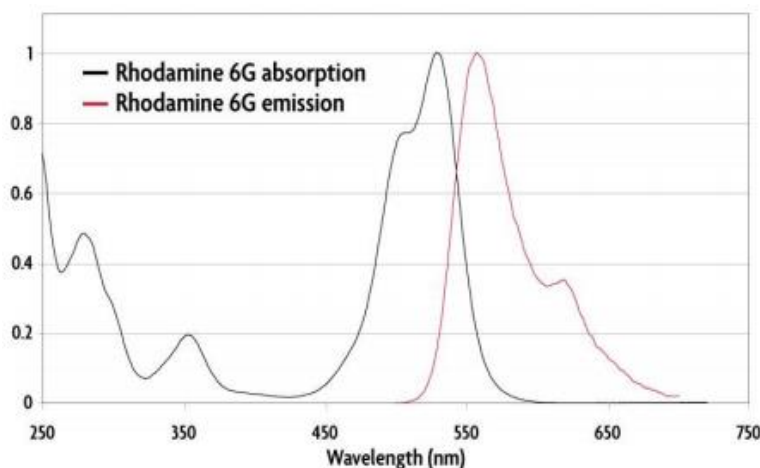
- Καταλαμβάνουν μικρό χώρο.
- Η περιοχή εκπομπής τους είναι μικρή , συγκρινόμενη με τις διαστάσεις των οπτικών ινών.
- Έχουν υψηλή ακτινοβολία (εκπέμπουν πολύ φως σε μικρή περιοχή).
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία.

Τα laser διόδων συνήθως κατασκευάζονται από GaAlAs (Γάλλιο Αλουμίνιο Αρσενίδιο) για συσκευές μικρών μηκών κύματος. Συσκευές μεγάλων μηκών κύματος γενικά χρησιμοποιούν InGaAsP (Ινδίο Γάλλιο Αρσενίδιο Φωσφίδιο).

### 1.3.3.2.4 Υγρά Laser

Το laser χρωστικών μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική συσκευή μετατροπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενός μήκους κύματος σε ένα άλλο και μάλιστα προσαρμόσιμο κατά το επιθυμητό. Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία μπορεί να γίνει η προσαρμογή εξαρτάται από τη χρωστική. Μόρια χρωστικής (dye) συνήθως είναι οργανικά φθορίζοντα συμπλέγματα που περιέχουν μεγάλο αριθμό κυκλικών δομών. Το ενεργό υλικό Laser χρωστικής είναι τέτοια μόρια χρωστικής διαλυμένα συνήθως σε αλκοόλη. Από την αλληλεπίδραση των μορίων χρωστικής με το διαλύτη διευρύνεται η ζώνη των ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης και σχηματίζεται ευρεία ζώνη εκπεμπόμενων (αλλά και απορροφούμενων) συχνοτήτων. Η προσφερόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη της εκπεμπόμενης επειδή υπάρχει απώλεια ενέργειας κατά τη διαδικασία της «μεταφοράς». Επομένως τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων της απορρόφησης (βλ. σχήμα 1.17).

Είναι εφικτή σημαντική ισχύς laser στην έξοδο επειδή υπάρχουν πολλά μόρια χρωστικής (ενεργό υλικό), συγκριτικά με το μικρό ποσοστό των ιόντων στο ενεργό υλικό των Laser στερεάς κατάστασης. Απαραίτητες προϋποθέσεις λειτουργίας του laser υγρής κατάστασης είναι να απορροφά έντονα τα μήκη κύματος που προκαλούν τη διέγερσή του και να μην απορροφά τα μήκη κύματος που το ίδιο εκπέμπει. Ο φωτισμός του ενεργού υλικού μπορεί να γίνει εξωτερικά ή όλου του υγρού που βρίσκεται σε διαφανές δοχείο ή του μέρους του υγρού που κατά τη διάρκεια ροής του περνά από ειδικά διαμορφωμένο ακροφύσιο. Η επιλογή του επιθυμητού μήκους κύματος εξόδου γίνεται με κατάλληλη τοποθέτηση ενός πρίσματος ή ενός πλέγματος.



Σχήμα 1.17 :Τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων της απορρόφησης.

### 1.3.3.2.5 Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων (Free Electron Lasers, FELs)

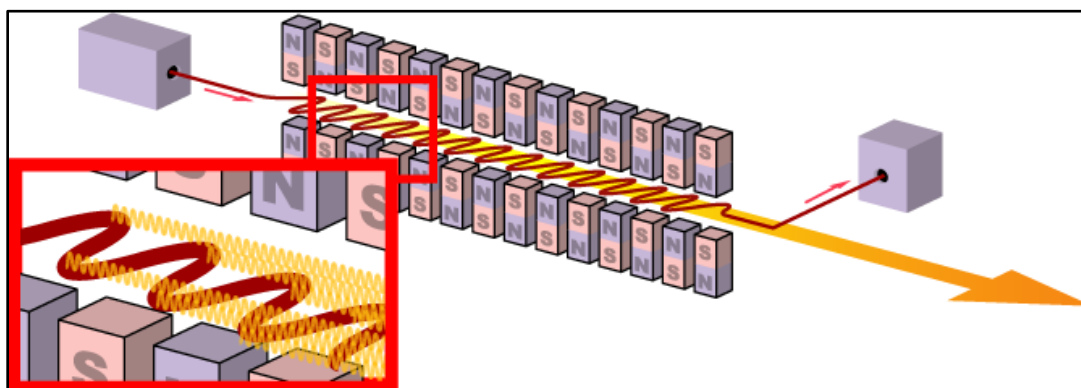
Το Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μια συσκευή υψηλής απόδοσης που εκπέμπει ακτίνες Laser οποιουδήποτε μήκους κύματος, το οποίο εξαρτάται από το σχεδιασμό της συσκευής και όχι από τις ιδιότητες του ενεργού υλικού.

Η τιμή της ταχύτητας των ηλεκτρονίων είναι παραπλήσια αυτής του φωτός και η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων γίνεται σε κενό. Υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με τα ηλεκτρόνια και ειδικά διαμορφωμένο, περιοδικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, από σειρά μαγνητών τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις (βλ. σχήμα 1.10). Περιοδικά ασκούμενο μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει κατά βήματα τη διεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου, που χάνει ενέργεια



με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας laser (επιτάχυνση ηλεκτρικού φορτίου → εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας laser). Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος καθορίζεται από την περιοδικότητα του μαγνητικού πεδίου και την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια μεταδίδουν μέρος της ενέργειάς τους στο «συμπορευόμενο» ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ειδικότερα στην «ηλεκτρική» συνιστώσα του, εφόσον είναι πολωμένο για να διατηρείται η ταλάντωσή του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, κάθετο προς το επίπεδο του επιπρόσθετου περιοδικού μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν, όμως, μειονεκτήματα επειδή οι συσκευές αυτές απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα χιλιάδων Amperes και υψηλό δυναμικό χιλιάδων Volts για να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ταχύτητες των ηλεκτρονίων. Η συσκευή έχει μεγάλες διαστάσεις, υψηλό κόστος και αναπόφευκτα δημιουργούνται επικίνδυνες ακτίνες X. Βέβαια, η εξερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία laser μπορεί να έχει ισχύ ακόμη και Giga Watt.



Σχήμα 1.18 : Διάταξη της συστοιχίας μαγνητών στην καρδιά του συστήματος laser ελεύθερων ηλεκτρονίων.[41]

### 1.3.3.3 Είδη Laser που χρησιμοποιούνται στις υβριδικές συγκολλήσεις στη ναυπηγική

#### 1.3.3.3.1 Laser CO<sub>2</sub>

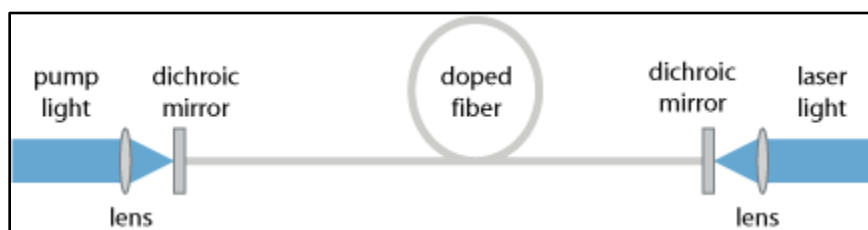
Το laser CO<sub>2</sub> ανήκει στην κατηγορία laser αερίων. Το μήκος κύματος εκπομπής αυτών των laser είναι 10.6 μm στην περιοχή της μακρινής υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το Laser CO<sub>2</sub> αποδίδει δέσμη ισχύος μερικών Watt έως και 25kW (ή και μεγαλύτερη) και είναι το πιο διαδεδομένο στη βιομηχανία. Ακόμα, αποδίδει περισσότερη ενέργεια από άλλα είδη, γεγονός που του προσδίδει ένα ακόμα πλεονέκτημα, οικονομικής φύσεως. Το ενεργό μέσο του laser CO<sub>2</sub> είναι ένα μίγμα CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He και πιθανόν κάποιας μικρής ποσότητας H<sub>2</sub>, υδρατμών και/ή Xe. Όπως συμβαίνει στα περισσότερα laser αερίων, η άντληση πραγματοποιείται με ηλεκτρική εκκένωση. Αυτή η εκκένωση διεγείρει τα μόρια του N<sub>2</sub> που θα μεταφέρουν την ενέργειά τους στα άτομα του CO<sub>2</sub>, καθώς συγκρούονται μαζί τους. Αυτού του είδους το laser μπορεί να λειτουργήσει και παλμικά, διακόπτοντας τη δέσμη, διανέμοντας τη διαθέσιμη ενέργεια με μια συχνότητα της τάξης του 1kHz.

### 1.3.3.3.2 Laser οπτικών ινών (Fiber Laser)

Το laser οπτικών ινών ανήκει στην κατηγορία laser μονωτών με προσμίξεις. Το ενεργό μέσο αποτελείται από μια οπτική ίνα ενισχυμένη με ιόντα σπάνιων γαιών όπως το έρβιο ( $\text{Er}^{3+}$ ), το νεοδύμιο ( $\text{Nd}^{3+}$ ), το υτέρβιο ( $\text{Yb}^{3+}$ ), το θούλιο ( $\text{Tm}^{3+}$ ) ή το πρασεοδύμιο ( $\text{Pr}^{3+}$ ). Η οπτική κοιλοότητα δημιουργείται με την τοποθέτηση διηλεκτρικών κατόπτρων στις τερματικές επιφάνειες της ίνας. Μία ή περισσότερες δίοδοι laser χρησιμοποιούνται για την άντληση φωτός. Χρησιμοποιείται εξωτερικός, χωρίς προσμίξεις, πολύ μεγαλύτερος πυρήνας για τη συλλογή του φωτός της αντλούσας πηγής. Η ενέργεια από την πηγή σταθερής κατάστασης συνδυάζεται μέσα στην επένδυση της ίνας, κατευθύνεται στον πυρήνα και αντλεί το υλικό ενίσχυσης.

Από τα πιο κοινά είδη είναι τα έρβιο-ενισχυμένα laser ινών. Σε μια κανονική οπτική ίνα από γυαλί πυριτίου, προσθέτουμε πολύ μικρά ποσά σπάνιων γαιών από το στοιχείο έρβιο. Τα μικρά σωματίδια από έρβιο αναμιγνύονται στον πυρήνα της ίνας. Αυτή η διαδικασία υλοποίησης των μικρών ποσών ονομάζεται doping. Ο λόγος που χρησιμοποιείται έρβιο είναι επειδή τα άτομά του έχουν πολύ χρήσιμα ενεργειακά επίπεδα.

Στο σχήμα 1.19 φαίνεται η δομή ενός απλού fiber laser. Το φως αντλείται από την αριστερή πλευρά, μέσω ενός διχρωματικού κατόπτρου και κατευθύνεται στον πυρήνα της ενισχυμένης ίνας. Το παραγόμενο laser εξέρχεται από τη δεξιά πλευρά.

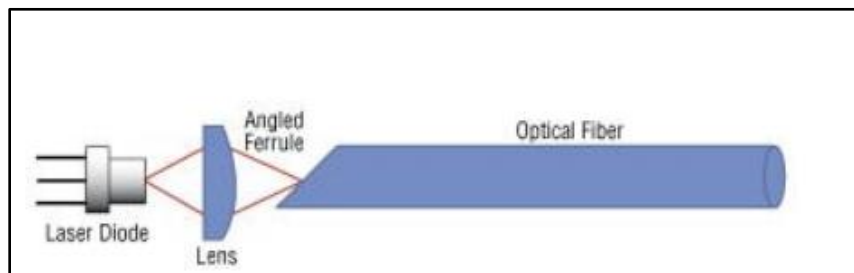


Σχήμα 1.19 : Δομή ενός απλού fiber laser.[43]

### 1.3.3.3.3 Fiber-coupled Diode Laser

Το Fiber-coupled Diode Laser αποτελείται από ένα laser διόδων στην έξοδο του οποίου συνδέεται μια οπτική ίνα προκειμένου να παραδοθεί το φως στη θέση όπου απαιτείται (βλ. σχήμα 1.20). Τα Fiber-coupled Lasers διόδων έχουν διάφορα πλεονεκτήματα:

- Το φως που βγαίνει από την ίνα έχει μια κυκλική και ομαλή (ομογενοποιημένη) μορφή η οποία σε πολλές περιπτώσεις προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα.
- Είναι δυνατό να αφαιρεθούν οι δίοδοι laser μαζί με το σύστημα ψύξης τους.
- Καταλαμβάνουν μικρό όγκο.
- Τα ελαττωματικά Fiber-coupled Diode Lasers μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν χωρίς την ανάγκη ευθυγράμμισης της συσκευής laser με την κεφαλή συγκόλλησης.



Σχήμα 1.20 : Διάταξη της σύνδεσης του laser διόδων με την οπτική ίνα.[44]

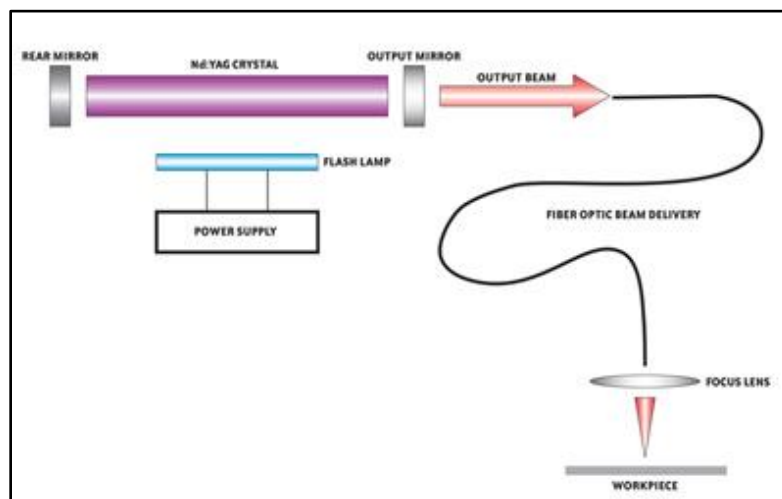


### 1.3.3.3.4 Laser Nd:YAG

Ο όρος YAG laser χρησιμοποιείται συνήθως για στερεάς κατάστασης laser , όπου το ιόντα νεοδυμίου χρησιμοποιούνται ως προσμίξεις σε κρυστάλλους YAG. Το νεοδύμιο (Nd) είναι ένα τρισθενές λανθανίδιο (σπάνια γαία). Το ιόν  $Nd^{3+}$  χρησιμοποιείται ως πρόσμιξη σε κρυστάλλους , από τους οποίους ο γνωστότερος είναι ένας Γρανάτης Υτρίου Αλουμινίου ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) , από τὰ αρχικά του οποίου σχηματίζεται το συνθετικό YAG (Yttrium Aluminium Garnet). Η ατομική συγκέντρωση του Nd είναι γενικά μεταξύ 0.6 και 1.2%. Η ενεργειακή απόδοση αυτού του laser , που φτάνει το 3% , είναι η υψηλότερη από όλα τα άλλα laser στερεάς κατάστασης. Το μήκος κύματος εκπομπής των laser Nd:YAG είναι 1.06  $\mu m$  , εκπέμπει δηλαδή στο κοντινό υπέρυθρο.

Τα laser Nd:YAG (σχήμα 1.21) μπορούν να λειτουργήσουν τόσο συνεχώς όσο και παλμικά. Στη συνεχή λειτουργία , τα laser Nd:YAG αποδίδουν ισχύ μεταξύ 1 και 20W στο βασικό  $TEM_{00}$  και από 10 έως και 1200W όταν υπάρχουν και εγκάρσιοι ρυθμοί ταλάντωσης. Στην παλμική δε λειτουργία αποδίδουν:

- Στον Q-switched ρυθμό , παλμούς πολύ υψηλής ισχύος (~GW) , των οποίων η χρονική διάρκεια είναι μεταξύ 15 και 700ns.
- Σε fixed-Q ρυθμό , παλμούς μερικών joules σε συχνότητα που ποικίλλει από 1 έως 200Hz. Η διάρκεια των παλμών είναι μεταξύ 0.1 και 20ms , συνεπώς η μέση ισχύς είναι της τάξης των 400W.



Σχήμα 1.21 : Διάταξη Nd:YAG laser.[40]

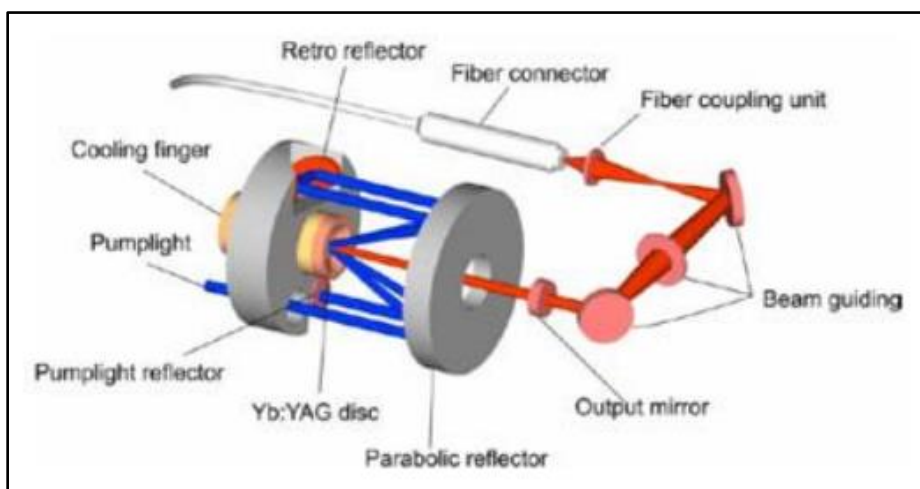
### 1.3.3.3.5 Disk Laser

Το disk laser αποτελείται από έναν δίσκο με διάμετρο κάποιων χιλιοστών (ανάλογα με την ισχύ) και πάχος που κυμαίνεται από 100 ως 200 $\mu m$ . Ο δίσκος αποτελείται από έναν κρύσταλλο  $Yb:YAG$  , η μπροστινή του πλευρά διεγείρεται μέσω ενός laser διόδων. Επειδή υπάρχει υψηλή συγκέντρωση ιόντων  $Yb^{3+}$  στο δίσκο επιτρέπεται η σχεδίαση του με μικρό όγκο. Η πίσω πλευρά του δίσκου έχει επιστρωθεί με ένα ανακλαστικό υλικό. Ο δίσκος κολλάται με την πίσω πλευρά του πάνω στην μεταλλική επιφάνεια ενός εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος λειτουργεί με νερό. Αυτή η τεχνική αποτρέπει οποιαδήποτε παραμόρφωση του δίσκου λόγω της σταθεροποίησης του πάνω στην ψύκτρα και πετυχαίνει την ικανοποιητική ψύξη του. Είναι σημαντικό να μην υπάρχουν παραμορφώσεις γιατί ο δίσκος ενεργεί ως καθρέφτης. Εξαιτίας της αποτελεσματικής ψύξης που προέρχεται από την μεγάλη επιφάνεια του δίσκου και το μικρό του πάχος , η ποιότητα της ακτίνας του laser είναι πολύ καλή.

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα παραβολικό κάτοπτρο (parabolic mirror) και ένα γωνιακό ανακλαστήρα (retroreflector). Η ενέργεια που δεν έχει απορροφηθεί από τον δίσκο κατευθύνεται εκ νέου μέσω των κατόπτρων σε ένα άλλο σημείο του δίσκου. Μπορούν να γίνουν μέχρι 32 τέτοια περάσματα βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος (βλ. σχήμα 1.22). Τελικά πάνω από το 90% της ισχύος απορροφάται από τον δίσκο.

Η βελτίωση της τεχνολογίας του disk laser έκανε δυνατή την παραγωγή disk lasers με ισχύ 6kW και με την ποιότητα της ακτίνας τους να τα καθιστά ιδανικά για συγκολλήσεις. Το μήκος κύματος αυτού του laser βρίσκεται στο φάσμα της κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR-A) με τιμή 1.03μm. Ο συνδυασμός περισσότερων του ενός δίσκου επιτυγχάνει ισχύς μεγαλύτερη των 6kW. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, είναι δυνατό να επιτευχθεί μια άριστη ποιότητα των ακτίνων laser ακόμη και στα υψηλής ισχύος laser.

Τα disk lasers προσφέρουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και καλύτερη ποιότητα ακτίνων σε σύγκριση με τα laser Nd:YAG. Θεωρούνται από πολλούς ο διάδοχος του Nd:YAG laser για τις περισσότερες εφαρμογές συγκόλλησης.

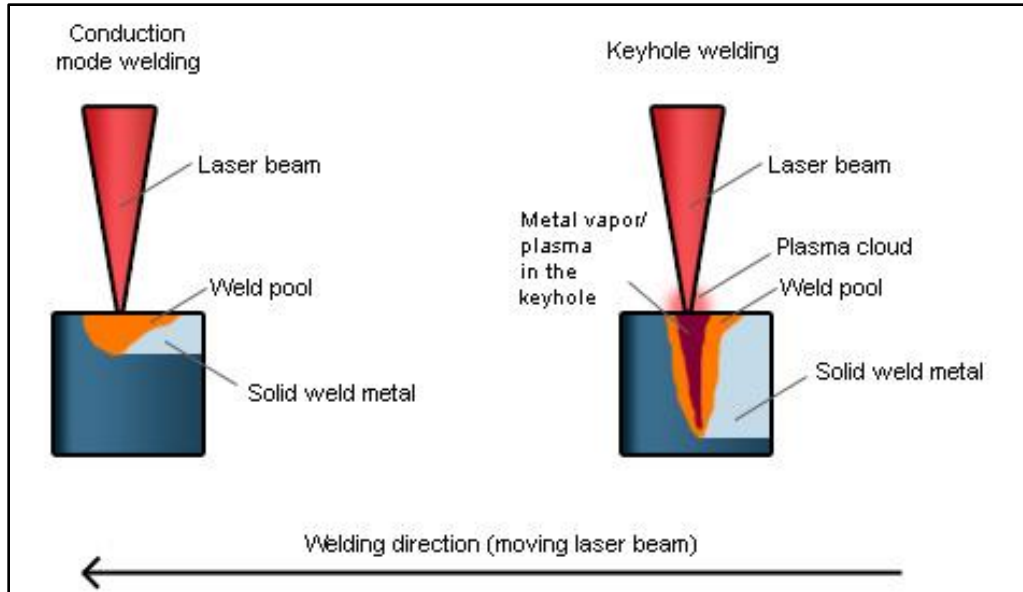


Σχήμα 1.22 : Διάταξη του disk laser. Σε αυτό το μοντέλο γίνονται 8 επανακατευθύνσεις της ακτίνας πάνω στο δίσκο. Στην πραγματικότητα συμβαίνουν περισσότερα περάσματα.[41]

#### 1.3.3.4 Είδη συγκόλλησης με laser

Υπάρχουν δύο είδη συγκόλλησης με laser, η συγκόλληση με κλειδαρότρυπα (keyhole) και συγκόλληση με laser μέσω αγωγής (βλ.σχήμα 1.23). Στην πρώτη περίπτωση το laser παρέχει ενέργεια στα προς τα συγκόλληση μέταλλα και αν η ένταση του laser είναι αρκετά υψηλή αναπτύσσεται θερμοκρασία η οποία υπερβαίνει τη θερμοκρασία εξάτμισης του μετάλλου σχηματίζοντας μια σπή (κλειδαρότρυπα) στο εσωτερικό της περιοχής τήξης. Η τελευταία προκαλεί αύξηση της απορρόφησης με αποτέλεσμα την αύξηση της διείδυσης. Έτσι μπορούν να συγκολληθούν αποτελεσματικά παχιά υλικά.

Στην περίπτωση συγκόλλησης με laser μέσω αγωγής το laser παρέχει ενέργεια στα προς συγκόλληση μέταλλα και επιτυγχάνεται συγκόλληση μικρού βάθους. Η συγκόλληση είναι σχεδόν επιφανειακή χωρίς να πετυχαίνει την ποιότητα συγκόλλησης κλειδαρότρυπας.



Σχήμα 1.23: Αριστερά φαίνεται συγκόλληση με laser μέσω αγωγής και δεξιά συγκόλληση τύπου κλειδαρότρυπας.[46]

### 1.3.3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της συγκόλλησης με laser

Η συγκόλληση με laser προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης τόξου , όπως :

- Δυνατότητα εκτέλεσης συγκόλλησης βαθιάς διείσδυσης με τον τρόπο της κλειδαρότρυπας. Δίνεται , έτσι η δυνατότητα συγκόλλησης παχέων ελασμάτων με μια ενιαία συγκόλληση παρουσιάζοντας λιγότερες ατέλειες.
- Η δυνατότητα να ενωθούν τα παχέα ελάσματα με ένα ενιαίο πέρασμα , μπορεί να επιδράσει ουσιαστικά στην ποσότητα των απαραίτητων αναλωσίμων και στη μείωση των επικίνδυνων εκπομπών.
- Ο ακριβής έλεγχος της ενέργειας των ακτίνων laser επιτρέπει τη μειωμένη πρόσδοση θερμότητας , η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες παραμορφώσεις.
- Η μειωμένη πρόσδοση θερμότητας μπορεί , επιπλέον , να οδηγήσει σε βελτιωμένες μεταλλικές μικροδομές στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και μερικές φορές στη ζώνη τήξης , με αποτέλεσμα τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.
- Δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων τιμών ταχύτητας συγκόλλησης , που είναι αδύνατες με άλλους τύπους συγκολλήσεων (μέχρι 10m/min).

Όπως κάθε μέθοδος , έτσι και η συγκόλληση με laser παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα :

- Σημαντικά αυξημένο κόστος κτήσης του εξοπλισμού.
- Η εθυγράμμιση της συγκόλλησης είναι μεγάλης σημασίας και το κενό πρέπει να περιοριστεί , διαφορετικά είναι αναγκαία η προσθήκη μετάλλου πλήρωσης για τη διασφάλιση επαρκούς τήξης.
- Τα γρήγορα ποσοστά απόψυξης που συνδέονται με τη συγκόλληση laser μπορούν να δημιουργήσουν κάποιο ράγισμα της κεντρικής συγκόλλησης , ρωγμάτωση υγρής κατάστασης ή να σχηματίσουν εύθραυστες και μη όλκιμες μικροδομές.
- Αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα εφαρμογής της μεθόδου , λόγω αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας (π.χ. ασφάλεια των ματιών κατά τη χρήση Nd:YAG laser , diode laser και fiber laser).
- Λόγω των απαιτήσεων ασφάλειας , είναι πολύ δύσκολη η χρήση της μεθόδου σε φορητές ή χειρωνακτικές διαδικασίες.
- Σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας , τα σταγονίδια που μπορεί να εμφανιστούν είναι πιθανό να βλάψουν τα πανάκριβα οπτικά συστήματα.



## Κεφάλαιο 2 : Υβριδική συγκόλληση laser – τόξου

### 2.1 Εισαγωγή

Οι laser και υβριδικές laser συγκολλήσεις παίζουν πλέον σημαντικό ρόλο στη μεσαία και βαριά βιομηχανία συγκολλήσεων. Η ναυπηγική βιομηχανία ηγείται της εισαγωγής υψηλής ισχύος laser και υβριδικών laser συγκολλήσεων, αλλά οι διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούνται επίσης και στην κατασκευή σωληνώσεων και λεβήτων. Το βασικό κίνητρο που ώθησε στη χρήση laser είναι η μείωση των παραμορφώσεων, καθώς εκτιμάται ότι το 20-30 % των εργασιών στη ναυπηγική βιομηχανία οφείλεται στην αναμόρφωση των παραμορφώσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων. Ένα τέτοιο πρόβλημα παραμορφώσεων φαίνεται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 : Παραμορφωμένα deck panels επιβατηγού πλοίου που συγκολλήθηκαν με συγκόλληση τόξου. [26]

Η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου χαρακτηρίζεται από το συνδυασμό δύο (ή περισσότερων) διαφορετικών πηγών θερμότητας (ακτίνες laser και ηλεκτρικά τόξα) σε μια μοναδική τεχνική συγκόλλησης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο συγκόλλησης, η ακτίνα laser χρησιμοποιείται ως μια υψηλής ενεργειακής πυκνότητας πηγή θερμότητας και χρησιμεύει συνήθως ως η αρχική πηγή θερμότητας, επιτρέποντας βαθιά διείσδυση συγκόλλησης, ενώ το τόξο ως δευτερεύουσα πηγή θερμότητας και αναλαμβάνει τις πρόσθετες λειτουργίες, προκειμένου να βελτιωθούν η σταθερότητα διαδικασίας, η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα καθώς επίσης και η ποιότητα της ραφής συγκόλλησης. Αντίθετα, υπάρχουν και διαδικασίες συγκόλλησης τόξου οι οποίες καλούνται laser-assisted, όπου το τόξο ενεργεί ως αρχική πηγή θερμότητας.

Η έννοια της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου εισήχθη στη δεκαετία του '70 από τους STEEN και EBOO, οι οποίοι συνδύασαν ένα CO<sub>2</sub> laser 2KW και ένα TIG τόξο για εφαρμογές συγκόλλησης και κοπής. Αυτές οι πρώτες έρευνες ήδη έδειξαν ότι ο συνδυασμός ακτίνων laser και τόξου, σε μια κοινή ζώνη διαδικασίας, είναι κάτι περισσότερο από έναν απλό συνδυασμό δύο πηγών θερμότητας. Ως συνέπεια των αρχικών πειραμάτων τους, αποδεικνύεται ότι η ακτινοβολία laser άσκησε ουσιαστική επίδραση στη συμπεριφορά τόξου. Από τότε, η ιδέα του STEEN έχει αναπτυχθεί από πολλούς

ερευνητές και μηχανικούς συγκόλλησης. Εξετάστηκαν και αναπτύχθηκαν διάφοροι συνδυασμοί laser - τόξου. Οι συνδυασμοί περιλαμβάνουν τις διατάξεις με μια κοινή περιοχή επεξεργασίας , ρυθμίσεις όπου το laser και το τόξο ενεργούν χωριστά , καθώς επίσης και διατάξεις με περισσότερες από δύο πηγές. Οι αντίστοιχες τεχνολογικές εξελίξεις παρακινούνται , αφ' ενός , από τα πλεονεκτήματα της συνδυασμένης διαδικασίας συγκόλλησης και αφ' ετέρου , από το γεγονός ότι τα μειονεκτήματα των συμβατικών συγκολλήσεων μπορούν να αντισταθμιστούν.

Για παράδειγμα , πιθανόν το σημαντικότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα των πηγών θερμότητας με ακτίνα laser είναι ο ακριβής έλεγχός της έντασης στο σημείο εστιασμού με τον ανεξάρτητο προσδιορισμό της ισχύος laser και τη διάμετρο εστίασης. Συνήθως χρησιμοποιούνται μικρές διαμέτροι εστίασης με μέγεθος μικρότερο του χιλιοστόμετρου , με σκοπό να επιτευχθούν οι υψηλές εντάσεις , επιτρέποντας τη βαθιά διείδυση με υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης. Κατά συνέπεια , η ενέργεια συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους είναι συγκριτικά μικρή , καθιστώντας εφικτή την παραγωγή συγκολλήσεων με ελάχιστες παραμορφώσεις. Εντούτοις , η ακραία ικανότητα της εστίασης των ακτίνων laser έχει επίσης δυσάρεστες συνέπειες , συμπεριλαμβανομένης της υψηλής απαίτησης για μικρές ανοχές στο ταίριασμα των ενώσεων και την ακριβή παρακολούθηση των ραφών.

Αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να υπερκεραστούν με τη χρήση μιας πρόσθετης πηγής θερμότητας τόξου , που διευρύνει τη ραφή της συγκόλλησης και αυξάνει έτσι τη δυνατότητα συγκόλλησης μεγάλων διάκενων.

Άλλες αναφερόμενες βελτιώσεις των διαδικασιών laser-τόξου περιλαμβάνουν τις αυξήσεις :

- στην ταχύτητα συγκόλλησης ή/και το συγκολλούμενο πάχος του υλικού.
- στην αποτελεσματικότητα και τη σταθερότητα της διαδικασίας συγκόλλησης.
- στην ποιότητα συγκόλλησης με μειωμένη πιθανότητα εμφάνισης πόρων και ρωγμών.

## 2.2 Βασικές διατάξεις[29][31][32][33][38]

Η προδιαγραφή των διατάξεων των υβριδικών συγκολλήσεων laser-τόξου περιλαμβάνει την επιλογή τουλάχιστον μιας κύριας και μιας δευτερεύουσας πηγής θερμότητας και τον καθορισμό της γεωμετρικής θέσης αυτών.

Ως κύριες πηγές θερμότητας χρησιμοποιούνται οι διάφοροι τύποι laser υψηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις , όπως τα CO<sub>2</sub> laser , disk laser , Nd:YAG laser , fiber laser και fiber-coupled diode laser. Αν και τα τελευταία χρόνια τα πιο αξιόπιστα συστήματα laser ήταν τα CO<sub>2</sub> και Nd:YAG laser , λόγω της επικράτησης τους στο εργαστήριο και τα βιομηχανικά περιβάλλοντα , το disk laser, το fiber laser καθώς επίσης και το υψηλής ισχύος fiber-coupled diode laser καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις ώστε να λειτουργούν ως αρχικές πηγές θερμότητας και αναμένεται ότι αυτοί οι τύποι laser θα εφαρμοστούν όλο και περισσότερο στις μελλοντικές εξελίξεις της υβριδικής τεχνολογίας.

Ένα κύριο κριτήριο για την επιλογή της πρωτεύουσας πηγής θερμότητας , εκτός από την ισχύ του laser και την ποιότητα των ακτίνων , είναι το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας , το οποίο μπορεί να περιορίσει την επιλογή του χρησιμοποιήσιμου τύπου αερίου προστασίας. Για παράδειγμα , η συγκόλληση με ένα CO<sub>2</sub> laser , χρειάζεται συνήθως μίγματα αερίου με μια υψηλή περιεκτικότητα σε He ή καθαρό αέριο He , προκειμένου να αποτρέψει το σχηματισμό του προστατευτικού πλάσματος , ενώ για τους άλλους τύπους laser υψηλής ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέριο Ar και μίγματα αυτού με



προσθήκη ενεργών αερίων όπως το CO<sub>2</sub> ή O<sub>2</sub>. Συνεπώς, υβριδικοί συνδυασμοί με Nd:YAG, disk, fibre ή υψηλής ισχύος diode laser προσφέρουν περισσότερη ευελιξία στον επηρεασμό της μεταλλουργικής σύνθεσης της λίμνης συγκόλλησης και της μεταφοράς μετάλλου κατά τη συγκόλληση (όταν χρησιμοποιούνται αναλώσιμα ηλεκτρόδια) επιτρέποντας μεγαλύτερη δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων αερίων προστασίας.

Σαν δευτερεύουσες πηγές θερμότητας μπορούν να επιλεγούν μέθοδοι συγκολλήσεων με καταναλισκόμενα ηλεκτρόδια (MIG, MAG) ή μη (TIG), συγκόλληση βυθισμένου τόξου (SAW), ή συγκόλληση με τόξο πλάσματος (PAW). Για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα συγκόλλησης, αν είναι αναγκαία η χρήση μετάλλου πληρώσεως, εφαρμόζονται μέθοδοι συγκολλήσεων με αναλώσιμα ηλεκτρόδια, διαφορετικά προτιμούνται συγκολλήσεις με μη αναλώσιμα ηλεκτρόδια.

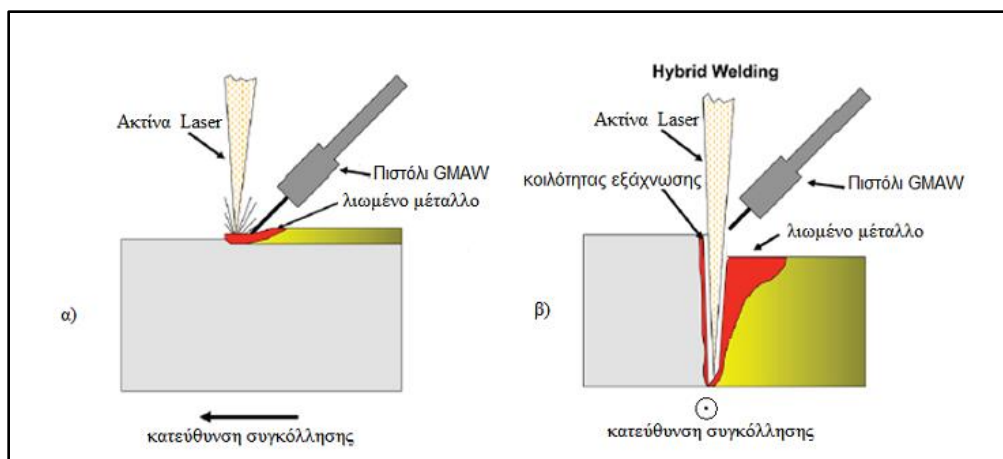
Αφού επιλεγούν οι πηγές θερμότητας, το σημαντικότερο ρόλο για την ικανότητα και την αποδοτικότητα της υβριδικής διαδικασίας καθώς και την ποιότητα των παραγόμενων συγκολλήσεων, διαδραματίζει η γεωμετρική τοποθέτησή τους. Οι τεχνικές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτές με κοινά και σε αυτές με διαφορετικά σημεία εφαρμογής. Κοινό σημείο εφαρμογής σημαίνει ότι το τόξο και το κέντρο εστίασης του laser κατευθύνονται στην ίδια θέση της επιφάνειας του υλικού που συγκολλείται. Αυτό επιτυγχάνεται με την ομοαξονική διάταξη της ακτίνας laser και του ηλεκτρικού τόξου.

Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας ρύθμισης εφαρμόζονται ορισμένες τεχνικές, όπως:

- η χρήση ενός συνόλου διαφόρων ράβδων ηλεκτροδίων, πάνω σε έναν κυλινδρικό μονωτή που επιτρέπει την εστίαση της ακτίνας.
- Η χρήση ενός πρόσθετου συστήματος καθρεφτών που περιστρέφει την ακτινοβολία laser γύρω από ένα αξονικά τοποθετημένο ηλεκτρόδιο.
- Η άμεση χρήση κοίλων ηλεκτροδίων ή με μορφή δακτυλίου.

Ωστόσο, οι ουσιαστικά πραγματοποιούμενες συγκολλήσεις laser-τόξου στην πλειοψηφία τους χρησιμοποιούν διάταξη όπου ένα συμβατικό πιστόλι συγκόλλησης συγκλίνει με τη συναφή ακτίνα laser. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται διατάξεις με τα κεκλιμένα πιστόλια συγκόλλησης στο επίπεδο κατά μήκος της κατεύθυνσης συγκόλλησης και πίσω από την ακτίνα laser (σχήμα 2.1.α) και εγκάρσια της κατεύθυνσης συγκόλλησης (σχήμα 2.1.β). Η περίπτωση που το πιστόλι είναι πίσω από την ακτίνα laser (σχήμα 2.1.α) είναι η προτιμώμενη διάταξη για τη συμβατική υβριδική συγκόλληση laser-τόξου. Το τόξο κατευθύνεται στην παραγόμενη από το laser κοιλότητα εξάχνωσης, όπου το ατμοποιημένο μέταλλο προσφέρει ένα εύκολο προς ιονισμό αγώγιμο μέσο λόγω της χαμηλής δυνατότητας ιονισμού του.



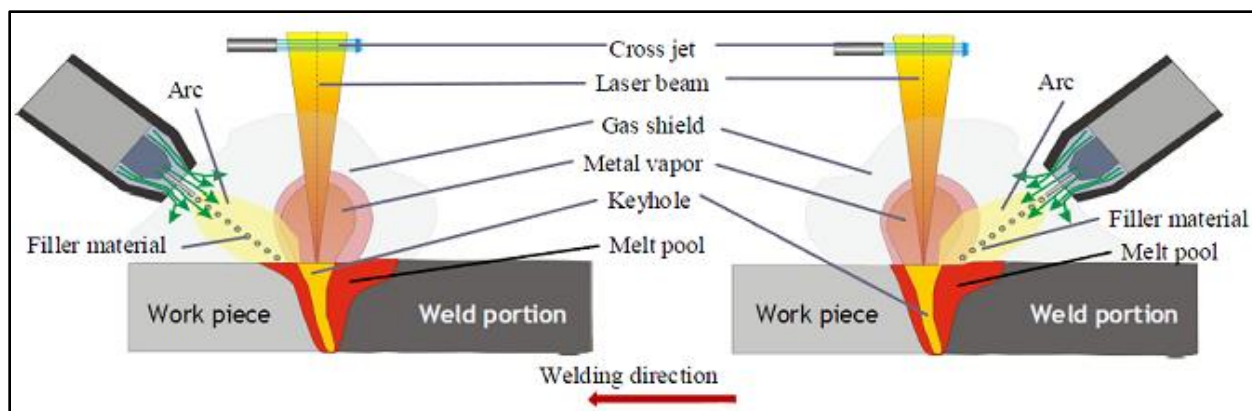


Σχήμα 2.1 : Δύο διαφορετικές διατάξεις της υβριδικής συγκόλλησης. [53]

Το 1994 χρησιμοποιήθηκε από τον Beyer μια διάταξη με ένα laser Nd:YAG ως βασική και ένα TIG τόξο ως δευτερεύουσα πηγή θερμότητας και διαπίστωσε ότι η διαθέσιμη ισχύς του laser καθορίζει κυρίως το επιτεύξιμο βάθος διείσδυσης, ενώ ο έλεγχος των παραμέτρων τόξου επιτρέπει τη ρύθμιση του πλάτους της ραφής της συγκόλλησης. Κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις για την προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση μετάλλων θα μπορούσαν να μειωθούν. Επιπλέον, συνδυάζοντας το τόξο και την ακτίνα laser με ένα βέλτιστο τρόπο, επιτεύχθηκε το ίδιο βάθος συγκόλλησης με μειωμένη ισχύ laser ή εναλλακτικά, πραγματοποιήθηκε μια αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης. Ως δεύτερη παραλλαγή, έχουμε ένα εγκαρσίως κεκλιμένο πιστόλι συγκόλλησης, που χρησιμοποιήθηκε από την ίδια ομάδα ερευνητών για τη συγκόλληση ελασμάτων με διαφορετικά πάχη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.β, όπου ο συνδυασμός και των δύο πηγών θερμότητας (i) μείωσε τις απαιτήσεις προετοιμασίας των ακρών, (ii) αύξησε τον όγκο του λιωμένου υλικού, (iii) βελτίωσε την εμφάνιση συγκόλλησης με μια ομαλή ζώνη μετάβασης μεταξύ των δύο ελασμάτων, επειδή το τόξο εφαρμόστηκε στην άκρη του παχύτερου ελάσματος, και (iv) αύξησε την αποδοτικότητα της διαδικασίας με συνέπεια τις σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης έναντι της διαδικασίας συγκόλλησης μόνο με laser.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του μεμονωμένου και ανεξάρτητου συνδυασμού των επιλεγμένων πηγών θερμότητας, είναι το γεγονός ότι και τα δύο σημεία εφαρμογής μπορούν εύκολα να διαχωριστούν με την αλλαγή των γωνιών κλίσης ή τη διατήρηση μιας ορισμένης απόστασης μεταξύ του άξονα των ακτίνων laser και του πιστολιού συγκόλλησης. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να προσαρμόσει τα χαρακτηριστικά της υβριδικής πηγής θερμότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις ή/και τις συγκεκριμένες συνθήκες ενός ιδιαίτερου προβλήματος συγκόλλησης.

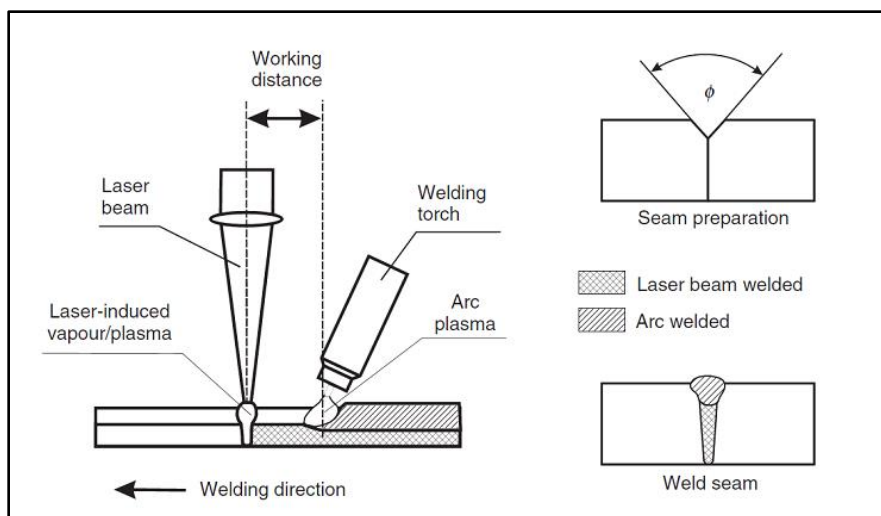
Τα διάφορα σημεία εφαρμογής, υπονοούν ένα χρονικό ή/και τοπικό διαχωρισμό των επιλεγμένων πηγών θερμότητας. Οι πηγές θερμότητας μπορούν να βρίσκονται σε παράλληλη ή σειριακή διάταξη. Μια παράλληλη διάταξη χαρακτηρίζεται από μια απόσταση στην κάθετη ή οριζόντια κατεύθυνση κατά μήκος της πορείας μεταξύ και των δύο πηγών θερμότητας. Αντίθετα, η κύρια και δευτερεύουσα πηγή θερμότητας κινείται κατά μήκος της ίδιας πορείας συγκόλλησης σε σειριακή διάταξη αλλά σε μια ορισμένη απόσταση μεταξύ των δύο πηγών. Έτσι, το ηλεκτρικό τόξο είτε θα ακολουθεί την ακτίνα laser είτε θα προπορεύεται. (Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2 : Δύο διαφορετικές διατάξεις υβριδικής συγκόλλησης. Το τόξο προπορεύεται (αριστερά) ή ακολουθεί (δεξιά) την ακτίνα laser.[31]

Κατά την προπόρευση του τόξου , επιτυγχάνεται μια αποτελεσματική προθέρμανση της προς συγκόλληση περιοχής. Αυτό μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της αρχικής πηγής θερμότητας ακτίνων laser επειδή οι ενεργειακές απώλειες μειώνονται και την ποιότητα της ραφής συγκόλλησης εξαιτίας της σταθεροποιημένης συμπεριφοράς της κοιλότητας εξάχνωσης. Στην περίπτωση κατά την οποία το τόξο ακολουθεί την ακτίνα laser σε μικρή απόσταση , αυξάνεται η αποδοτικότητα και η σταθερότητα της διαδικασίας συγκόλλησης laser, εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του laser και του τόξου μέσα στο κοινό πλάσμα. Επιπλέον, εφαρμόζοντας μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ της ακτίνας laser και του τόξου που ακολουθεί μπορεί να επιτευχθεί μια βραχυπρόθεσμη αναθέρμανση στην περιοχή της ραφής της συγκόλλησης laser που μπορεί να αλλάξει τη μικροδομή ευνοϊκά και να βελτιώσει τις ιδιότητες της συγκόλλησης.

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται μια υβριδική συγκόλληση laser-τόξου με χωριστά σημεία εφαρμογής σε παράλληλη διάταξη. Η συγκεκριμένη προετοιμασία ραφών σε σχήμα Y , επιτρέπει τη συγκόλληση της ρίζας , δηλ. το κατώτατο μέρος της ένωσης , με ακτίνα laser και το τελικό ανώτερο στρώμα με μια διαδοχική διαδικασία συγκόλλησης τόξου με χρήση καταναλισκόμενων ηλεκτροδίων. Ο Seyffahrt (1994 ) χρησιμοποίησε μια τέτοια διάταξη ώστε να αυξήσει το πάχος των προς συγκόλληση ελασμάτων για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της ναυπηγικής βιομηχανίας. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο στάδια (διπλό πέρασμα) με διαφορετικές ταχύτητες συγκόλλησης των πηγών θερμότητας ή σε ένα στάδιο (single-pass) με ένα κατάλληλο ποσοστό μεταξύ των δύο πηγών θερμότητας. Παρόλο που η ακτίνα laser και το τόξο μπορεί να μη συνεργάζονται άμεσα , προκύπτουν κάποια ωφέλιμα αποτελέσματα. Κατ' αρχάς , η σταθεροποίηση των προς συγκόλληση τεμαχίων από τη συγκολλημένη με laser ένωση , μειώνει τις παραμορφώσεις μετά από τη διαδικασία συγκόλλησης τόξου (MAG). Αφετέρου , η πρόσθετη ισχύς του τόξου οδηγεί σε μια ανόπτηση της συγκόλλησης με αποτέλεσμα η σκληρότητα της ραφής να μειωθεί ικανοποιητικά.



Σχήμα 2.3 :Σχηματική διάταξη υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου με διαφορετικό σημείο εφαρμογής.[37]

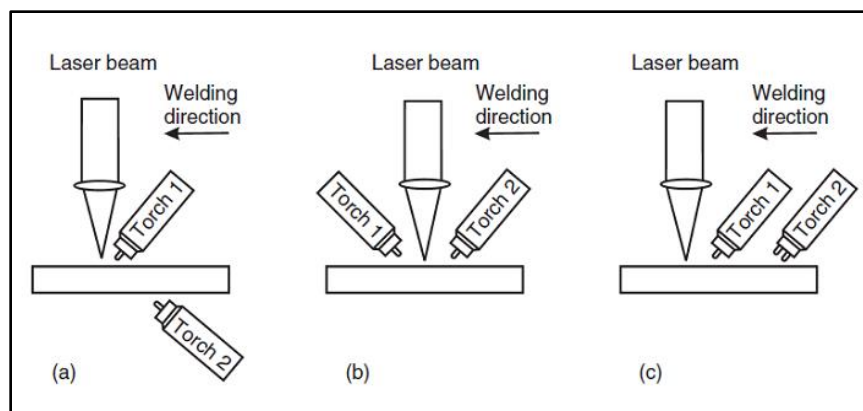
Έρευνες από τον Matsuda (1988) έδειξαν ότι τα αποτελέσματα της συγκόλλησης , εκτός από τις κύριες παραμέτρους όπως η ισχύς laser , η ένταση ρεύματος τόξου και το ποσοστό τροφοδοσίας , εξαρτώνται έντονα από την απόσταση μεταξύ της ακτίνας laser και του ηλεκτροδίου (σειριακή μετατόπιση) καθώς επίσης και από την εστιακή θέση της ακτίνας laser (παράλληλη μετατόπιση).

Εν περιλήψει , δεν είναι δυνατό να δοθούν γενικές οδηγίες για τις βέλτιστες βασικές διατάξεις στην υβριδική συγκόλληση laser-τόξου , επειδή υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν και που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η σχετική θέση του τόξου ως προς την ακτίνα laser (προπορεύεται , ακολουθεί ή ομοαξονικό καθώς και η κλίση και απόσταση μεταξύ τους) εξαρτάται από το προς συγκόλληση υλικό και τις ιδιότητες επιφάνειάς του. Σημαντικά , επίσης , είναι ο τύπος σύνδεσης , η προετοιμασία των άκρων και η θέση συγκόλλησης. Η ενέργεια του τόξου και του laser , οι παράμετροι εστίασης του laser , το μήκος κύματος της ακτίνας , και η τεχνική μεταφοράς μετάλλου (MIG/MAG) καθώς επίσης και ειδικές οριακές συνθήκες όπως π.χ. η προσβασιμότητα ενός αισθητήρα παρακολούθησης της ραφής , είναι παράγοντες που έχουν ισχυρή επίδραση στο σχεδιασμό της όλης υβριδικής διαδικασίας και του εξοπλισμού.

## 2.3 Νεότερες , μη συμβατικές διατάξεις υβριδικής συγκόλλησης [26][28][29][31][32][33][38]

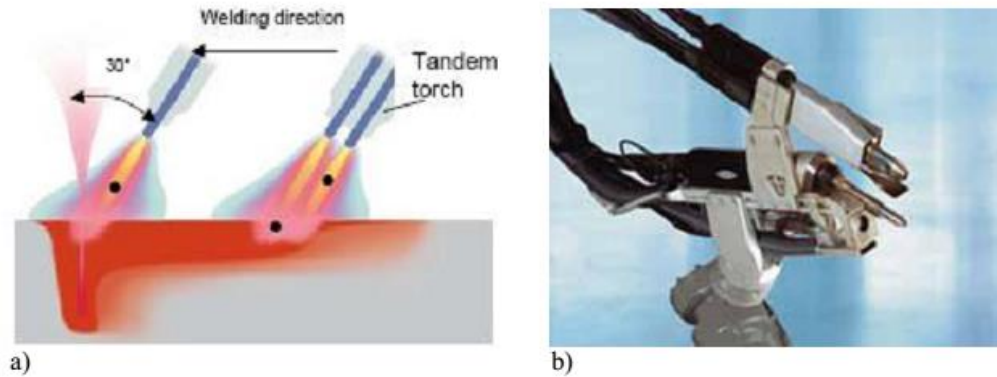
### 2.3.1 Διατάξεις με περισσότερες από δύο πηγές θερμότητας

Εκτός από τις συμβατικές υβριδικές συγκολλήσεις laser-τόξου με μια ακτίνα laser ως κύρια πηγή θερμότητας και ένα ηλεκτρικό τόξο ως δευτερεύουσα , υπάρχουν ακόμα μερικές τεχνολογικές εξελίξεις που χρησιμοποιούν δύο ή και περισσότερα ηλεκτρικά τόξα. Οι πιθανές τέτοιες διατάξεις που ήδη εφαρμόστηκαν για διαφορετικούς λόγους παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 : Διάφορα είδη διατάξεων με δύο δευτερεύουσες πηγές ενέργειας. [53]

- a) Πραγματοποιήθηκε από τον Winderlich το 2003. Ως κύρια πηγή θερμότητας χρησιμοποιήθηκε CO<sub>2</sub> laser και ως δευτερεύουσες πηγές θερμότητας δύο ακολουθούντα πιστόλια TIG. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, το ένα πιστόλι TIG (Torch 1) λειτουργούσε από την ίδια πλευρά με την ακτίνα laser και το δεύτερο (Torch 2) από την αντίθετη πλευρά με σκοπό να παράγει μια συγκόλληση χωρίς εγκοπές, κατάλληλη για δυναμική φόρτιση. Συγκριτικά με την απλή χρήση της συγκόλλησης με ακτίνες laser, η αντίσταση κόπωσης εδώ θα μπορούσε να αυξηθεί κατά περίπου 50%. Επίσης, τέτοια διάταξη χρησιμοποιήθηκε και κατά τη διάρκεια του project HYBLAS (ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2007 με τη συμμετοχή διαφόρων ευρωπαϊκών χωρών), όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο πιστόλια MAG (Dual MAG/Laser Hybrid Welding) για τη συγκόλληση χαλύβδινων ελασμάτων πάχους 30mm.
- b) Αποτελείται από δύο χωριστά πιστόλια συγκόλλησης, εκατέρωθεν της ακτίνας laser. Η ακτίνα laser και τα τόξα όλων των συγκολλήσεων ευθυγραμμίζονται σύμφωνα με τη γραμμή συγκόλλησης. Το κύριο ηλεκτρόδιο (Torch 1) έχει φορά αντίθετη προς τη φορά της κίνησης (backhand) και το δεύτερο ηλεκτρόδιο (Torch 2) έχει φορά ίδια με αυτής της συγκόλλησης (forehand). Μια τέτοια διάταξη, (καλούμενη υβριδική συγκόλληση με διπλό τόξο) είναι η διαδικασία HyDRA. Εφαρμόστηκε, αρχικά, από τους Dilthey και Keller (2001) που συνδύασαν τη συγκόλληση laser CO<sub>2</sub> με δύο πιστόλια GMAW. Σε σύγκριση με τη συμβατική υβριδική συγκόλληση με μόνο ένα τόξο ως δευτερεύουσα πηγή θερμότητας, το ποσοστό απόθεσης του υλικού πληρώσεως θα μπορούσε να αυξηθεί περαιτέρω οδηγώντας σε υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης και ένα μειωμένο θερμικό φορτίο. Οι εναλλακτικές διαμορφώσεις της διαδικασίας HyDRA περιλαμβάνουν ακόμα τις παραλλαγές όπου τα τόξα είναι τοποθετημένα παράλληλα στη γραμμή συγκόλλησης, είτε σε μια θέση πρωτοπορίας είτε σε ακολουθία, σε σχέση με τον άξονα της ακτίνας laser. Οι γωνίες κλίσης μπορούν να ποικίλουν με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιούνται forehand και backhand διατάξεις. Σχετικά με τη δυνατότητα συγκόλλησης μεγάλου διάκενου, τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με δύο προπορευόμενα τόξα.
- c) Η διάταξη αυτή πραγματοποιήθηκε πρόσφατα και το ιδιαίτερο γνώρισμά της είναι η εφαρμογή μιας τεχνικής συγκόλλησης με διπλό ηλεκτρόδιο (μέθοδος tandem) ως πρόσθετη πηγή θερμότητας (εικόνα 2.2). Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και παρουσιάζεται πιο αναλυτικά παρακάτω, καθώς αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στις υβριδικές συγκολλήσεις των δοκιμών που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 2.2 : a) Σχηματική αναπαράσταση HLAW+tandem , b) Πιστόλι συγκόλλησης HLAW+tandem (Schweissen & Schneiden, 2005)

### 2.3.2 Μέθοδος συγκόλλησης Tandem MIG/MAG

Οι MIG/MAG συγκολλήσεις πολλαπλών ηλεκτροδίων συμπεριλαμβάνονται στις πιο επιτυχημένες μεθόδους συγκολλήσεων που εφαρμόζονται σήμερα στη βιομηχανία. Μπορεί κανείς να βρει στην αγορά διάφορες διατάξεις πολλαπλών ηλεκτροδίων με διάφορα ονόματα. Ωστόσο, η συγκόλληση με πολλαπλά ηλεκτρόδια μπορεί να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με κάποιες βασικές αρχές :

- **Twin welding (μια μονάδα τροφοδοσίας)** : Δύο ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται από την ίδια τροφοδοτική μονάδα. Και τα δύο σύρματα έχουν τις ίδιες δυνατότητες και συνδέονται στην ίδια πηγή ενέργειας.
- **Twin welding (δύο μονάδες τροφοδοσίας)** : Δύο ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται από δύο διαφορετικές τροφοδοτικές μονάδες. Και τα δύο ηλεκτρόδια έχουν τις ίδιες δυνατότητες και συνδέονται στην ίδια πηγή ενέργειας.
- **Tandem welding (δύο τροφοδοτικές μονάδες και δύο πηγές ενέργειας)** : Δύο ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται, το κάθε ένα από μια διαφορετική τροφοδοτική μονάδα και κάθε ηλεκτρόδιο συνδέεται με μια διαφορετική πηγή ενέργειας. Το προπορευόμενο ηλεκτρόδιο καλείται master και το ακόλουθο slave. Επίσης, τα ηλεκτρόδια είναι ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους μέσα στο πιστόλι συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια, τέλος, μπορεί να έχουν διαφορετικές δυνατότητες και οι παράμετροι συγκόλλησης μπορούν να ορισθούν ελεύθερα για κάθε ένα από αυτά.

Επιπλέον, εκτός από τις παραπάνω, υπάρχουν διατάξεις στις οποίες η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι τόσο μεγάλη, ώστε μπορεί να θεωρηθεί πως σχηματίζονται δύο διαφορετικές λίμνες συγκόλλησης.

Η εταιρεία ESAB έχει αναπτύξει μια διάταξη tandem MAG συγκόλλησης, όπου μπορούν να ορισθούν οι παράμετροι συγκόλλησης για τα δύο ηλεκτρόδια και η μεταξύ τους απόσταση είναι σχετικά μικρή, ώστε και τα δύο να εργάζονται στην ίδια λίμνη συγκόλλησης. Αναμφισβήτητα, η πιο αποτελεσματική μέθοδος είναι ο ορισμός των παραμέτρων συγκόλλησης να γίνεται ξεχωριστά για κάθε ηλεκτρόδιο, καθώς όταν δύο τόξα εργάζονται στην ίδια λίμνη συγκόλλησης, ο σκοπός που εξυπηρετεί το κάθε ένα



είναι διαφορετικός. Το προπορευόμενο ηλεκτρόδιο θερμαίνει το βασικό μέταλλο ώστε να σχηματιστεί η λίμνη συγκόλλησης , ενώ το ηλεκτρόδιο που ακολοθεί γεμίζει το κενό εξομαλύνοντας ταυτόχρονα την επιφάνεια της συγκόλλησης , χωρίς να προκαλέσει πολλές εκτοξεύσεις (spatter).

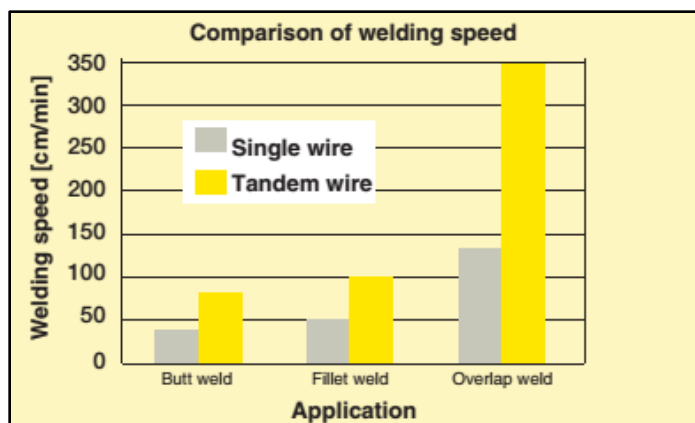
Για να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα είναι σημαντικό ο εξοπλισμός να πληρεί ορισμένες βασικές απαιτήσεις :

- Άκαμπτη και σταθερή , χωρίς δονήσεις , σύνδεση του πιστολιού συγκόλλησης.
- Υψηλές επιδόσεις σε ταχύτητες.
- Υψηλών απαιτήσεων μονάδες τροφοδοσίας ηλεκτροδίων , και εξασφάλιση ασφαλούς και ομαλής τροφοδοσίας ηλεκτροδίου.
- Συστήματα παρακολούθησης της σύνδεσης , ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι παράμετροι συγκόλλησης παραμένουν αμετάβλητες.

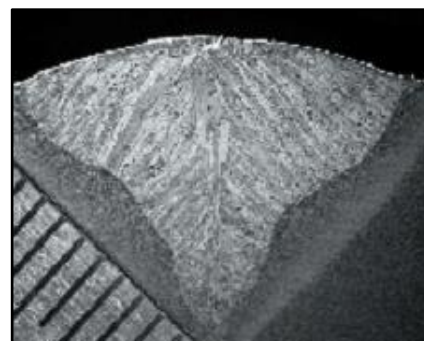
Στη συγκόλληση tandem MAG , η μεταφορά τηγμένου μετάλλου πρέπει να ελεγχθεί κατάλληλα ώστε να έχουμε ως αποτέλεσμα μια ομαλή ραφή. Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1 , υπάρχουν διάφοροι τρόποι μεταφοράς τηγμένου μετάλλου στις συγκολλήσεις MIG/MAG (GMAW γενικά) : με βραχυκύκλωση , με χοντρές σταγόνες , με σταγονίδια , παλμική μεταφορά με σταγονίδια. Στην περίπτωση της tandem MAG όλοι οι συνδυασμοί αυτών των τεχνικών είναι δυνατοί. Ωστόσο , μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο τόξων με αποτέλεσμα την πρόκληση διαταραχών. Ένας κατάλληλος συνδυασμός είναι όταν και στα δύο τόξα γίνεται παλμική μεταφορά τηγμένου μετάλλου με σταγονίδια.

Από έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο SIMR (Swedish Institute for Metals Research) πάνω σε tandem MAG συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό της ESAB , εξήχθησαν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα :

- Η διαδικασία tandem δίνει τη δυνατότητα υψηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης και ρυθμών εναπόθεσης υλικού , σε σχέση με συγκολλήσεις όπου γίνεται χρήση ενός ηλεκτροδίου (σχήμα 2.5).
- Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής από μια μεγάλη γκάμα συνδυασμών παραμέτρων συγκόλλησης , από όπου μπορούν να προκύψουν αποδεκτά αποτελέσματα.
- Συγκριτικά με συγκολλήσεις ενός ηλεκτροδίου , φαίνεται να είναι απαραίτητο ένα ελάχιστο μέγεθος λίμνης συγκόλλησης.
- Έχει πολύ μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης σε σχέση με συγκολλήσεις ενός ηλεκτροδίου (εικόνα 2.3).
- Όταν οι ρυθμοί τροφοδοσίας ηλεκτροδίων είναι χαμηλοί και παρόμοιοι για τα ηλεκτρόδια , τα τόξα αρχίζουν να ταλαντώνονται πιο εύκολα. Αυτό αξυπηρετεί τη χρήση της tandem MAG έναντι της twin-wire συγκόλλησης.
- Όταν ο ρυθμός τροφοδοσίας του προπορευόμενου ηλεκτροδίου είναι υψηλός και τα σχηματιζόμενα τόξα στενά , ευνοείται η σταθερότητα αναφορικά με την ταλάντωσή τους , ωστόσο μπορεί να αυξηθούν οι εκτοξεύσεις μετάλλου (spatter).



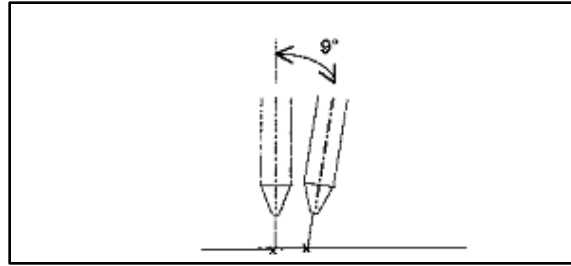
Σχήμα 2.5 : Σύγκριση των ταχυτήτων συγκόλλησης για εφαρμογές με μονό / διπλό ηλεκτρόδιο. [28]



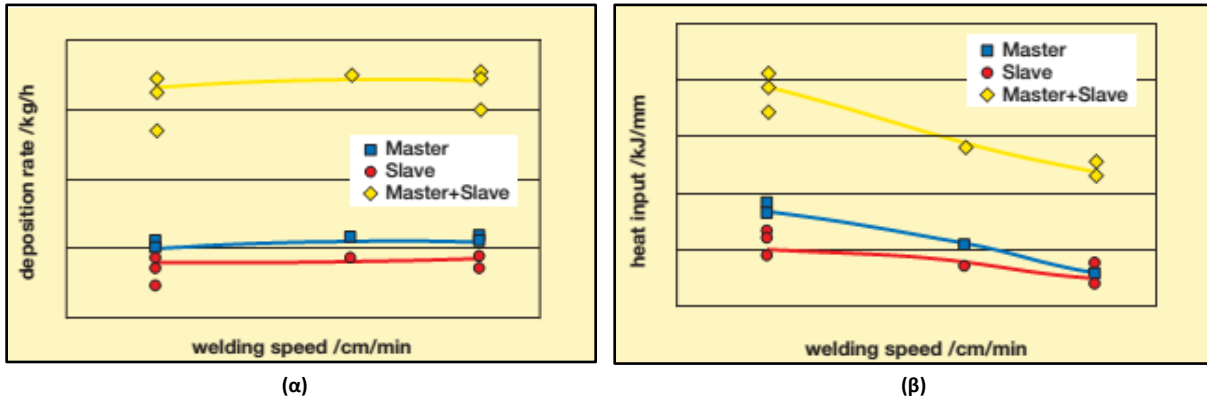
Εικόνα 2.3 : Συγκόλληση διείσδυσης 80% (12mm πάχος ελάσματος, χωρίς προετοιμασία της σύνδεσης). Ταχύτητα συγκόλλησης 80cm/min. [28]

Τέλος, όπως είναι φυσικό, η μέθοδος υπόκειται σε κάποιους **περιορισμούς**. Καταρχήν, βρέθηκε ότι το ευρύτερο επιτεύξιμο φάσμα παραμέτρων και οι καλύτερες συγκολλήσεις προκύπτουν όταν οι γωνίες των ακροφυσίων στο πιστόλι συγκόλλησης είναι  $0^\circ$  για το master και  $9^\circ$  για το slave (σχήμα 2.6). Μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των σημείων επαφής, οδηγεί το πίσω τόξο να ωθεί το τηγμένο μέταλλο προς τα εμπρός ενώ το προπορευόμενο τόξο καταλήγει στην κορυφή του σχηματιζόμενου κύματος του τηγμένου μετάλλου. Για τη σταθερότητα της διαδικασίας όταν το ρεύμα δίνεται σε παλμική μορφή, ο συγχρονισμός των τόξων είναι απαραίτητος. Ο κύριος λόγος για ασταθή διαδικασία είναι το έντονο κύμα της λίμνης συγκόλλησης το οποίο δυσκολεύει τον έλεγχο του μήκους του τόξου. Χρησιμοποιώντας συγχρονισμένη παλμική μορφή της έντασης ρεύματος στα δύο τόξα, το κύμα στη λίμνη συγκόλλησης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, με τη βέλτιστη κατάσταση να προκύπτει για μήκος παλμού (PPS, Pulse Phase Shift) της τάξης του 1 ms. Έτσι η λίμνη συγκόλλησης σταθεροποιείται. για υψηλότερες τιμές PPS το ύψος του κύματος αυξάνεται και η διαδικασία γίνεται πιο τυρβώδης. Από την άλλη πλευρά, σε μη συγχρονισμένη παλμική μορφή, το κύμα στη λίμνη συγκόλλησης προκαλεί εναπόθεση μετάλλου με βραχυκύκλωση και έναρξη εκτοξεύσεων (spatter). Οι εκτοξεύσεις προκαλούνται κυρίως από λάθος μεταφορά των σταγόνων στο πίσω τόξο, κάτι το οποίο ωθεί τη σταγόνα οριζόντια, διαμέσου του προπορευόμενου τόξου.

Οι υπόλοιποι συνδυασμοί τύπων τόξων οδηγούν, γενικά, σε φτωχότερα αποτελέσματα. Στα τόξα όπου η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου γίνεται με σταγονίδια, η όλη διαδικασία είναι πολύ ασταθής και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εκτοξεύσεων. Κατά τη μεταφορά με σταγόνες παρατηρείται μεγάλη κλίμακας κύμα στη λίμνη συγκόλλησης μεταξύ των τόξων, ενώ αν υπάρχει συνδυασμός τεχνικών (π.χ. στο προπορευόμενο τόξο παλμική και στο πίσω μεταφορά με σταγόνες), εμφανίζεται συχνά βραχυκύκλωμα στο τόξο στο οποίο χρησιμοποιείται παλμικής μορφής ρεύμα.



Σχήμα 2.6 : Ασύμμετρη γωνία των ακροφυσίων του πιστολιού συγκόλλησης.[28]



Σχήμα 2.7 : (α) Ρυθμός εναπόθεσης μετάλλου και (β) θερμική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας συγκόλλησης.[28]

## 2.4 Μορφή της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου [29][31]

Σε μια εγκάρσια τομή , η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου σχηματικά μοιάζει με ένα ποτήρι του κρασιού και μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη (εικόνα2.4) : το άνω ευρύ μέρος είναι η περιοχή που εργάζεται το τόξο (arc zone) και το κάτω πιο στενό μέρος είναι η περιοχή που εργάζεται το laser (laser zone). Το χαρακτηριστικό αυτό σχήμα δείχνει ότι κατά την υβριδική συγκόλληση laser-MIG/MAG οι κατανομές ενέργειας του laser και του τόξου είναι διαφορετικές στη λίμνη συγκόλλησης. Η ενέργεια του τόξου δρα κυρίως στο άνω μέρος σχηματίζοντας την ευρεία περιοχή τόξου , ενώ η ενέργεια του laser εισέρχεται στο κάτω μέρος μέσα από την κλειδαρότρυπα/μάτι (keyhole) δίνοντας στη συγκόλληση χαρακτηριστικά βαθιάς διείσδυσης.

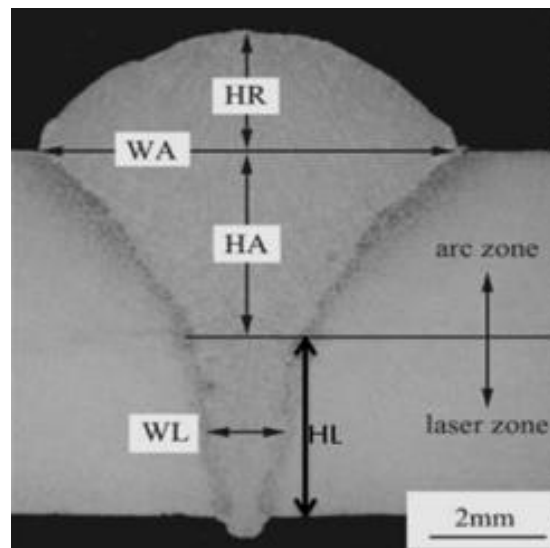
Οι διαστάσεις των δύο περιοχών , arc zone και laser zone , μπορούν να μεταβληθούν από το λόγο ενέργειας laser-τόξου (laser-arc energy ratio , ERLA) που επηρεάζει την ενεργειακή κατανομή στη λίμνη συγκόλλησης της υβριδικής διαδικασίας. Δηλαδή , μια μείωση στο ERLA μπορεί να μειώσει τη διαφορά ανάμεσα στα πάχη και τα ύψη των δύο περιοχών (WA,WL και HA,HL αντίστοιχα στην εικόνα 2.4) και να μεταβάλλει τη γενικότερη μορφή της υβριδικής συγκόλλησης. Στη MIG/MAG συγκόλληση , όσο αυξάνει η ένταση του ρεύματος , τόσο αυξάνει η πίεση του τόξου και η δύναμη πρόσκρουσης της τηγμένης σταγόνας στη λίμνη συγκόλλησης. Αύξηση , λοιπόν , των προαναφερθέντων μεγεθών οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού του τηγμένου μετάλλου που καταλήγει στη ρίζα της συγκόλλησης , κάτι που σημαίνει ότι περισσότερη θερμότητα εισέρχεται στο κάτω μέρος της συγκόλλησης και αυξάνει το HA και



περισσότερο υπόστρωμα λιώνει στην περιοχή laser και αυξάνει το WL. Από την άλλη πλευρά , το φαινόμενο αυτό μπορεί να μειώσει την επίδραση της θερμότητας από την ενέργεια του τόξου στην περιοχή τόξου , γεγονός που οδηγεί σε μείωση του WA. Η διαφορά , δηλαδή , στις διαστάσεις ανάμεσα στις δύο περιοχές μειώνεται καθώς μειώνεται το ERLA. Όταν η υβριδική συγκόλληση έχει υψηλή αναλογία σε ενέργεια από το laser , η διαδικασία μοιάζει περισσότερο με συγκόλληση laser και η συγκόλληση μπορεί να αποκτήσει λεπτόκοκκη , σκληρότερη μικροδομή , μαρτενσιτική ή μπαινιτική. Σε αντίθετη περίπτωση , όταν η αναλογία είναι υψηλή σε ενέργεια προερχόμενη από το τόξο , η διαδικασία μοιάζει περισσότερο σε συγκόλληση τόξου και η μικροδομή της έχει περισσότερο χονδροειδείς κόκκους περλίτη και σχετικά μικρή σκληρότητα.

Η αύξηση στην ισχύ του τόξου βασίζεται κυρίως στην αύξηση της παροχής ηλεκτροδίου και της τάσης του τόξου. Έτσι , αύξηση του όγκου του τηγμένου μετάλλου οδηγεί σε αύξηση του ύψους στο κορδόνι συγκόλλησης , εφόσον όλες οι διαστάσεις της σύνδεσης παραμένουν σταθερές. Αυξάνοντας την ισχύ του τόξου , η αύξηση του πάχους της συγκόλλησης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του ύψους στη ζώνη τήξης , επειδή η περιοχή που θερμαίνεται από το MIG/MAG τόξο δε μπορεί να διευρυνθεί άμεσα αναλογικά με την αύξηση της ισχύος του τόξου.

Η αναλογία της έκτασης της περιοχής laser και της περιοχής τόξου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά , εξαρτώμενη από τη ισχύ του laser , την προετοιμασία των άκρων των προς συγκόλληση τεμαχίων , τη διαδικασία συγκόλλησης , τις παραμέτρους συγκόλλησης και το είδος του υλικού. Το τελικό σχήμα της συγκόλλησης (σε εγκάρσια τομή) εξαρτάται , επίσης , από παράγοντες όπως : η κατάσταση του διάκενου , η προπορευόμενη πηγή θερμότητας , η κίνηση του τηγμένου μετάλλου στο διάκενο και τυχόν αποτελέσματα προθέρμανσης.



Εικόνα 2.4 : Μακροδομή και σχήμα υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου σε εγκάρσια τομή.[Gao et al.2008a]

## 2.5 Αέρια προστασίας [29][30][34]

### 2.5.1 Εισαγωγή

Η αέρια προστασία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην υβριδική συγκόλληση laser-τόξου , καθώς έχει μεγάλη επίδραση στη σταθερότητα της διαδικασίας και στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης , όταν η θερμοκρασία του μετάλλου φτάσει στο σημείο τήξης , το τηγμένο μέταλλο τείνει να οξειδώνεται γρήγορα κατά την αντίδρασή του με τον αέρα. Τα αέρια προστασίας παίζουν μεγάλο ρόλο στην παρεμπόδιση της οξείδωσης του τηγμένου μετάλλου. Στη συγκόλληση HLAW (Hybrid Laser-Arc Welding) ο σκοπός του αερίου προστασίας είναι αρχικά η απομόνωση του τηγμένου μετάλλου από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Επιπροσθέτως , χρησιμοποιείται για την καταστολή του σχηματιζόμενου από την ακτίνα laser πλάσματος , την απομάκρυνση του «νέφους» των ατμών του μετάλλου από την κλειδαρότρυπα και τη σταθεροποίηση της μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου.

Είναι σαφές ότι λόγω των διαφορετικών και μερικές φορές αντίθετων φυσικών ιδιοτήτων των δύο πλασμάτων (του σχηματιζόμενου εκ του laser και του αντίστοιχου εκ του τόξου ) , τα αέρια προστασίας πρέπει να ισορροπήσουν τις διαφορετικές απαιτήσεις αυτών. Γενικά , οι διαφορετικές απαιτήσεις των προστατευτικών αερίων στη συγκόλληση HLAW είναι οι εξής :

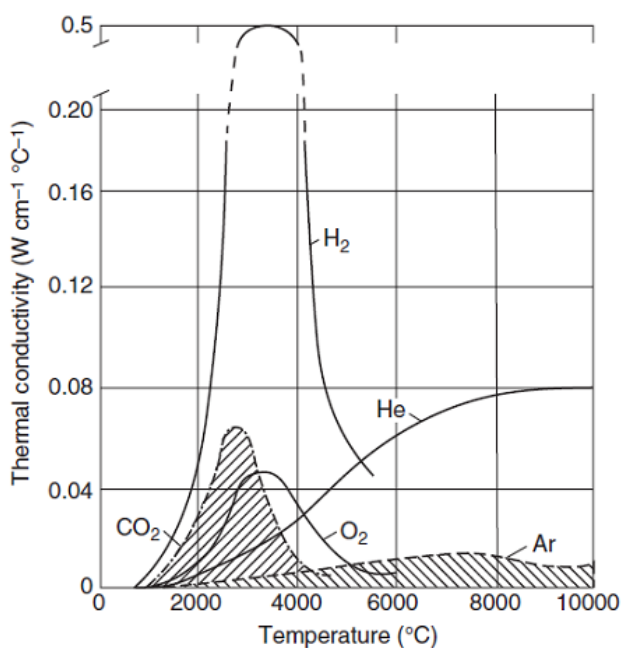
- **Σύνθεση** : είναι απαραίτητη η βέλτιστη σύνθεση του αερίου μίγματος προστασίας , ώστε να εκμεταλλεύεται κανείς στο έπακρο τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνικών (laser και τόξου) κατά τη συγκόλληση HLAW. Τα αέρια πρέπει να είναι αδρανή όσον αφορά τα υλικά εργασίας καθώς και στις υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο , η προσθήκη μερικών ενεργών βελτιώνει τη σταθερότητα του τόξου και το σχήμα της ραφής συγκόλλησης.
- **Ροή** : για συγκεκριμένη και σταθερή σύνθεση αερίου μίγματος προστασίας , υπάρχει μια βέλτιστη ροή αερίου που οδηγεί στη βέλτιστη διείδυση κατά τη συγκόλληση. Πολύ μικρή ροή αερίου δε μπορεί να καταστείλει αποτελεσματικά το πλάσμα που σχηματίζεται από την ακτίνα laser , ενώ πολύ μεγάλη ροή μπορεί να προκαλέσει διαταραχή στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης μειώνοντας την αποτελεσματικότητα στην προστασία της.
- **Δυνατότητα ιονισμού** : η υψηλή δυνατότητα ιονισμού του αερίου προστασίας βοηθά στη μείωση ενός φαινομένου που παρατηρείται στο πλάσμα (plasma defocusing effect) , με αποτέλεσμα συγκολλήσεις βαθύτερης διείδυσης. Συχνά , ωστόσο , οδηγεί σε αστάθεια του τόξου.

## 2.5.2 Συνήθη αέρια προστασίας και ιδιότητές τους

Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως στη συγκόλληση HLAW είναι τα : ήλιο (He) , αργό (Ar) , διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) , οξυγόνο (O<sub>2</sub>), άζωτο (N<sub>2</sub>) και υδρογόνο (H<sub>2</sub>). Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι βασικές φυσικές και χημικές ιδιότητες των προαναφερθέντων αερίων.

Μια σημαντική παράμετρος για το laser και για τη συγκόλληση τόξου , είναι η ενέργεια ιονισμού του αερίου προστασίας. Μπορεί να επηρεάσει το σχηματισμό και τον ιονισμό της στήλης τόξου , τη μορφή του τόξου και την ενεργειακή κατανομή του. Επίσης έχει επιπτώσεις στη μορφή και την ποσότητα του πλάσματος , καθώς επίσης και στη σταθερότητα της συγκόλλησης laser.

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα των αερίων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας , η οποία έχει επιπτώσεις στη μορφή της συγκόλλησης τόξου και τη μορφή πλάσματος της συγκόλλησης laser.



Σχήμα 2.8 : Θερμική αγωγιμότητα των αερίων συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Πίνακας 2.1 : Φυσικές και χημικές ιδιότητες αερίων που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση

| Type of gas                       | Content in the air (vol.%) | Boiling point at 1.013 bar (°C) | Atomic weight and mean molecular weight reprs | Density at 15 °C, 1 bar (kg m <sup>-3</sup> ) | Relative density with regard to the air (=1) at 15 °C, 1 bar | Dissociation and ionization energies (eV) <sup>c</sup> | Chemical activity |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---|---|--|--|-------------------|
| Hydrogen (H <sub>2</sub> )        | 0.5 × 10 <sup>-6a</sup>    | -252.9                          | 2.016   | 0.085   | 0.06   | 4.48<br>13.59  | Reducing          |
| Argon (Ar)                        | 0.934                      | -185.9                          | 39.948  | 1.669   | 1.38   | -<br>15.76<br>27.50                                    | Inert             |
| Helium (He)                       | 5.2 × 10 <sup>-6a</sup>    | -268.9                          | 4.002   | 0.167   | 0.14   | -<br>24.56<br>54.10                                    | Inert             |
| Nitrogen (N <sub>2</sub> )        | 78.084                     | -195.8                          | 28.013  | 1.170   | 0.91   | 9.76<br>14.55<br>29.60                                 | Reactive          |
| Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) | 0.033 <sup>a</sup>         | -78.5 <sup>b</sup>              | 44.011  | 1.849   | 1.44   | 5.80   | Oxidizing         |
| Oxygen (O <sub>2</sub> )          | 20.946                     | -183.0                          | 31.998  | 1.337   | 1.04   | 13.62<br>35.20   | Oxidizing         |

\* It is not obtained from the atmosphere.  
<sup>y</sup> Sublimation temperature.  
<sup>z</sup> 1 eV ¼ 1.6 X 10<sup>-6</sup> J; ionization energy of the majority of metals ranges between 6 and 9 eV.

### 2.5.3 Αδρανή αέρια

Το ήλιο και το αργό είναι τα δύο αέρια που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη συγκόλληση laser και τόξου. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1 και στο σχήμα 2.8 το ήλιο έχει την υψηλότερη ενέργεια ιονισμού και τη θερμική αγωγιμότητα. Στη συγκόλληση laser, το ήλιο είναι το προτιμώμενο αέριο προστασίας, εξαιτίας της καλής συμπεριφοράς του στην καταστολή πλάσματος της ακτίνας laser.

Το αργό (συνήθως σε μίγματα με CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>) επίσης χρησιμοποιείται στη συγκόλληση laser, ειδικά για τα στερεά laser, όπως τα Nd: YAG, fiber και diode laser. Σε αυτά τα laser, το αποτέλεσμα του πλάσματος προστασίας για την ακτίνα laser δεν είναι σημαντικό επειδή η απορρόφηση του πλάσματος είναι μικρή για το σχετικά μικρού μήκους κύματος ακτίνας laser. Επομένως, η συγκόλληση laser με τα στερεά laser παρέχει επίσης τα επιθυμητά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το αργό ως αέριο προστασίας.

Ωστόσο, για τη συγκόλληση laser των παχέων ελασμάτων, ειδικά όταν χρησιμοποιείται CO<sub>2</sub> laser, η αυξανόμενη δύναμη του laser σχηματίζει ένα ισχυρό πλάσμα που δεν μπορεί να κατασταλεί μόνο από το αργό. Η ακτίνα laser απεστιάζεται και η σταθερότητα της διαδικασίας μειώνεται. Περιστασιακά, τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης αλλάζουν από συγκόλληση βαθιάς διείσδυσης σε συγκόλληση θερμότητας, δημιουργώντας έτσι μια μερικώς διαπερατή συγκόλληση.

Σε αρκετές περιπτώσεις συγκολλήσεων laser χρησιμοποιείται ήλιο ως αέριο προστασίας. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους του (10-20 φορές το κόστος του αργού), μειώνεται η χρήση του και προτιμούνται μίγματα ηλίου-αργού. Μελέτες έχουν δείξει ότι σε συγκολλήσεις που χρησιμοποιείται laser CO<sub>2</sub>, όταν αναμιγνύονται ήλιο με αργό σε αναλογία 3:1, το αέριο προστασίας μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα. Εντούτοις, γενικά, για μια σταθερή διαδικασία και μια αξιόπιστη διείσδυση συγκόλλησης, το ήλιο είναι το μόνο χρησιμοποιήσιμο αέριο προστασίας στη συγκόλληση παχέων ελασμάτων με laser CO<sub>2</sub>.

Στη συγκόλληση τόξου συμπεριλαμβανομένης της συγκόλλησης TIG και της συγκόλλησης MIG/MAG, το αργό είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιημένο αδρανές αέριο, εξαιτίας της σταθερότητας που προσδίδει στην ανάφλεξη του τόξου. Στη συγκόλληση MIG/MAG με αέρια προστασία αργού, ο τρόπος μεταφοράς με σταγονίδια τηγμένου μετάλλου (spray) μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με πολύ λίγες εκτινάξεις (spatter). Επιπλέον, η υψηλή πυκνότητα του αργού σε σχέση με του αέρα δίνει καλή προστασία για τη λίμνη συγκόλλησης. Συγκρινόμενο με το αργό, το τόξο ηλίου απαιτεί υψηλότερη τάση τόξου με το ίδιο μήκος τόξου, υψηλότερη θερμοκρασία τόξου και μεγαλύτερη πρόσδοση θερμότητας, λόγω της μεγαλύτερης θερμικής αγωγιμότητας. Αυτά τα πλεονεκτήματα διευκολύνουν τη συγκόλληση των παχέων μερών και ενισχύουν την ταχύτητα συγκόλλησης. Όμως, λόγω της υψηλής ενέργειας ιονισμού του ηλίου κατά τη διάρκεια της MIG διαδικασίας συγκόλλησης τόξου, δημιουργείται υψηλή πίεση στα σταγονίδια, η οποία καθιστά τη μεταφορά των σταγονιδίων δύσκολη και αυξάνει το όριο του ρεύματος της μεταφοράς ψεκασμού. Η σταθερότητα διαδικασίας μειώνεται επίσης για αυτόν το λόγο.

Πίνακας 2.2 : Γενικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων στη ΗΛΔW αερίων προστασίας.

| Gases           | Chemical activity   | Ionization energy   | Atomic weight and density  | Thermal conductivity  | Arc behaviour   | Production/availability   | Economy          | Grade (1-5)<br>(1 = poor, 5 = excellent) |
|-----------------|---|---|--|---|---|---|------------------|--|
| H <sub>2</sub>  | <p>Reducing, burning</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Better bead surface</li> <li>• Higher arc temperature</li> <li>• High arc voltage</li> <li>• Higher welding speed</li> <li>• Good ignition</li> <li>• Risk of weld brittleness must be considered</li> <li>• Used as a partial component in austenitic stainless steel</li> </ul> | Low ionization energy   | Low density and small molecular weight   | Good thermal conductivity and good penetration  | Stable, concentrated arc<br>Used as a partial component in small amounts with argon   | H <sub>2</sub> O electrolysis<br>From different chemical processes, good availability | Cheap            | 2  |
| Ar              | <p>Inert No reactive component with any subject</p>   | Low ionization energy   | High density and large molecular weight<br>With small amounts sufficient shielding | Low thermal conductivity and narrow penetration   | Unstable arc<br>Wandering arc   | Air separation 0.94% in air, good availability  | Relatively cheap | 4  |
| He              | <p>Inert No reactive component with any subject</p>   | High ionization energy  | Low density and small molecular weight   | Good thermal conductivity and good penetration  | Unstable arc<br>Wandering arc   | Extracted from natural gas in LNG plants, limited availability                        | Expensive        | 5  |
| N               | <p>Reactive In higher temperatures builds nitrides and porosity</p>   | Low ionization energy   | Neutral density  | Low thermal conductivity  | Used as a partial component with hydrogen in root shielding of austenitic stainless steels<br>When used alone, unstable arc | Air separation, good availability   | Cheap            | 2  |
| CO <sub>2</sub> | <p>Oxidizing</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilizing the arc with argon and helium</li> <li>• Creates fumes</li> </ul>   | <p>Dissociation energy relatively high, dissociates to carbon and oxygen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• High arc voltage</li> <li>• Dissociation is partly endothermic reaction (near the arc) and partly exothermic (farther from the arc)</li> <li>• Less porosity</li> </ul> | <p>High density, molecule of carbon and oxygen Good shielding effect</p>           | <p>Good thermal conductivity</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Due to the dissociation the gas volume and pressure increases in the arc</li> <li>• Good side penetration</li> <li>• Bead dome increases</li> </ul> | <p>Extracted from different chemical processes and power plant fumes, good availability</p>                                 | Cheap   | 3                |  |
| O <sub>2</sub>  | <p>Oxidizing</p> <p>Stabilizes the arc with argon<br/>Used as a partial component in small amounts<br/>In bigger amounts increases oxide inclusion</p>  | Low ionization energy   | Neutral density  | Low thermal conductivity  | Used as a partial component in small amounts with argon   | Air separation, good availability   | Cheap            | 1  |



### 2.5.4 Ενεργά αέρια

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα ενεργά αέρια προστασίας στις συγκολλήσεις τόξου είναι τα CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>, τα οποία όμως δε χρησιμοποιούνται σε συγκολλήσεις laser.

Ο κύριος σκοπός της χρήσης των δύο αερίων, είναι η βελτίωση των ιδιοτήτων συγκόλλησης και η μείωση μερικών προβλημάτων, όπως η ολίσθηση της καθόδου και οι μορφολογικές ατέλειες της συγκόλλησης. Το ινστιτούτο έρευνας των μετάλλων LU-group έχει μελετήσει τα αποτελέσματα της περιεκτικότητας του οξυγόνου στα μίγματα He-O<sub>2</sub> και Ar-O<sub>2</sub> της συγκόλλησης TIG του χαμηλού σε περιεκτικότητα άνθρακα, ανοξειδωτου χάλυβα 304. Αυτή η μελέτη κατέδειξε ότι σε υψηλή θερμοκρασία το οξυγόνο διαχωρίζεται από το μόριο του O<sub>2</sub>. Όταν μπει στη λίμνη συγκόλλησης και φθάσει σε μια κρίσιμη συγκέντρωση μπορεί να αλλάξει την επιφανειακή τάση του λιωμένου μετάλλου της λίμνης επηρεάζοντας έτσι τη ροή του και συνεπώς τη μορφή συγκόλλησης.

Όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι υψηλή στο αέριο προστασίας, η υγρή ροή μετάλλου που οδηγείται από την επιφανειακή τάση, μεταφέρεται από τις άκρες της λίμνης στο κέντρο και τα χαμηλότερα μέρη, δημιουργώντας μία στενή και βαθιά συγκόλληση. Όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι χαμηλότερη, η λιωμένη ροή του μετάλλου μεταφέρεται από το κέντρο της λίμνης στις άκρες, δημιουργώντας μια πλατειά και ρηχή συγκόλληση. Στη συγκόλληση MAG, επιπλέον, τα δύο ενεργά αέρια προωθούν τον καθαρισμό των μεταλλικών σταγονιδίων και μειώνουν στη συνέχεια το ελάχιστο ρεύμα ώστε να επιτευχτεί μεταφορά με ψεκασμό.

### 2.5.5 Υδρογόνο και άζωτο

Υδρογόνο και άζωτο είναι άλλα αέρια που χρησιμοποιούνται σπάνια στη συγκόλληση laser- τόξου. Το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο. Είναι μη τοξικό και εύφλεκτο (σημείο ανάφλεξης σε 560 °C). Είναι πολύ ελαφρύτερο από τον αέρα (βλ. πίνακα 2.1) και εκρηκτικό σε ένα μίγμα με αέρα και οξυγόνο, σε μεγάλη ποσότητα. Από όλα τα αέρια, έχει την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, υψηλή ενθαλπία και είναι αέριο, το οποίο συνδυαζόμενο με το οξυγόνο, εμποδίζει το σχηματισμό οξειδίων. Σαν αέριο προστασίας, το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως προσθήκη σε άλλα αέρια, κυρίως σε αργό, αλλά και ήλιο σε μικρότερες ποσότητες. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές ως αέριο πλάσματος με το αργό, ή ως συστατικό στο μίγμα αργού-υδρογόνου όταν συγκολλούνται υψηλά κραματωμένοι ανοξειδωτοι χάλυβες με συγκόλληση τόξου. Γενικά, η προσθήκη του υδρογόνου γίνεται σε ποσοστό 4-8%. Ο κύριος σκοπός της προσθήκης του υδρογόνου είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του τόξου και της θερμότητας που εισάγεται για το υπόστρωμα και συνεπώς, μια αύξηση στην ταχύτητα ή την αποδοτικότητα συγκόλλησης.

Το άζωτο είναι επίσης ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο και είναι μη τοξικό. Είναι το κύριο συστατικό του αέρα. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1, ο ιονισμός του αζώτου, απαιτεί σχετικά υψηλή ενέργεια, επειδή καταναλώνει κάποια ενέργεια όταν διασπάται το άτομο N<sub>2</sub>. Αυτό το φαινόμενο διευκολύνει την καταστολή πλάσματος για τη συγκόλληση με laser. Έναντι του αργού τα πλεονεκτήματα του αζώτου είναι το χαμηλότερο κόστος και η καλύτερη καταστολή του πλάσματος στη συγκόλληση laser, ενώ τα μειονεκτήματά του είναι η εμφάνιση πόρων και η μείωση της αντοχής της



συγκόλλησης ως αποτέλεσμα της δημιουργίας ενώσεων αζώτου. Το άζωτο, επομένως, χρησιμοποιείται σπάνια στη συγκόλληση laser για απαιτήσεις υψηλής ποιότητας ενώσεων. Όταν συγκολλείται ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας, η προσθήκη αζώτου στο αέριο προστατευτικό μίγμα αργού, μπορεί να βελτιώσει την ακαμψία του τόξου και τη μορφή της συγκόλλησης.

## 2.6 Πλεονεκτήματα της μεθόδου HLAW [26][27][29]

Η υβριδική συγκόλληση laser-τόξου συνδυάζει τα καλύτερα στοιχεία των δύο επιμέρους μεθόδων και, όπως είναι λογικό, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα αν συγκριθεί με αυτές.

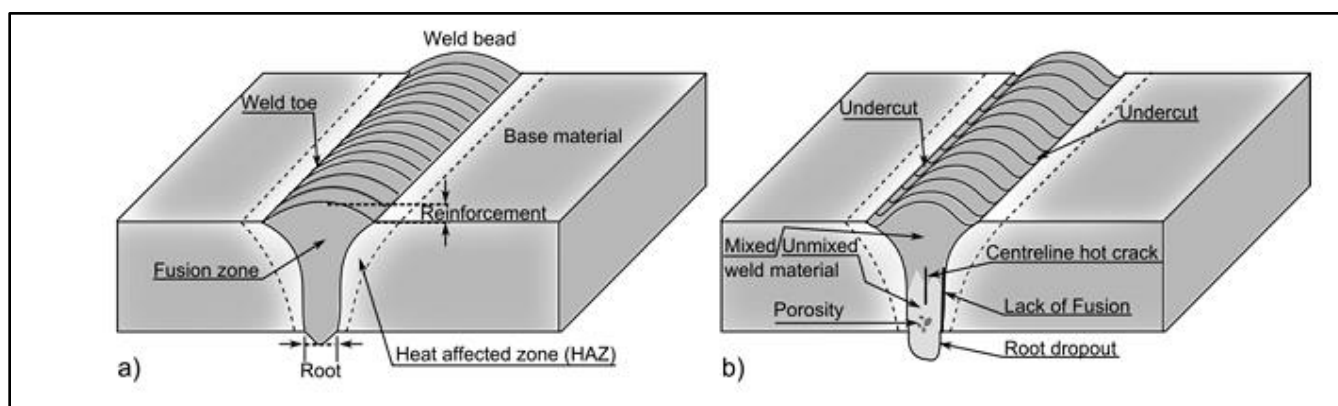
Σε σχέση με τη συγκόλληση laser :

- Για χαμηλότερη ισχύ της ακτίνας laser, καλύτερη σύνδεση των προς συγκόλληση τεμαχίων.
- Μικρότερες απαιτήσεις προετοιμασίας και σύσφιξης των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Σε σχέση με τις συγκολλήσεις τόξου :

- Υψηλότερες ταχύτητες συγκόλλησης.
- Δυνατότητα συγκόλλησης με μηδενικό διάκενο μεταξύ των τεμαχίων και δυνατότητα συγκόλλησης I seam σε σύνδεση των τεμαχίων με επικάλυψη (lap joint).
- Συγκόλληση μεγάλης διεύθυνσης μονού περάσματος, ακόμα και για ελάσματα μεγάλου πάχους.
- Χαμηλότερα επίπεδα θερμικής ισχύος (Q), άρα και μεγαλύτεροι ρυθμοί απόψυξης.
- Πολύ λιγότερες παραμορφώσεις.

Γενικά, η μέθοδος HLAW παρουσιάζει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας όσον αφορά τη διαδικασία συγκόλλησης. Για παράδειγμα, η εισροή ενέργειας και η μεταφορά τηγμένου μετάλλου μπορούν να ελεγχθούν αρκετά εύκολα.



Σχήμα 2.9 : a) Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιας τομής υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου, b) Τυπικά σφάλματα και ατέλειες της υβριδικής συγκόλλησης laser-τόξου.

## 2.7 Τυπικά σφάλματα υβριδικών συγκολλήσεων [26][27][29]

Τα σφάλματα και οι ατέλειες που εμφανίζονται συνηθέστερα στις υβριδικές συγκολλήσεις laser-τόξου , καθώς και στις αυτογενείς laser συγκολλήσεις , είναι πόροι και σφάλματα στερεοποίησης (ή ρωγμές). Μπορεί , επίσης , να παρατηρηθούν σφάλματα ατελούς τήξης , υπερβολικής διείδυσης με αποτέλεσμα υπέρμετρη ενίσχυση της ρίζας καθώς και σφάλματα υποκοπών (σχήμα 2.9). Από τα προαναφερθέντα , οι ρωγμές είναι σημαντικά πιο κρίσιμες και κυριώς το στάδιο έναρξής τους και η επακόλουθη αστοχία. Οι ατέλειες αυτές είναι σφάλματα στερεοποίησης , αλλά αντίθετα με τις κοινές ρωγμές στερεοποίησης (hot cracks) , είναι γενικά πολύ μικρές , της τάξεως μερικών τετραγωνικών χιλιοστών και είναι απομονωμένες ρωγμές που σχηματίζονται με μια συγκεκριμένη κανονικότητα κατά μήκος της συγκόλλησης. Τα σφάλματα αυτά προκύπτουν πιο εύκολα όσο αυξάνεται το πάχος του ελάσματος και συνήθως εντοπίζονται μόνο στον κεντρικό άξονα της συγκόλλησης. Οι αιτίες που τα προκαλούν είναι πολλαπλές , με πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις που μπορεί να ποικίλουν κατά περίπτωση.

## Κεφάλαιο 3 : Διάβρωση συγκολλήσεων χάλυβα

### 3.1 Χάλυβες [6]

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Οι χάλυβες συνιστούν κράματα Fe-C , με περιεκτικότητα σε άνθρακα  $\leq 1.5$  % κατά βάρος. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται , οι χάλυβες περιέχουν κατά περίπτωση και κάποια άλλα στοιχεία κραμάτωσης , τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές ή και τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Σύμφωνα με τη χημική τους σύσταση , οι χάλυβες κατηγοριοποιούνται σε :

- Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες και
- Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες.

Ως προς τον προορισμό τους κατηγοριοποιούνται σε :

- Χάλυβες διαμόρφωσης και
- Χυτοχάλυβες.

Ως προς τις χρήσεις τους κατηγοριοποιούνται σε :

- Χάλυβες κατασκευών
- Εργαλειοχάλυβες
- Ανοξείδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες και
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών.

#### 3.1.2 Κοινί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινί ή ανθρακούχοι χάλυβες ονομάζονται τα κράματα Fe-C , τα οποία , εκτός από τις συνήθεις ακαθαρσίες (έως 0.04% P και 0.05% S) , δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης εκτός από μικρά ποσοστά σε Mn (0.25-1.00 %).

Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα , οι κοινί ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται σε :

- Υποευτηκτοειδείς , με ποσοστό άνθρακα μικρότερο από 0.80% κ.β. Όσον η περιεκτικότητα σε άνθρακα κυμαίνεται από 0.10% έως 0.25% κ.β. , καλούνται μαλακοί χάλυβες , από 0.20% έως 0.50% χάλυβες μετρίου άνθρακα και για περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 0.50% καλούνται χάλυβες υψηλού άνθρακα.
- Ευτηκτοειδείς , που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.80% κ.β.
- Υπερευτηκτοειδείς , που η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα κυμαίνεται από 0.80% έως 2.00% κ.β.

Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα αυξάνεται και η μηχανική αντοχή των χάλυβων , ενώ η ολκιμότητά τους ελαττώνεται. Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα προκαλεί , επίσης , αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά και δυσχεραίνει τη

συγκολλητότητα του χάλυβα. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση χάλυβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα , που οφείλουν την αντοχή τους στην κραμάτωση.

### 3.1.3 Κραματωμένοι χάλυβες

Το ποσοστό άνθρακα στους κραματωμένους χάλυβες δεν υπερβαίνει , πρακτικά , το 1% ενώ τα συνήθη στοιχεία προσθήκης είναι : Ni , Mn , Cr , Si , Mo (κύριες προσθήκες) και V , W , Cu , Ti , Al , B , Pb , Nb (δευτερεύουσες προσθήκες). Ανάλογα με το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης , οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε :

- Ελαφρά κραματωμένους ή μικροκραματωμένους , όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%.
- Μετρίως κραματωμένους , με το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης να κυμαίνεται μεταξύ 2% και 10%.
- Ισχυρά κραματωμένους , όπου το ποσοστό στοιχείων προσθήκης υπερβαίνει το 10%.

Η προσθήκη των στοιχείων κραμάτωσης βελτιώνει τη μηχανική αντοχή του χάλυβα , την αντοχή του σε διάβρωση και τη δυσθραυστότητά του. Επιδρά στην τροποποίηση του διαγράμματος ισορροπίας Fe-C και στη μετατόπιση των καμπυλών θερμικών κατεργασιών (CCT και TTT). Έτσι , μπορούμε να πάρουμε χάλυβες διαφόρων μικροδομών (μαρτενσιτικούς , ωστενιτικούς , φερριτικούς).

Πίνακας 3.1 : Επίδραση κραματικών στοιχείων στις ιδιότητες των χάλυβων.

|           | Αύξηση<br>εμβαπτότητας | Αντοχή σε<br>επαναφορά | Βελτίωση<br>μηχανικών<br>ιδιοτήτων | Αντοχή σε<br>διάβρωση | Σκληρότητα | Παρεμπόδιση<br>γήρανσης | Αντοχή σε<br>μηχανική<br>φθορά |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------|-------------------------|--------------------------------|
| <b>Ni</b> | x                      | x                      | x                                  | x                     |            |                         |                                |
| <b>Mn</b> | (x)                    | (x)                    |                                    |                       |            |                         |                                |
| <b>Cr</b> | (x)                    | (x)                    |                                    | x                     |            |                         |                                |
| <b>Si</b> | (x)                    |                        | x                                  | x                     | x          |                         |                                |
| <b>Mo</b> | x                      | x                      | x                                  | x                     | x          | x                       | x                              |
| <b>W</b>  | x                      | x                      |                                    |                       | x          |                         | x                              |
| <b>V</b>  | X                      | x                      |                                    |                       | x          |                         | x                              |
| <b>Al</b> | (x)                    |                        |                                    |                       |            |                         |                                |
| <b>Ti</b> | x                      | (x)                    |                                    |                       |            | x                       |                                |
| <b>Co</b> |                        |                        |                                    |                       | x          |                         |                                |

( ) : μικρή αύξηση.

## 3.2 Διάβρωση συγκολλήσεων ανθρακούχων και κραματωμένων χαλύβων [9][10][14][37]

### 3.2.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση στην περιοχή της συγκόλλησης εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων. Μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες μεταλλουργικής φύσεως, όπως η επιλεκτική διάβρωση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) ή της ζώνης τήξης, ή μπορεί να σχετίζεται με γεωμετρικές παραμέτρους όπως η συγκέντρωση τάσεων στη βάση μιας αυχενικής συγκόλλησης ή η δημιουργία ρωγμών λόγω της σχεδίασης της σύνδεσης. Επιπλέον, μπορεί να προκληθεί τοπική διάβρωση ως αποτέλεσμα περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία ή η αγωγιμότητα του διαβρωτικού υγρού. Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση των ρωγματώσεων λόγω μηχανικών τάσεων και διαβρωτικού περιβάλλοντος (Stress Corrosion Cracking-SCC), τη συμπεριφορά του υλικού επηρεάζουν τόσο μεταλλουργικοί όσο και γεωμετρικοί παράγοντες.

### 3.2.2 Η επίδραση της μικροδομής της συγκόλλησης

Το μέταλλο βάσης, κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, υφίσταται θερμοκρασίες που κυμαίνονται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τη θερμοκρασία τήξης, ανάλογα την απόσταση από το σημείο όπου γίνεται η συγκόλληση. Επομένως, λαμβάνουν χώρα μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί στη ζώνη τήξης και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και η τελική μικροδομή μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά τον εγγενή ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα. Μπορεί να παραχθεί ένα μεγάλο εύρος μικροδομών σε μια συγκόλληση ανάλογα με τους ρυθμούς απόψυξης και αυτές οι μικροδομές εξαρτώνται από την παροχή ενέργειας, την προθέρμανση, το πάχος του μετάλλου, το μέγεθος της ραφής και φαινόμενα επαναθέρμανσης σε συγκολλήσεις πολλών περασμάτων.

Η μικροδομές του μετάλλου συγκόλλησης, της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και του μετάλλου βάσης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών, χημικής σύστασης και διαφόρων εγκλεισμάτων (οξειδία, σουλφίδια). Αντίστοιχα, μπορεί να ποικίλλει και η συμπεριφορά της κάθε περιοχής σε διάβρωση. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που έχουν εφαρμοστεί σωστά τα μέτρα για το μετριασμό της διάβρωσης (π.χ. διάφορες επιστρώσεις, καθοδική προστασία κλπ.), κανονικά θα επαρκούν ώστε να αποφευχθεί η επιλεκτική διάβρωση της κάθε περιοχής.

### 3.2.3 Η επίδραση της χημικής σύστασης του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης

Η σύσταση του προστιθέμενου μετάλλου συνήθως διαφέρει ελαφρά από αυτήν του μετάλλου βάσης. Η ίδια η συγκόλληση έχει διαφορετική μικροδομή από το υπόλοιπο υλικό και κατά συνέπεια έχει διαφορετικές-συνήθως κατώτερες-μηχανικές ιδιότητες. Η συγκόλληση ενισχύεται συνήθως με επιπλέον

στρώμα (ή στρώματα) που εξασφαλίζει ότι η εγκάρσια τομή κατά μήκος της συγκόλλησης έχει μεγαλύτερο πάχος από το μέταλλο βάσης. Το γεγονός αυτό μπορεί ωστόσο να δημιουργήσει προβλήματα σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά της σε διάβρωση. Μια επιφάνεια που διαθέτει ασυνέχειες μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχή της ροής γύρω από τη συγκόλληση, η οποία δεν είναι πάντα επιθυμητή, όταν η συγκόλληση αποτελεί μέρος του προφίλ ομοιόμορφης επιφάνειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να αλλάξει η σύνθεση του μετάλλου συγκόλλησης, ώστε αυτό να διαθέτει την ίδια αντοχή μετά τη συγκόλληση με το μέταλλο βάσης. Στην περίπτωση των μικροκραματωμένων χαλύβων υψηλής αντοχής αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων νικελίου, βαναδίου, μολυβδενίου ή χρωμίου στο προστιθέμενο μέταλλο. Η κραμάτωση, ωστόσο, έχει σαν αποτέλεσμα το μέταλλο πλήρωσης να είναι κάθοδος ως προς το μέταλλο βάσης, με αποτέλεσμα τον κίνδυνο γαλβανικής διάβρωσης μεταξύ των δύο περιοχών. Ωστόσο, ο συνολικός βαθμός γαλβανικής διάβρωσης είναι γενικά χαμηλός, διότι η άνοδος του γαλβανικού στοιχείου (μέταλλο βάσης) έχει πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια από την κάθοδο (συγκόλληση). Μόνο σε περιπτώσεις που η μεγάλη αντίσταση του ηλεκτρολύτη περιορίζει την περιοχή της ανόδου σε μια στενή ζώνη, γειτονικά της περιοχής τήξης και το βασικό μέταλλο διαθέτει μικροδομή μαρτενσίτη ή μπαινίτη στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να είναι σημαντικός.

#### 3.2.4 Παραμένουσες τάσεις

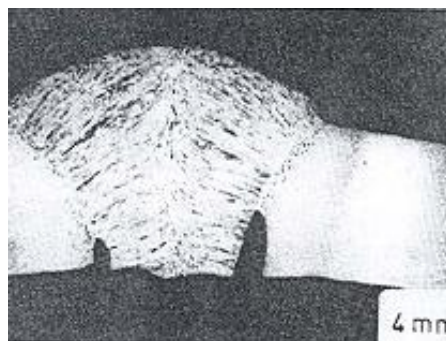
Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, το μέταλλο βάσης, η ΘΕΖ και οι υποκείμενες στρώσεις στη ζώνη τήξης υπόκεινται σε τάσεις λόγω διαστολών και συστολών που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Κατά τη στερεοποίηση, υψηλά επίπεδα παραμενουσών τάσεων, συχνά με τιμές κοντά στο όριο διαρροής του υλικού, είναι αποτέλεσμα της συρρίκνωσης της συγκόλλησης. Η συγκέντρωση τάσεων, ως αποτέλεσμα γεωμετρικών ασυνεχειών, όπως η υπερβολική διείδυση (χρήση πλεονάζοντος μετάλλου συγκόλλησης) και η ατελής διείδυση (πιθανότητα ρωγματώσεων και αστοχίας λόγω κόπωσης), είναι εξίσου πολύ σημαντική καθώς μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση από μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking - SCC).

#### 3.2.5 Επιλεκτική διάβρωση της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης (ΘΕΖ)

Μπορεί να παραχθεί ένα μεγάλο εύρος μικροδομών της ΘΕΖ καθώς, κοντά στο όριο τήξης, η ωστενιτοποίηση της ΘΕΖ κατά τη θέρμανση ακολουθείται από νεό μετασχηματισμό κατά την ψύξη, ο οποίος δίνει φερριτική, περλιτική, μπαινιτική, μαρτενσιτική ή μικτή μικροδομή, ανάλογα με τη σύσταση του υλικού, τη θερμοκρασία και το ρυθμό ψύξης. Μακρύτερα από τη συγκόλληση το υλικό φτάνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία, οπότε η ωστενιτοποίηση δεν είναι πλήρης, ενώ οι περιοχές στις οποίες η θερμοκρασία δεν ξεπερνά τη θερμοκρασία ωστενιτικού μετασχηματισμού ( $AC_1 = 723 \text{ }^\circ\text{C}$ ) δεν επηρεάζονται σημαντικά, εκτός ίσως από αύξηση της σκληρότητας.

Η δομή και το εύρος της ΘΕΖ εκατέρωθεν της συγκόλλησης εξαρτώνται από τη μορφή και τη θέση της συγκόλλησης, την προσδιδόμενη θερμότητα μέσω της διαδικασίας της συγκόλλησης και τη σύσταση του υλικού. Παρά τις διαφορετικές μικροδομές, στην πλειοψηφία των εφαρμογών, η συμπεριφορά σε διάβρωση δεν επηρεάζεται τόσο και η επιλεκτική διάβρωση της ΘΕΖ είναι σχετικά σπάνια. Ένα

παράδειγμα διάβρωσης της ΘΕΖ δίνεται στην εικόνα 3.1. Το φαινόμενο έχει παρατηρηθεί σε πολλά υδατικά περιβάλλοντα συνήθως με τιμή pH , όχι χωρίς εξαιρέσεις , μεταξύ 7 και 8.



Εικόνα 3.1 : Επιλεκτική διάβρωση στη ΘΕΖ συγκόλλησης ανθρακούχου χάλυβα , μετά από λειτουργία σε υδατικό περιβάλλον.

Σε θαλάσιο περιβάλλον , η διάβρωση της ΘΕΖ παρατηρείται υπό την παρουσία προϊόντων μετασχηματισμού όπως μαρτενσίτης , κατώτερος μπαινίτης ή ωστενίτης. Επομένως , χάλυβες που ευνοούν την ανάπτυξη μικροδομών αυξημένης σκληρότητας (π.χ. χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε Mn) μπορεί να εμφανίσουν αυξημένη τοπική διάβρωση στη ΘΕΖ. Αντίθετα , μικροκραματωμένοι χάλυβες δεν είναι ευαίσθητοι , καθώς κατά την απόψυξη της ΘΕΖ η πιθανότητα εμφάνισης μαρτενσίτη είναι πολύ μικρή.

Η σχέση ανάμεσα στην προκύπτουσα μικροδομή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και στην τάση για διάβρωση της περιοχής είναι δεδομένη και η προδιάθεση αυτή για διάβρωση αυξάνεται όσο οι παράμετροι συγκόλλησης και το ίδιο το μέταλλο ευνοούν το σχηματισμό σκληρής φάσης. Εξάλλου , ο σκληρός χάλυβας διαβρώνεται γρηγορότερα , λόγω των τοπικών μικροκαθόδων στην επιφάνειά του , οι οποίες ευνοούν την αντίδραση του υδρογόνου. Προς αποκατάσταση της επιθυμητής μικροδομής και μείωση της τάσης για διάβρωση είναι δυνατό να γίνει θερμική κατεργασία μετά το πέρας της συγκόλλησης. Είναι προτιμότερο πάντως να επιλεγεί και να εφαρμοστεί η καταλληλότερη διαδικασία συγκόλλησης προς μείωση της σκληρότητας , διότι η θερμική κατεργασία απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες για μείωση της σκληρότητας , γεγονός που την καθιστά πολλάκις μη πρακτική.

Ένα άλλο είδος διάβρωσης της ΘΕΖ είναι αυτό που προσβάλλει τα όρια με την περιοχή τήξης. Καλείται διάβρωση σιδηροτροχιάς (tramline corrosion) και παρατηρείται σε όξινα υδατίνα περιβάλλοντα. Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης , το τηγμένο μέταλλο που δημιουργείται , προέρχεται από το τηγμένο προστιθέμενο μέταλλο και το μέταλλο βάσης που τήκεται. Το τηγμένο μέταλλο αναμιγνύεται από το τόξο και είναι ομογενές. Μετά το πέρασμα του τόξου , το τήγμα παραμένει τηγμένο και ακίνητο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η διάχυση , τότε , τηγμένου υλικού που προέρχεται από το μέταλλο βάσης στο όριο της συγκόλλησης (δίπλα στη ΘΕΖ) , οδηγεί στο σχηματισμό στενής ζώνης διαβαθμισμένης σύστασης. Υπό ορισμένες συνθήκες η περιοχή αυτή μπορεί να είναι ισχυρά ανοδική ως προς το μέταλλο βάσης και τη συγκόλληση , με αποτέλεσμα την πρόκληση γαλβανικής διάβρωσης.



### 3.2.6 Επιλεκτική διάβρωση του μετάλλου συγκόλλησης

Το μέταλλο συγκόλλησης ενός χάλυβα μπορεί να υποσθεί επιλεκτική διάβρωση , αλλά αν υπάρχει αντιδιαβρωτική προστασία για την κύρια κατασκευή , όπως επικαλύψεις ή καθοδική προστασία , το φαινόμενο συνήθως μπορεί να αποφευχθεί. Υπάρχουν , ωστόσο , περιπτώσεις που οι μέθοδοι προστασίας μπορεί να αστοχήσουν , με αποτέλεσμα την εμφάνιση τοπικής διάβρωσης.

Η επιλεκτική διάβρωση του μετάλλου συγκόλλησης σε συγκολλήσεις χάλυβα μπορεί να εμφανισθεί σε διάφορες συνθήκες και για διάφορες διαδικασίες συγκόλλησης. Σημαντικό ρόλο παίζουν το είδος του χάλυβα , η προσδιδόμενη θερμότητα , η προθέρμανση του υλικού , οι παραμένουσες τάσεις , η σκληρότητα , το μέγεθος των κόκκων και το προστιθέμενο μέταλλο συγκόλλησης. Ισχύουν όσα προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2.5 όσον αφορά την επίδραση της μικροδομής στην τάση διάβρωσης του μετάλλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση , όμως , η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη εξαιτίας της παρουσίας αποξειδοτικών προϊόντων , ο τύπος και το πλήθος των οποίων εξαρτάται από το είδος της χρησιμοποιούμενης προστασίας. Συνήθως , ο υψηλότερος βαθμός διάβρωσης εμφανίζεται σε συγκολλήσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν βασικά επενδεδυμένα ηλεκτρόδια. Σε θαλασσινό νερό , για παράδειγμα , ο βαθμός διάβρωσης μιας συγκόλλησης πραγματοποιημένης με χρήση ενός βασικού επενδεδυμένου (flux) ηλεκτροδίου , μπορεί να είναι τριπλάσιος από μια συγκόλληση που πραγματοποιήθηκε με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο ρουτιλίου. Σε ότι αφορά πιο ειδικές μεθόδους συγκόλλησης , όπως η συγκόλληση βυθισμένου τόξου (Submerged Arc Welding) , η συμπεριφορά των συγκολλήσεων φαίνεται να βρίσκεται κάπου ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες.



Εικόνα 3.2 : Διάβρωση στην περιοχή τη συγκόλλησης.

Γενικά για τη διάβρωση του μετάλλου βάσης και του μετάλλου συγκόλλησης έχει παρατηρηθεί ότι :

- Σε χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε Mn , η διάβρωση επικεντρώνεται στη ΘΕΖ , αν και το φαινόμενο αυτό είναι αντιμετωπίσιμο με τις κατάλληλες θερμικές κατεργασίες. Η αυξημένη ποσότητα Mn αυξάνει τη σκληρότητα με αποτέλεσμα η μικροδομή που προκύπτει κατά την απόψυξη στη ΘΕΖ να είναι αυξημένης σκληρότητας , άρα επιδεκτικότερη σε διάβρωση.
- Ο βαθμός διάβρωσης του μετάλλου συγκόλλησης εξαρτάται περισσότερο από της περιεκτικότητας του τηκόμενου ηλεκτροδίου σε Ni και Cu και λιγότερο από τη σύσταση του ίδιου του χάλυβα. Επίσης έχει παρατηρηθεί υψηλός ρυθμός διάβρωσης σε χάλυβες με στοιχεία κραμάτωσης Cu , Ni , Cr .
- Σε χάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε Si παρατηρήθηκε ευαισθησία στο μέταλλο συγκόλλησης , γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι περιεκτικότητα σε Si μικρότερη του 0.2% είναι επιζήμια.



Εικόνα 3.3 : Διάβρωση ελασμάτων και ενισχυτικών άνω πλευρικής δεξαμενής έρματος.[48]

### 3.2.7 Τύποι διάβρωσης συγκολλήσεων χάλυβα

Οι συγκολλήσεις μπορούν να υποστούν όλες τις κλασικές μορφές διάβρωσης , ωστόσο , είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις μορφές διάβρωσης που επηρεάζονται από αλλαγές στη μικροδομή και τη σύσταση. Τέτοιες μορφές διάβρωσης όπως η γαλβανική διάβρωση , η διάβρωση με βελονισμούς (pitting) , διάβρωση από μηχανική καταπόνηση , περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion) , προσβολή από υδρογόνο , πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψιν όταν γίνεται ο σχεδιασμός κατασκευών με συγκολλήσεις.

**Γαλβανική διάβρωση :** Αυτό το είδος διάβρωσης στηρίζεται στην αρχή του γαλβανικού στοιχείου , δηλαδή στη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ δύο ανόμοιων σε επαφή μετάλλων , που βρίσκονται στο ίδιο διαβρωτικό ή αγώγιμο διάλυμα και η οποία διαφορά δυναμικού προκαλεί ροή ηλεκτρονίων στο σύστημά τους. Αυξάνεται , έτσι , η ταχύτητα διάβρωσης του λιγότερο ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου (άνοδος) και ελαττώνεται η ταχύτητα διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού (κάθοδος). Η χρήση προστιθέμενου μετάλλου διαφορετικής σύστασης από το μέταλλο βάσης μπορεί να προκαλέσει πιθανή ηλεκτροχημική διαφορά , που καθιστά κάποιες περιοχές της συγκόλλησης πιο ενεργές με αποτέλεσμα την πρόκληση γαλβανικής διάβρωσης. Ο τύπος αυτός διάβρωσης ήταν ένα από τα πρώτα προβλήματα , σχετικά με τη διάβρωση συγκολλήσεων , που παρατηρήθηκαν σε πλοία τα οποία λειτουργούσαν σε αρκτικά νερά. Στις περιπτώσεις αυτές , ο πάγος κατέστρεφε τις προστατευτικές επικαλύψεις (εκθέτοντας γυμνό το χάλυβα) καθώς και τις ανόδους , καθιστώντας αναποτελεσματικό το σύστημα καθοδικής προστασίας. Παρατηρήθηκε , έτσι , μεγαλύτερος βαθμός διάβρωσης στο μέταλλο των συγκολλήσεων , αποτέλεσμα πιθανών ηλεκτροχημικών διαφορών μεταξύ των μετάλλων συγκόλλησης και βάσης , τέτοιων ώστε το μέταλλο συγκόλλησης να λειτουργεί ως άνοδος στο γαλβανικό στοιχείο.

**Ρωγμάτωση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking-SCC) :** Οι συγκολλήσεις μπορούν να υποστούν διάβρωση από μηχανική καταπόνηση υπό ορισμένες συνθήκες. Αυτή η μορφή διάβρωσης αναφέρεται σε ρωγμάτωση η οποία για να προκληθεί προϋποθέτει σωστό συνδυασμό διαβρωτικού περιβάλλοντος , ευπαθούς μικροδομής και εφελκυστικών τάσεων (παραμένουσες τάσεις στην περίπτωση των συγκολλήσεων).

Οι προκύπτουσες ρωγμές , η έναρξη των οποίων γίνεται από εσοχές που δημιουργούνται από διάβρωση (π.χ. βελονισμοί) , έχουν τη μορφή ψαθυρής μηχανικής θραύσης και η διάδοσή τους μπορεί να γίνει με δύο τρόπους : περικρυσταλλικά ή/και διακρυσταλλικά. Κατά την περικρυσταλλική διάδοση , η ρωγμή προχωράει κατά μήκος των ορίων των κόκκων , ενώ κατά τη διακρυσταλλική η διάδοση γίνεται διαμέσου των κόκκων κατά μια διεύθυνση ή και διακλαδισμένα , χωρίς να πηγαίνει στα όρια. Συχνά , μπορεί να συμβούν και οι δύο τρόποι διάδοσης ταυτόχρονα , αλλά ο επικρατέστερος καθορίζεται από το είδος και τη σύνθεση του κράματος , καθώς και το διαβρωτικό περιβάλλον.

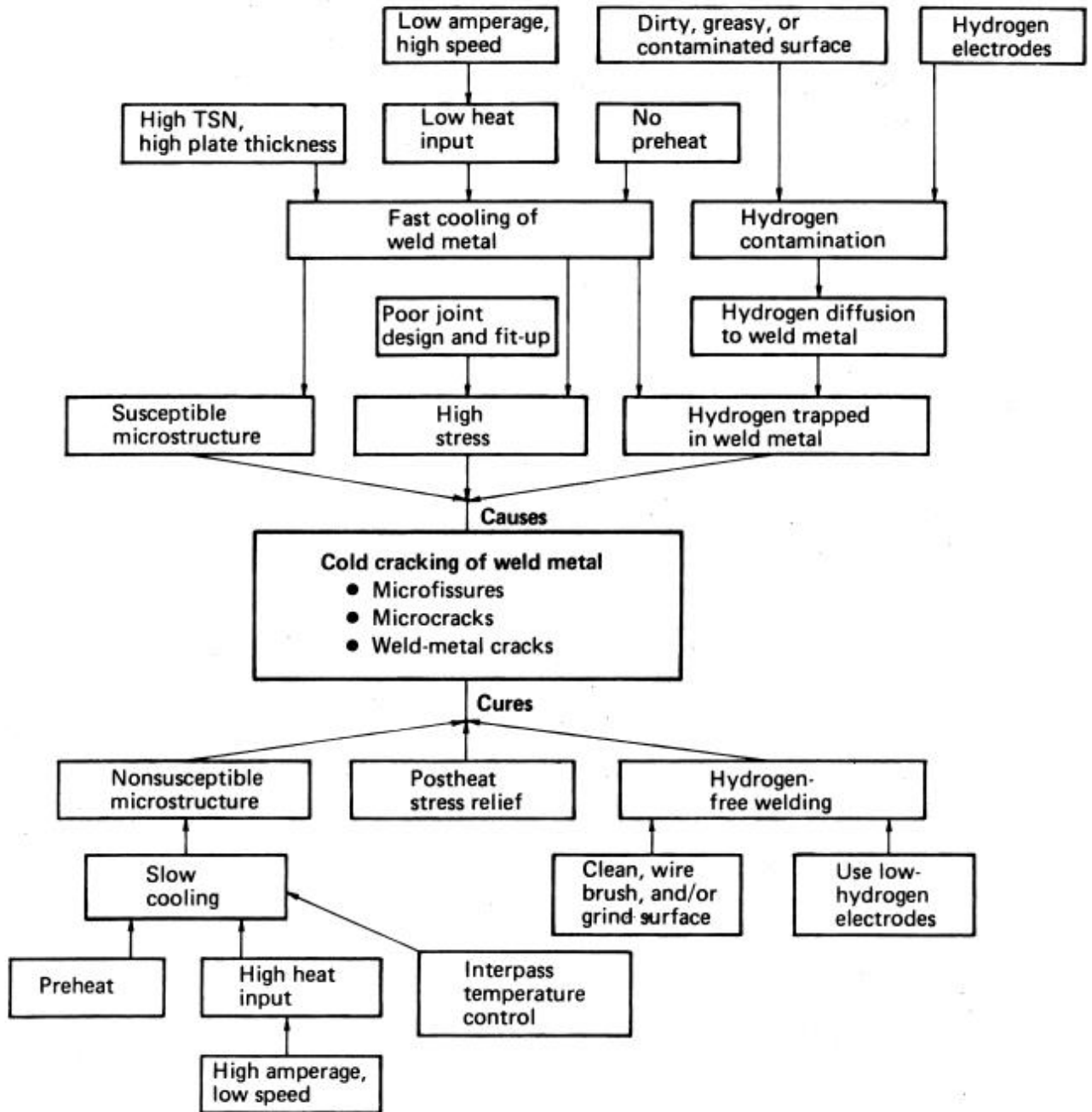
Οι παράμετροι της συγκόλλησης επηρεάζουν το μέγεθος και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων , καθώς η έκταση της υπό τάση περιοχής και το μέγεθος των παραμορφώσεων είναι εύθες ανάλογα με το μέγεθος της εναπόθεσης του προστιθέμενου μετάλλου , το οποίο συνδέεται άμεσα με την παροχή θερμότητας κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Η αστοχία είναι πιθανότερη σε συγκολλήσεις με μικρή προσδιδόμενη θερμότητα (όπως για παράδειγμα η GTAW και λιγότερο οι GMAW , SMAW) , λόγω της αυξημένης ευαισθησίας των σκληρότερων δομών που δημιουργούνται αναπόφευκτα.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος , μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης , μπορούν να γίνουν θερμικές κατεργασίες. Σκοπός των κτεργασιών είναι να γίνει ανακατανομή των επικεντρωμένων σε διάφορα σημεία φορτίσεων και μείωση του μεγέθους των παραμενουσών εφελκυστικών τάσεων που συμβάλλουν στην έναρξη των ρωγματώσεων.

**Προσβολή από υδρογόνο :** Ορίζεται ως η δημιουργία ρωγμών σε ένα υλικό λόγω ρόφησης υδρογόνου , χωρίς να υπάρχει διάβρωση στην επιφάνεια. Πρόκειται για ψαθυρή μηχανική θραύση του υλικού η οποία προκαλείται από τη διείσδυση και τη διάχυση ατομικού υδρογόνου στην κρυσταλλική δομή του κράματος.

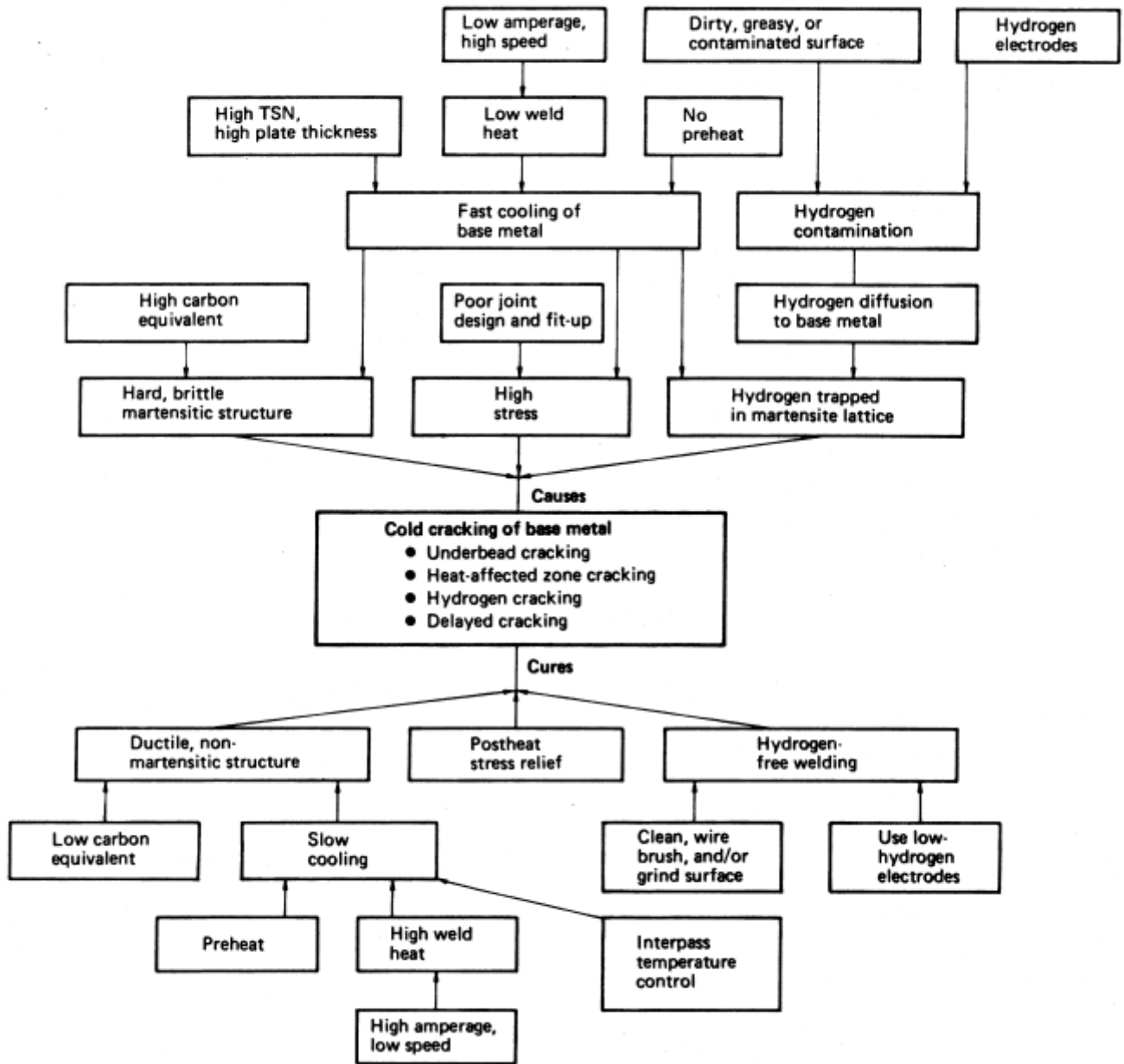
- Ρωγματώσεις λόγω παρουσίας υδρογόνου (Hydrogen Induced Cold Cracking) :** Πρόκειται για ρωγματώσεις που εμφανίζονται αφού το μέταλλο συγκόλλησης έχει στερεοποιηθεί και ψυχθεί και μπορούν να εμφανισθούν είτε στη ΘΕΖ είτε στη ζώνη τήξης μικροκραματωμένων και άλλων σκληρών χαλύβων. Οι ρωγματώσεις μπορούν να εμφανισθούν ώρες , ημέρες ή και εβδομάδες αφότου η συγκόλληση έχει ψυχθεί και παρατηρούνται στη ρίζα της συγκόλλησης , στις άκρες της ραφής ή κάτω από την επιφάνεια της ραφής. Για την εμφάνισή τους είναι απαραίτητοι τρεις παράγοντες : η παρουσία ατομικού υδρογόνου , ευαισθησία της μικροδομής της ΘΕΖ ή μέρους της ζώνης τήξης σε ψαθυροποίηση από υδρογόνο (hydrogen embrittlement) και παρουσία υψηλών εφελκυστικών τάσεων. Ο έλεγχος ενός ή περισσότερων εκ των προαναφερθέντων παραγόντων , μπορεί να συμβάλλει στην πρόληψη του φαινομένου. Η εμφάνιση των ρωγματώσεων στο μέταλλο βάσης συχνά αποδίδεται σε υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα , θείο ή άλλα κραματικά στοιχεία. Έλεγχος του φαινομένου προϋποθέτει χρήση ηλεκτροδίων χαμηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο , πολύ καλή προθέρμανση , επαρκή θερμοκρασία στη ζώνη τήξης πριν από κάθε πάσο και καλή διείσδυση. Η ευαισθησία της μικροδομής στην εμφάνιση ρωγματώσεων σχετίζεται με τη διαλυτότητα του υδρογόνου σε αυτή και την πιθανότητα υπερκορεσμού. Ο ωστενίτης , στον οποίο το υδρογόνο είναι εξαιρετικά διαλυτό , είναι λιγότερο ευαίσθητος στην εμφάνιση ρωγματώσεων , ενώ ο μαρτενσίτης , στον οποίο η διαλυτότητα του υδρογόνου είναι χαμηλότερη , είναι περισσότερο ευαίσθητος. Αυτό συμβαίνει γιατί ο πολύ υψηλός απαιτούμενος ρυθμός απόψυξης για το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη , παγιδεύει το υδρογόνο σε μια κατάσταση υπερκορεσμού μέσα στο μαρτενσίτη. Έτσι το υδρογόνο κατά την έκλυσή του στο εσωτερικό του μαρτενίτη , δρα κατά κάποιον τρόπο εκρηκτικά ασκώντας τεράστιες πιέσεις , με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγματώσεων. Για το λόγο αυτό , υψηλοί ρυθμοί απόψυξης πρέπει να αποφεύγονται.
- Ρωγματώσεις λόγω κόπωσης σε περιβάλλον υδρόθειου (Sulfide Stress Cracking-SSC) :** Πρόκειται για αστοχία του χάλυβα που οφείλεται στην ταυτόχρονη δράση τάσεων και την απορρόφηση υδρογόνου λόγω διάβρωσης από υδρόθειο ( $H_2S$ ) σε υγρή μορφή. Η ευαισθησία στη συγκεκριμένη μορφή διάβρωσης είναι συνάρτηση ενός αριθμού μεταβλητών , δύο εκ των πιο σημαντικών είναι η αντοχή και η σκληρότητα του χάλυβα και το επίπεδο των εφελκυστικών τάσεων. Η μορφή αυτή διάβρωσης (SSC) , συνήθως σχετίζεται με υψηλής αντοχής χάλυβες και κράματα , με όριο αντοχής μεγαλύτερο των 550 MPa (80 ksi) , και συγκολλήσεις με ΘΕΖ υψηλής σκληρότητας (> 22 HRC). Συγκολλήσεις που δεν έχουν υποστεί θερμική κατεργασία μετά το πέρας της διαδικασίας είναι ιδιαίτερα προβληματικές , καθώς συχνά εμφανίζουν υψηλές τιμές σκληρότητας στη ΘΕΖ όπως και υψηλά επίπεδα παραμενουσών εφελκυστικών τάσεων , παράγοντες οι οποίοι βοηθούν στην έναρξη και διάδοση των εν λόγω ρωγματώσεων. Η αντίσταση σε αυτή τη μορφή διάβρωσης συνήθως βελτιώνεται με κατάλληλες θερμικές

κατεργασίες μετά το πέρας της διαδικασίας της συγκόλλησης , καθώς και μέσω της χρήσης χαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χαλύβων που έχουν υποστεί ωστενιτοποίηση και βαφή.



Σχήμα 3.1 : Αιτίες και μέτρα πρόληψης της εμφάνισης ρωγματώσεων λόγω απορρόφησης υδρογόνου (Hydrogen Induced Cold Cracking) στο μέταλλο συγκόλλησης.[14]





Σχήμα 3.1 : Αιτίες και μέτρα πρόληψης της εμφάνισης ρωγματώσεων λόγω απορρόφησης υδρογόνου (Hydrogen Induced Cold Cracking) στο μέταλλο βάσης.[14]

### 3.2.8 Προστασία των συγκολλήσεων από διάβρωση

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιήσουν τη διάβρωση των συγκολλήσεων. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι ακόλουθες :

**Επιλογή του κατάλληλου υλικού :** Η προσεκτική και σωστή επιλογή των υλικών και των αναλωσίμων (ηλεκτρόδια) για τη διαδικασία της συγκόλλησης μπορεί να περιορίσει μακροσκοπικά και μικροσκοπικά τις διαφορές στη σύσταση και να μειώσει την εμφάνιση γαλβανικών στοιχείων και κατά συνέπεια γαλβανικής διάβρωσης. Κατά κανόνα για το λόγο αυτό , επιλέγονται ηλεκτρόδια των οποίων η χημική σύσταση είναι παρόμοια με του υλικού των προς συγκόλληση τεμαχίων.

**Προετοιμασία της επιφάνειας :** Σωστή επιλογή διαδικασίας καθαρισμού μπορεί να μειώσει την εμφάνιση ελαττωμάτων , που συχνά είναι σημεία εκκίνησης διάβρωσης σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Μπορεί , ωστόσο , η διαδικασία καθαρισμού να είναι και πηγή κινδύνου. Για παράδειγμα σε μια επιφάνεια η οποία έχει καθαρισθεί μηχανικά (με αμμοβολή ή λείανση) , μπορεί να παραμείνουν ακκαθαρσίες , για αυτό και πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη προσοχή. Μπορεί , επίσης , να χρησιμοποιηθεί και μεταλλική βούρτσα , συνήθως από ανοξείδωτο χάλυβα καθώς δε σχηματίζονται προϊόντα διάβρωσης ικανά να κατακρατήσουν υγρασία.

**Σωστός σχεδιασμός της διαδικασίας :** Ο σωστός σχεδιασμός της συγκόλλησης θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα , μετά την εναπόθεση του προστιθέμενου μετάλλου , ικανό πάχος ραφής με χαμηλό προφίλ και ελάχιστοποίηση των εγκλεισμάτων. Ένας λάθος σχεδιασμός μπορεί να προκαλέσει ρωγμές που παγιδεύουν στάσιμα διαλύματα , προκαλώντας διάβρωση με βελονισμούς ή/και χαραγής. Ακανόνιστη εναπόθεση προστιθέμενου μετάλλου σε συγκολλήσεις σωληνώσεων , μπορεί να προκαλέσει τυρβώδη ροή με συνέπεια την αντίστοιχη μορφή διάβρωσης (erosion corrosion) και τελικό αποτέλεσμα διαρροή.

**Σωστή εκτέλεση της διαδικασίας :** Είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιείται επαρκής διείσδυση , ώστε να αποφεύγονται τα κενά κάτωθεν της ραφής. Η επιφάνεια της συγκόλλησης πρέπει να καθαρίζεται προσεκτικά μετά από κάθε πάσο , για την απομάκρυνση της σκουριάς. Αν η μέθοδος συγκόλλησης χρησιμοποιεί σκόνη , η γεωμετρία της σύνδεσης των τεμαχίων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την πλήρη απομάκρυνσή της , καθώς πολλά υπολείμματα σκόνης είναι υδρόφιλα και διαβρωτικά.

**Έλεγχος της τελικής επιφάνειας της συγκόλλησης :** Αμέσως μετά το πέρας της διαδικασίας , η συγκόλληση εξετάζεται οπτικά. Για τη μέγιστη αντίσταση σε διάβρωση , συνήθως απαιτείται μια ομαλή , ομοιόμορφα οξειδωμένη επιφάνεια , ελεύθερη από ξένα σωματίδια και ανωμαλίες. Γενικά , οι τελικές επιφάνειες των συγκολλήσεων ποικίλλουν σε τραχύτητα και εκτοξεύσεις μετάλλου , κάτι το οποίο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μέσω λείανσης.



**Προστατευτικές επικαλύψεις :** Χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση για την αποφυγή εμφάνισης τοπικής διάβρωσης. Η επικάλυψη πρέπει να καλύπτει επαρκώς και τη συγκόλληση και το μέταλλο βάσης και συνήθως απαιτεί ειδική προετοιμασία της επιφάνειας. Ανάλογα το είδος της επικάλυψης χρησιμοποιούνται διάφορες στρώσεις , κάθε μια από τις οποίες έχει κάποια βασικά χαρακτηριστικά και εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο σκοπό. Για παράδειγμα , τα συστήματα οργανικών επικαλύψεων αποτελούνται από τα εξής μέρη : το αστάρι (primer) , το ενδιάμεσο στρώμα (undercoat) και το τελικό επίστρωμα (finish coat ή topcoat).



Εικόνα 3.4 : Τελική όψη δεξαμενής έρματος με προστατευτική επικάλυψη .[47]



Εικόνα 3.5 : Διαδικασία προστατευτικής επικάλυψης χώρου φορτίου (cargo hold).[49]

**Θερμικές κατεργασίες μετά το πέρας της διαδικασίας συγκόλλησης :** Μια κατάλληλη θερμική κατεργασία της συγκόλλησης μετά το πέρας της διαδικασίας , μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της ευαισθησίας σε διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση των επιπέδων των παραμενουσών τάσεων , που είναι ένας παράγοντας που βοηθάει την ανάπτυξη ρωγματώσεων από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (SCC). Μια θερμική κατεργασία μπορεί , επίσης , να συμβάλλει στη μεταφορά του υδρογόνου από τη συγκόλληση και να μειώσει την ευαισθησία στις ρωγματώσεις που προκαλούνται λόγω του φαινομένου αυτού. Τέλος , μπορεί να μειώσει αποκλίσεις στη σύσταση και κατά συνέπεια την εμφάνιση μικρο-γαλβανικών στοιχείων.

**Θερμοκρασία προθέρμανσης και θερμοκρασία μεταξύ των πάσων :** Η επιλογή και χρήση της κατάλληλης θερμοκρασίας προθέρμανσης (preheat temperature) και της αντίστοιχης (interpass temperature) μεταξύ των πάσων κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης , μπορεί να αποτρέψει την εμφάνιση ρωγματώσεων λόγω προσβολής από υδρογόνο στους ανθρακούχους και τους μικροκραματωμένους χάλυβες.

**Αποφυγή εμφάνισης ρωγματώσεων :** Σκουριά που τυχόν παραμένει στο προστιθέμενο μέταλλο καθώς και διάφορες ατέλειες , όπως ατελής διείδυση και μικροσχισμές , μπορεί να δημιουργήσουν τοπικά σημεία εκκίνησης και κατά συνέπεια διάβρωση χαραγής. Κατάλληλη επιλογή αναλωσίμων για τη συγκόλληση , κατάλληλη διαδικασία συγκόλλησης , και προσεκτική και πλήρης απομάκρυνση της σκουριάς μπορεί να εξαλείψει αυτή τη μορφή διάβρωσης.

**Ελαχιστοποίηση πηγών υδρογόνου :** Κατάλληλη επιλογή ηλεκτροδίου (επενδεδυμένα ηλεκτρόδια χαμηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο) , αν η μέθοδος χρησιμοποιεί σκόνη πρέπει να αποφευχθεί η απορρόφηση υγρασίας από αυτή (βλ. παράγραφο 1.3.2.4) , κατάλληλη προετοιμασία και καθαρισμός των επιφανειών των προς συγκόλληση τεμαχίων. Οι προαναφερθείσες ενέργειες μπορούν να μειώσουν δραστικά την απορρόφηση υδρογόνου από το υλικό.

Γενικά , πάντως , δεν πρέπει να συνάγεται ότι μια μέθοδος προστασίας που χρησιμοποιείται σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον ενδείκνυται και για διαφορετικό διαβρωτικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό , είναι απαραίτητος ο εργαστηριακός έλεγχος ενός υλικού σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς στην εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας.

## Κεφάλαιο 4 : Πειραματική Διαδικασία

### 4.1 Εισαγωγή

Βασικός σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε διάβρωση του ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 και συγκολλήσεών του και η διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης μέσω της απώλειας μάζας.

Αρχικά έγινε διαστασιολόγηση των δοκιμών (μέτρηση μήκους, πλάτους, πάχους) με τη βοήθεια παχυμέτρου, καθώς και των συγκολλήσεων. Στη συνέχεια, η συμπεριφορά του χάλυβα σε διάβρωση παρατηρήθηκε κατά την έκθεση των δοκιμών σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 30 ημερών (90 κύκλοι γήρανσης, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14993:2001(E)). Στο θάλαμο τοποθετήθηκαν 3 ομάδες δοκιμών. Η πρώτη ομάδα αποτελούταν από 37 δοκίμια συνολικά (13 με συγκόλληση και 24 μετάλλου βάσης) και έμεινε στο θάλαμο το διάστημα 6 Μαρτίου-10 Απριλίου 2014. Η δεύτερη ομάδα αποτελούταν από συνολικά 35 δοκίμια (12 με συγκόλληση και 23 μετάλλου βάσης) και η τρίτη ομάδα από συνολικά 36 δοκίμια (12 με συγκόλληση και 24 μετάλλου βάσης). Συνολικά, λοιπόν, εξετάστηκαν 108 δοκίμια. Η δεύτερη και η τρίτη ομάδα παρέμειναν ταυτόχρονα στο θάλαμο το διάστημα 29 Αυγούστου-13 Οκτωβρίου 2014.

Στις ακόλουθες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου γίνεται περιγραφή του υλικού των δοκιμών καθώς και των πειραματικών διαδικασιών που ακολουθήθηκαν.

### 4.2 Υλικό – Χάλυβας υψηλής αντοχής AH36 [6][10][11][12]

Το υλικό που μελετήθηκε είναι, όπως προαναφέρθηκε, ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία HTS (High Tensile Steel). Το υλικό διατέθηκε ως εξής: **δύο πλάκες διαστάσεων 400 x 300 x 18 mm<sup>3</sup>**, **τρεις πλάκες διαστάσεων 300 x 400 x 13 mm<sup>3</sup>** και **τέλος, 37 δοκίμια διαστάσεων 50 x 70 x 18 mm<sup>3</sup>**. Ως “πλάκα” περιγράφονται δύο ελάσματα συγκολλημένα μεταξύ τους (εικόνα 4.1.α). Επίσης, από τα 37 δοκίμια που διατέθηκαν τα 13 είχαν συγκόλληση (εικόνα 4.1.β).

Η ονομασία και κατάταξή του ως ναυπηγικού χάλυβα τύπου AH36, ακολουθεί το πρότυπο A131M της ASTM και προέρχεται από τον Lloyd’s Register of Shipping Steels. Με αυτήν την ονομασία είναι παγκόσμια γνωστός, ωστόσο συναντάται και με άλλη ονομασία, σύμφωνα με την κωδικοποίηση κάποιων χωρών (π.χ K11852 Η.Π.Α, A36 Ρωσία, 1.0565 Γερμανία κλπ). Η χημική σύσταση του εν λόγω χάλυβα δίνεται στον πίνακα 4.1.

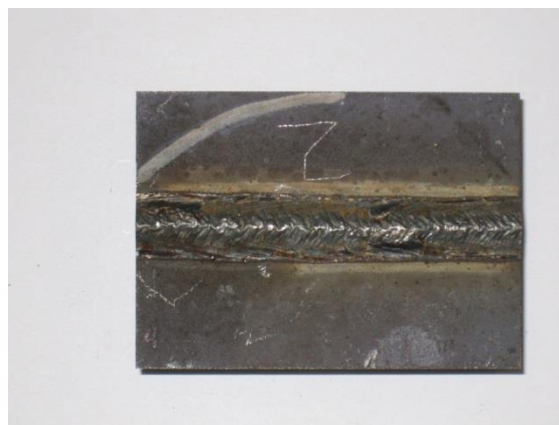
Πίνακας 4.1: Χημική σύσταση (% κ.β.) σε στοιχεία κραμάτωσης του χάλυβα ΑΗ36.

| Chemical Composition    | % max. unless specified in range |
|-------------------------|----------------------------------|
| C                       | 0.18                             |
| Mn                      | 0.90–1.60                        |
| Si                      | 0.10–0.50                        |
| P                       | 0.035                            |
| S                       | 0.035                            |
| Al ( acid Soluble ) min | 0.015                            |
| Nb                      | 0.02–0.05                        |
| V                       | 0.05–0.10                        |
| Ti                      | 0.02                             |
| Cu                      | 0.35                             |
| Cr                      | 0.20                             |
| Ni                      | 0.40                             |
| Mo                      | 0.08                             |

Το όριο διαρροής του χάλυβα είναι  $36 \text{ Kp/mm}^2$  ή  $353.2 \text{ MPa}$ . Σύμφωνα με τον IACS (International Association of Classification Societies) οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 4.2).



(α)



(β)

Εικόνα 4.1 : (α) πλάκα με συγκόλληση FCAW , (β) δοκίμιο με υβριδική συγκόλληση Laser-GMA

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων

| Grade                        | Yield Strength<br>ReH<br>( N / mm <sup>2</sup> )<br>min | Tensile Strength<br>Rm<br>( N / mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|---|---|
| A<br>B<br>D<br>E             | 235   | 400 - 520   |
| AH32<br>DH32<br>EH32<br>FH32 | 315   | 440 - 570   |
| AH36<br>DH36<br>EH36<br>FH36 | 355   | 490 - 630   |
| AH40<br>DH40<br>EH40<br>FH40 | 390   | 510 - 660   |

Για πάχη έως 12.5 mm (0.50 in) ο χάλυβας είναι συνήθως ημι-καθισχυασμένος, δηλαδή μερικώς αποξειδωμένος, ενώ για μεγαλύτερα πάχη ο χάλυβας είναι καθισχυασμένος, δηλαδή πλήρως αποξειδωμένος. Επίσης, για πάχος ελάσματος έως 12.5 mm η ελάχιστη περιεκτικότητα σε Mn μπορεί να φτάσει το 0.70% κ.β., ενώ για τέτοια πάχη και για ημι-καθισχυασμένο χάλυβα, η κατώτερη περιεκτικότητα σε Si μπορεί να είναι χαμηλότερη του 0.10% κ.β.

Όταν χρησιμοποιείται ένα εκ των Al, Nb και V πρέπει να ικανοποιείται η ελάχιστη περιεκτικότητα που έχει οριστεί για το καθένα, ενώ όταν γίνεται συνδυασμός, το συνολικό άθροισμα της περιεκτικότητας σε Al, Nb και V δεν πρέπει να ξεπερνάει το 0.12% κ.β.

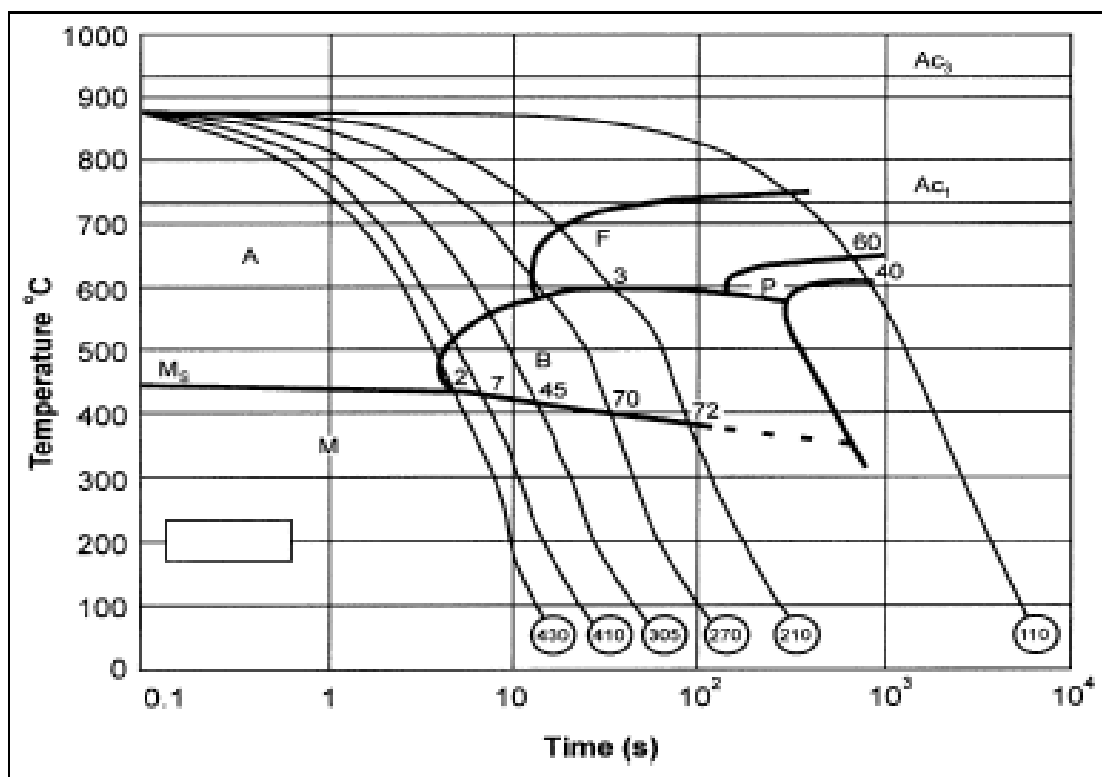
Η σκληρότητα του χάλυβα AH36 είναι της τάξης των 180 Vickers.

Η ποσότητα του ισοδύναμου άνθρακα (equivalent carbon content-ECC) του χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 δίνεται από τη σχέση:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$$

Η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα  $C_{eq}$  για τον AH36 ποικίλει από 0.38 – 0.57, αφού υπάρχει πολύ μεγάλη διακύμανση στην περιεκτικότητα του Mn. Συνήθως η τιμή του  $C_{eq}$  για τον AH36 του εμπορίου δεν ξεπερνάει το 0.40.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα CCT του χάλυβα AH36.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα CCT για τον χάλυβα AH36

#### 4.2.1 Χρήση χάλυβα AH36

Η γάστρα του πλοίου και οι δεξαμενές κατασκευάζονται συνήθως από κοινό ναυπηγικό χάλυβα. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα μικρότερου πάχους ελάσματα και χαμηλότερο βάρος, σε σχέση με τους ανθρακούχους χάλυβες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χάλυβας AH36, που ανήκει στους χάλυβες υψηλής αντοχής.

Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36 :

- έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα ,
- έχει μεγαλύτερη σκληρότητα
- υψηλότερη αντοχή,
- εμφανίζει την ίδια αντοχή σε κόπωση,
- εξίσου καλή συγκολλησιμότητα, ενώ
- η αντοχή του σε διάβρωση είναι παρόμοια

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα στοιχεία κραμάτωσης συνήθη χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής.

Πίνακας 4.3: Στοιχεία κραμάτωσης κοινού ναυπηγικού χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής

|                         | % max. unless specified in range |                        |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Chemical Composition    | Κοινός χάλυβας                   | Χάλυβας υψηλής αντοχής |
| C                       | 0.18- 0.21                       | 0.18                   |
| Mn                      | min 0.60                         | 0.90–1.60              |
| Si                      | 0.35 – 0.50                      | 0.10–0.50              |
| P                       | 0.035                            | 0.035                  |
| S                       | 0.035                            | 0.035                  |
| Al ( acid Soluble ) min | -                                | 0.015                  |
| Nb                      | -                                | 0.02–0.05              |
| V                       | -                                | 0.05–0.10              |
| Ti                      | -                                | 0.02                   |
| Cu                      | -                                | 0.35                   |
| Cr                      | -                                | 0.20                   |
| Ni                      | -                                | 0.40                   |
| Mo                      | -                                | 0.08                   |

Ωστόσο, ο χάλυβας υψηλής αντοχής υφίσταται μεγαλύτερες τάσεις (λόγω του μειωμένου πάχους), συνεπώς η απόξεση των προστατευτικών επικαλύψεων γίνεται πιο γρήγορα, άρα αυξάνεται η πιθανότητα έναρξης ρωγμής και συνεπώς ο κίνδυνος διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση. Τέλος, λόγω του μειωμένου πάχους κατά τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής, μειώνεται και το περιθώριο διάβρωσης (Περιθώριο διάβρωσης, corrosion margin : είναι το πάχος του χάλυβα που μπορεί να θυσιαστεί χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων αντοχής στην κατασκευή). Συνεπώς κατασκευές από χάλυβα HS μπορεί να είναι ευπαθέστερες στη διάβρωση από αντίστοιχες από κοινό χάλυβα.

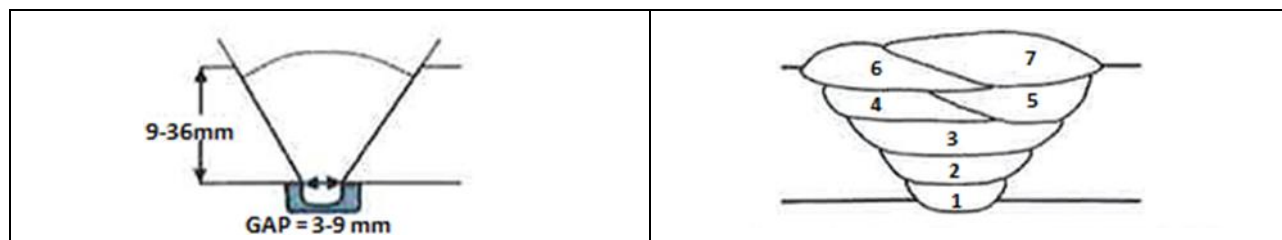


### 4.3 Συγκολλήσεις

Από το σύνολο των 37 δοκιμών διαστάσεων 50x70x18mm<sup>3</sup> , τα 13 είχαν συγκόλληση . Οι συγκολλήσεις αυτές ήταν τύπου Hybrid Laser–MAG+tandem. Ίδιου τύπου ήταν και οι συγκολλήσεις που έφεραν οι δύο πλάκες διαστάσεων 400x300x18 mm<sup>3</sup>. Οι τρεις πλάκες διαστάσεων 300x400x13mm<sup>3</sup> έφεραν απλές συγκολλήσεις τόξου ,συγκεκριμένα τύπου FCAW ( Flux–Core Arc Welding ) . Οι διαδικασίες ήταν πλήρως αυτοματοποιημένες και έγιναν στο τεχνολογικό κέντρο AIMEN (οι συγκολλήσεις FCAW) και στα ναυπηγεία της FINCANTIERI (οι υβριδικές συγκολλήσεις). Τα υλικά αυτά φέρουν πιστοποιητικό ελέγχου από τον Lloyd’s Register .

#### FCAW

Η σχεδίαση της σύνδεσης των ελασμάτων καθώς και τα πάσα των συγκολλήσεων φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 : Μορφή της σύνδεσης των ελασμάτων και αριθμός των πάσων κατά τη διαδικασία συγκόλλησης.

Στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο **FCAW** χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο με εμπορική ονομασία FLUXOFIL 14HD , **T 46 2 P C 1 H5** κατά το πρότυπο EN 758 , το οποίο έχει διάμετρο 1.2 mm και η χημική του σύσταση φαίνεται στον πίνακα 4.5 . Στον πίνακα 4.6 φαίνονται οι παράμετροι των συγκολλήσεων. Το αέριο προστασίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν CO<sub>2</sub> σύστασης 100% και η παροχή του ήταν 15 ltr / min .

Πίνακας 4.5: Χημική σύσταση (% κ.β.) του ηλεκτροδίου

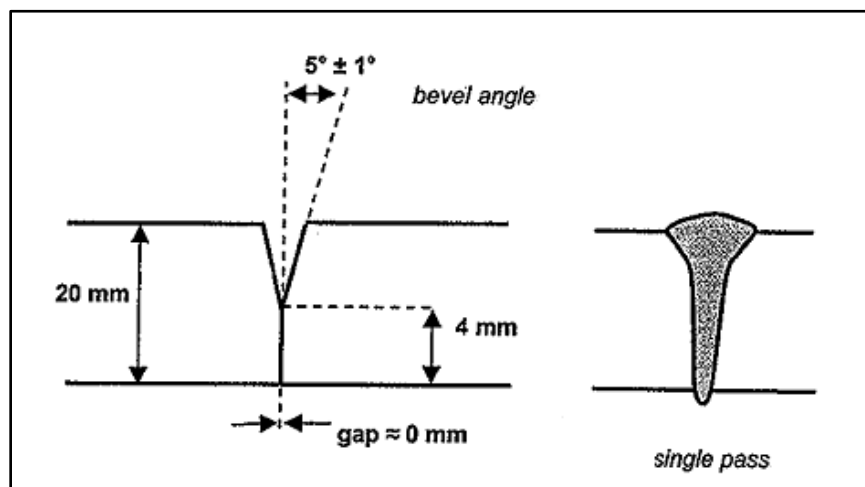
| Analysis of all-weld metal (Typical values in %) |      |      |   |   |    |    |    |    |   |   |    |
|--|------|------|---|---|----|----|----|----|---|---|----|
| C  | Mn   | Si   | P | S | Cr | Ni | Mo | Nb | V | N | Cu |
| 0.05   | 1.20 | 0.55 | - | - | -  | -  | -  | -  | - | - | -  |

Πίνακας 4.6 : Παράμετροι των συγκολλήσεων τύπου FCAW

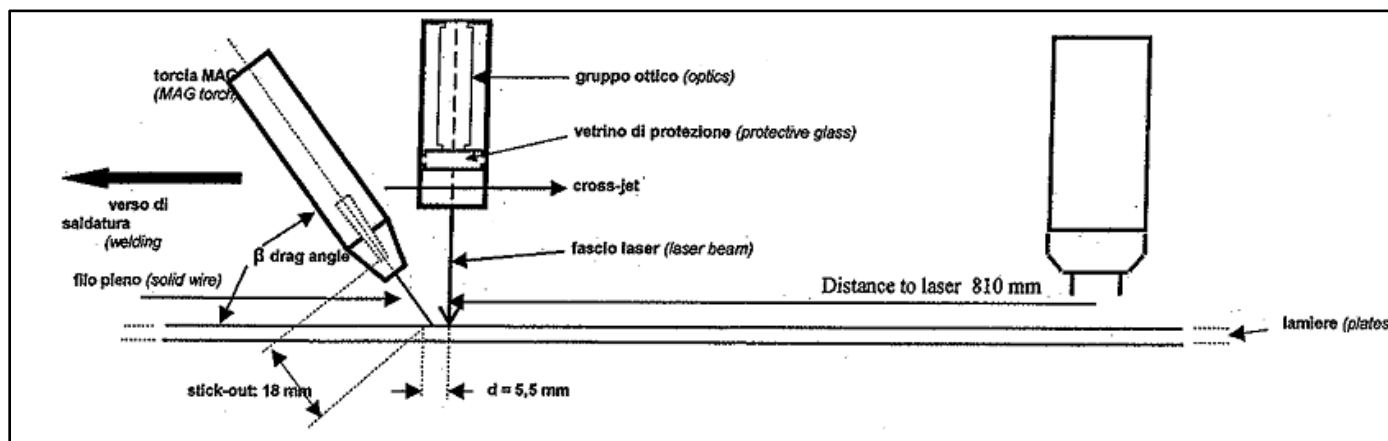
| Pass                                  | Current   |           |                 | Travel Speed<br>( cm /min) | Heat Input<br>( kJ / cm ) |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------------------|---------------------------|
|                                       | Amps      | Volts     | Type & Polarity |                            |                           |
| 1 <sup>st</sup> RUN (ROOT RUN)        | 175 - 270 | 18.5 - 29 | DC ( + )        | 19.4 - 28                  | 8 - 13.4                  |
| 2 <sup>nd</sup> / 3 <sup>rd</sup> RUN | 215 - 337 | 23.5 - 36 | DC ( + )        | 26 - 37.5                  | 9.3 - 15.5                |
| REST OF RUN                           | 215 - 330 | 25.2 - 36 | DC ( + )        | 30 - 38                    | 8.7 - 14.6                |

### Hybrid Laser-MAG+Tandem

Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί φαίνεται η σχεδίαση της σύνδεσης των ελασμάτων και στο σχήμα 4.4 ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η υβριδική διαδικασία συγκόλλησης.



Σχήμα 4.3 : Σχεδιασμός της σύνδεσης των προς συγκόλληση ελασμάτων.



Σχήμα 4.4 : Σχεδιασμός της υβριδικής συγκολλητικής διαδικασίας.

Στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο **Hybrid Laser-MAG+tandem** χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο με εμπορική ονομασία FLICORD C , **G 42 4 M G3Si1** κατά το πρότυπο EN 14341-A , διαμέτρου 1.2 mm και η χημική του σύσταση φαίνεται στον πίνακα 4.6. Στους πίνακες 4.7 , 4.8 , 4.9 φαίνονται οι παράμετροι των MAG , laser και tandem MAG αντίστοιχα.

Πίνακας 4.6 : Χημική σύσταση (% κ.β.) του ηλεκτροδίου

| Chemical composition % mass |                    |                    |                    |       |       |      |      |      |      |       |      |       |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| symbol                      | C                  | Si                 | Mn                 | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   | V    | Cu    | Al   | Ti+Zr |
| G3Si1                       | 0.06<br>to<br>0.14 | 0.70<br>to<br>1.00 | 1.30<br>to<br>1.60 | 0.025 | 0.025 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.03 | 0.035 | 0.02 | 0.15  |

Πίνακας 4.7 : Παράμετροι της MAG συγκόλλησης.

|  |   |
|--|---|
| Current : <b>DC</b>  | Mode / Polarity : <b>Pulse / EP</b>     |
| Ampere [range] : <b>260-265</b>                              | Volts[range] : <b>25</b>                |
| Pulse period [range]: <b>1.65 ms</b>                         | Pulse frequency [range]: <b>240 Hz</b>  |
| Wire feed speed [range] : <b>7.15 m/min</b>                  | Travel speed [range] : <b>80 cm/min</b> |
| Heat input [range]: <b><math>Q_{MAG} = 4.96</math> kJ/cm</b> |   |

Πίνακας 4.8 : Ισχύς laser και οπτικά χαρακτηριστικά.

|  |   |
|--|---|
| Laser power [range] : <b>9.3 kW</b>                | Optic group type : <b>BIMO-HP (HIGHYAG)</b>               |
| Wavelength [range] : $\lambda = 1025 \div 1080$ nm | Focal length : <b>250 mm</b>                              |
| Focusing type : <b>2.0</b>                         | Collimation factor : <b>0.70</b>                          |
| Focus position : <b>-2 mm</b>                      | Heat input [range] : <b><math>Q_L = 6.98</math> kJ/cm</b> |

Πίνακας 4.9 : Παράμετροι tandem MAG συγκόλλησης.

| Parameters                | Master                                   | Slave                                    |
|---------------------------|--|--|
| Current :                 | <b>DC</b>                                | <b>DC</b>                                |
| Mode / Polarity :         | <b>Pulse / EP</b>                        | <b>Pulse / EP</b>                        |
| Ampere [range] :          | <b>270-280</b>                           | <b>225-230</b>                           |
| Volts[range] :            | <b>26-26.5</b>                           | <b>28</b>                                |
| Pulse period [range]:     | <b>1.9 ms</b>                            | <b>1.9 ms</b>                            |
| Pulse frequency [range]:  | <b>220Hz</b>                             | <b>220 Hz</b>                            |
| Wire feed speed [range] : | <b>10.6 m/min</b>                        | <b>7.5 m,min</b>                         |
| Travel speed [range] :    | <b>80 cm/min</b>                         | <b>80 cm/min</b>                         |
| Heat input [range]:       | <b><math>Q_{MAG} = 5.56</math> kJ/cm</b> | <b><math>Q_{MAG} = 4.96</math> kJ/cm</b> |

Η αέρια προστασία που χρησιμοποιήθηκε ήταν μίγμα 90% Ar + 10% CO<sub>2</sub> με παροχή 20 ÷ 25 ltr / min. Τα WPQR (Welding Procedure Qualification Record) καθώς και όλα τα απαραίτητα πιστοποιητικά που συνόδευαν τα υλικά στην παραλαβή τους παρατίθενται αναλυτικά στο παράρτημα Γ.

#### 4.4 Χημική προσβολή και Οπτική μικροσκοπία [6]

Η Οπτική Μικροσκοπία αποτελεί, εδώ και δεκαετίες, μία πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της μεταλλογραφίας. Για να είναι το εκάστοτε δοκίμιο κατάλληλο προς παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο πρέπει να ακολουθήσει κάποια προετοιμασία, της οποίας τα στάδια είναι τα εξής :

- **Κοπή** των δοκιμίων στο δισκοτόμο του εργαστηρίου (εικόνα 4.3) και στη συνέχεια εμβάπτισή τους σε εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών ( ρητίνη και σκληρυντής ) , όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2



Εικόνα 4.2 : Δοκίμια εμβάπτισμένα σε εποξειδική ρητίνη.

- **Λείανση** της προς παρατήρηση επιφάνειας . Πραγματοποιείται είτε με μηχανικές είτε με ηλεκτροχημικές μεθόδους και αποσκοπεί στην εξάλειψη των γεωμετρικών ανωμαλιών της επιφάνειας. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε μηχανική λείανση (εικόνα 4.4). Για τον τρόπο αυτό λείανσης , χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά με σκληρούς κόκκους από SiC ή  $Al_2O_3$  , των οποίων η αποξεστική δράση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο του μέσου μεγέθους των λειαντικών κόκκων . Χρησιμοποιώντας χαρτιά με όλο και μικρότερους κόκκους , η λείανση γίνεται πιο λεπτομερής. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν τα εξής χαρτιά : grit 80 , 120 , 220 , 500 , 800 , 1200 , 2000 , 4000. Το τελικό στάδιο της διαδικασίας αυτής ονομάζεται στίλβωση και περιλαμβάνει λείανση σε ειδικά βελούδα με τη βοήθεια κολλοειδούς αιωρήματος ή αλλοιφής  $Al_2O_3$  ( κόκκους αλούμινας έως και 0.1  $\mu m$  ) , spray με λεπτούς κόκκους διαμαντιού κλπ. Στην επεξεργασία των δοκιμίων που εξετάστηκαν , χρησιμοποιήθηκε αλλοιφή  $Al_2O_3$  με κόκκους αλούμινας 1 και 0.1  $\mu m$  .
- **Χημική προσβολή** . Η χημική προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας γίνεται με σκοπό να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες της μικροδομής του υλικού, μιας και η απρόσβλητη επιφάνεια μπορεί να δώσει λίγες σχετικά πληροφορίες. Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική αποκάλυψης των χαρακτηριστικών της δομής και βασίζεται στην “εκλεκτική” διάβρωση των ορίων των κόκκων . Επίσης , τα άτομα που ανήκουν σε διαφορετικά κρυσταλλικά πλέγματα ( δηλ. σε διαφορετικές φάσεις ) , διαλύονται , με διαφορετικούς ρυθμούς , με αποτέλεσμα τη δημιουργία αντίθεσης στην επιφάνεια και την εμφάνιση και απεικόνιση των μικροδομικών

χαρακτηριστικών κατά την παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο. Η προσβολή γίνεται με εμβάπτιση της λείας μεταλλικής επιφάνειας στο κατάλληλο χημικό αντιδραστήριο .



Εικόνα 4.3 : Δισκοτόμος μηχανουργείου ENT.



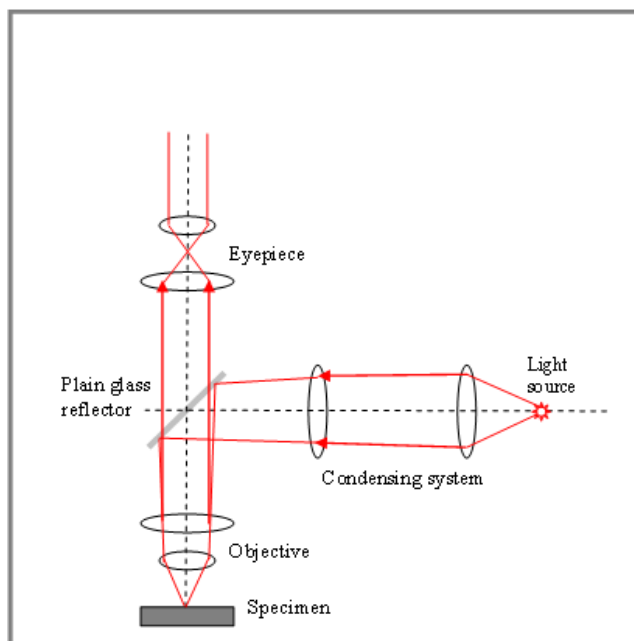
Εικόνα 4.4 : Μηχανή λείανσης / στίλβωσης Struers LaboPol-5 του ENT.

Στην περίπτωση του ναυπηγικού χάλυβα ΑΗ36 επιλέχθηκε το αντιδραστήριο Nital (διάλυμα καθαρής αιθανόλης με 2% κ.ό.  $\text{HNO}_3$ ) που δίνει πολύ καλά αποτελέσματα με εμβάπτιση των δοκιμίων σε δοχείο με το αντιδραστήριο περίπου για 15 sec.

Κατόπιν της επεξεργασίας που αναφέρθηκε παραπάνω , τα δοκίμια ήταν έτοιμα προς παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας , το οποίο είναι τύπου Leica DMILM

Τα κύρια μέρη του μικροσκοπίου είναι (σχήμα 4.5):

- Η πηγή φωτός
- Οι φακοί που κατευθύνουν τη φωτεινή δέσμη
- Το διάφραγμα
- Οι μεγεθυντικοί φακοί
- Το ημιανακλαστικό κάτοπτρο
- Ο αντικειμενικός φακός
- Η τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς παρατήρηση δοκίμιο και επιτρέπει τη μετακίνησή του μέσω κατάλληλης διάταξης
- Ο προσοφθάλμιος φακός



Σχήμα 4.5.: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του οπτικού (μεταλλογραφικού) μικροσκοπίου.[51]

Εκτός από τα παραπάνω, το οπτικό μικροσκόπιο είναι εφοδιασμένο με κατάλληλη διάταξη που να επιτρέπει τη στερέωση κάμερας. Επίσης, διαθέτει δύο τύπους μεγεθυντικών φακών: τους αντικειμενικούς και τους προσοφθάλμιους. Οι πρώτοι είναι οι πιο σημαντικοί, γιατί συγκεντρώνουν το ανακλώμενο από το μεταλλικό δοκίμιο φως και συνθέτουν την εικόνα. Είναι συνήθως βιδωτοί και τοποθετούνται σε μία περιστρεφόμενη βάση, η οποία δέχεται τέσσερις φακούς με διαφορετική μεγέθυνση ο καθένας. Οι προσοφθάλμιοι φακοί έχουν σταθερή μεγέθυνση. Βρίσκονται στο σημείο από το οποίο παρατηρεί ο χρήστης του μικροσκοπίου και μεγεθύνουν την παραγόμενη από τον αντικειμενικό φακό εικόνα, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα. Η συνολική μεγέθυνση της παρατηρούμενης εικόνας είναι το γινόμενο της μεγέθυνσης των δύο αυτών φακών.

## 4.5 Μικροσκληρότητα [4][5][6]

Ως σκληρότητα ορίζεται “η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε μόνιμη παραμόρφωση ή αλλοίωση, όταν έρθει σε επαφή με ένα διεισδυτή υπό κάποιο φορτίο”. Στη φυσική μεταλλουργία, ως σκληρότητα ενός υλικού ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό, στην κάθετη διείσδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας από αυτήν του εξεταζόμενου υλικού.

Γενικά, η δοκιμή σκληρότητας πραγματοποιείται με πίεση ενός διεισδυτή γνωστής γεωμετρίας και μηχανικών ιδιοτήτων στο υπό μελέτη δοκίμιο. Ο διεισδυτής μπορεί να είναι σφαιρικός (Brinell και Rockwell B), κωνικός (Rockwell C) ή να έχει μορφή πυραμίδας (Vickers και Knoop). Όταν οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται με εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων της τάξης των μερικών δεκάδων γραμμαρίων, τότε αυτές καλούνται μικροσκληρομετρήσεις. Κατά τη μικροσκληρομέτρηση Vickers χρησιμοποιείται ως διεισδυτής πυραμίδα διαμαντιού τετραγωνικής βάσης με γωνία κορυφής  $\alpha=136^\circ$

και γνωστή δύναμη που κυμαίνεται από 5-1000gr (σχήμα 4.6). Η δύναμη εφαρμόζεται σταδιακά και η επαφή διαρκεί 10-20 δευτερόλεπτα. Η δύναμη πρέπει να είναι γνωστή επακριβώς (αναφορά στο πρότυπο ASTM E 384 σε ό,τι αφορά τις ανοχές). Μετά την αφαίρεση της δύναμης μετρούνται οι δυο διαγώνιοι και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος για τον υπολογισμό της σκληρότητας κατά Vickers σύμφωνα με τη σχέση:

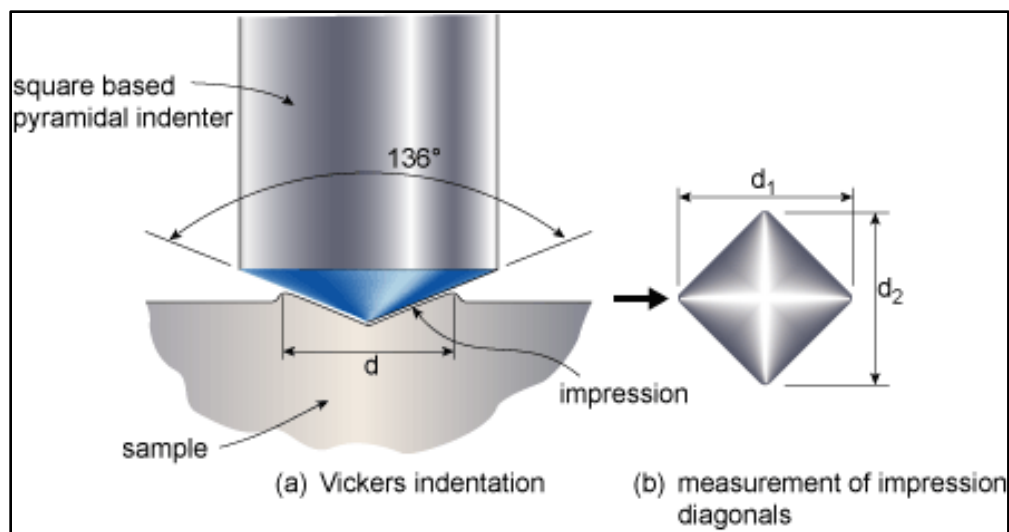
$$HV = \frac{2000 \cdot P \cdot \sin(a/2)}{d^2} = \frac{1854.4 \cdot P}{d^2}$$

όπου:

d: μέσος όρος διαγωνίων σε μm

α: γωνία κορυφής =136°

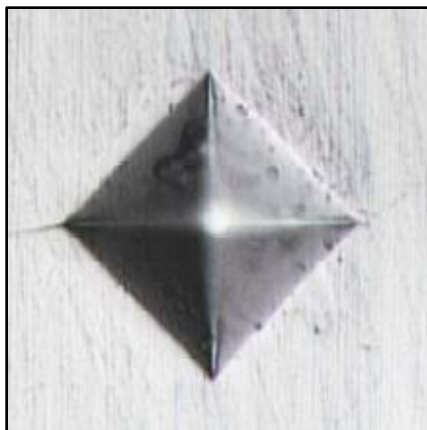
P: δύναμη σε gr.



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση μικροσκληρομέτρησης Vickers.[50]

Η διαδικασία που ακολουθείται έχει ως εξής: τοποθετείται το δείγμα στην τράπεζα του οργάνου και μέσω του μικροσκοπίου που διαθέτει γίνεται εστίαση μέχρι να διακριθεί καθαρά η μικροδομή του δείγματος. Μετά προγραμματίζεται με όλες τις παραμέτρους που χρειάζεται και επιλέγεται ο χρόνος που θα διαρκέσει η διείσδυση, καθώς και το φορτίο που θα ασκήσει η πυραμίδα στην επιφάνεια του δοκιμίου. Γίνεται εστίαση στην περιοχή που είναι επιθυμητή η μέτρηση της σκληρότητας και αντικαθίσταται ο φακός του μικροσκοπίου με τον διεισδυτή. Πατώντας το κουμπί start η πυραμίδα διεισδύει στην επιφάνεια του υλικού δημιουργώντας ένα αποτύπωμα (εικόνα 4.5).





Εικόνα 4.5: Αποτύπωμα μικροσκληρομέτρησης κατά Vickers.[52]

Γυρίζοντας πάλι στο μικροσκόπιο υπολογίζονται (με τη βοήθεια γραμμών) οι διαγώνιοι της πυραμίδας που έχει σχηματιστεί. Τέλος, το μηχάνημα από τις τιμές των διαγωνίων υπολογίζει τις τιμές σκληρότητας σε HVN (Hardness Vickers Number). Κρίνεται αναγκαίο στις πρώτες μετρήσεις να δοκιμάζονται διάφορες τιμές τόσο για το φορτίο όσο και για το χρόνο ώστε να κρίνεται πιο αποτύπωμα εξυπηρετεί καλύτερα.

Στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας χρησιμοποιήθηκε το μικροσκληρόμετρο Shimadzu HMV-2E, (εικόνα 4.6) με 2.942 N (ή 300 gf) δύναμη στο διεισδυτικό μηχάνημα για 20 sec.



Εικόνα 4.6: Μικροσκληρόμετρο ENT

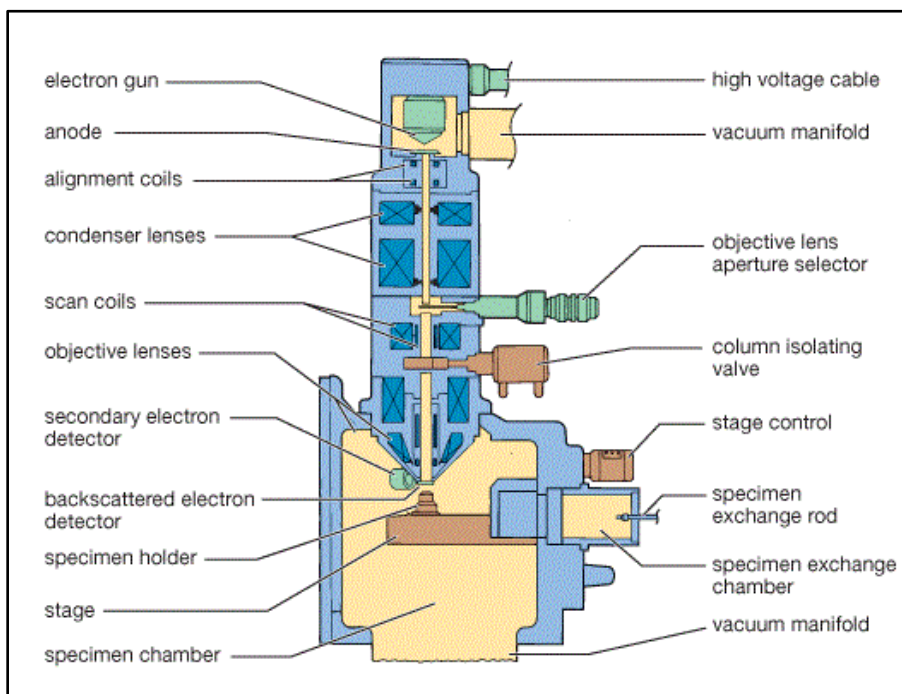
## 4.6 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (Scanning Electron Microscopy-SEM) [6]

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) είναι ένα επιστημονικό όργανο με μοναδικές δυνατότητες για τη μελέτη επιφανειών. Το SEM χρησιμοποιεί μία εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για την παραγωγή διαφόρων σημάτων από την επιφάνεια ενός στερεού δοκιμίου. Τα σήματα αυτά που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων–επιφάνειας δοκιμίου αποκαλύπτουν πληροφορίες για ένα δοκίμιο όπως η μορφολογία του, η χημική του σύσταση, η κρυσταλλική δομή και ο προσανατολισμός των συστατικών του δοκιμίου. Τα δεδομένα συλλέγονται από μια συγκεκριμένη επιφάνεια του δοκιμίου και προκύπτει μια διδιάστατη εικόνα η οποία περιέχει τις παραπάνω πληροφορίες. Η διακριτική ικανότητα του SEM θεωρητικά μπορεί να φτάσει έως  $\times 800.000$ , ωστόσο διάφορες παράμετροι του οργάνου, περιορισμοί στη μεγέθυνση και τη διακριτική ικανότητα περιορίζουν τη μεγέθυνση ενός συμβατικού SEM σε  $\times 200.000$ . Το SEM παρέχει επίσης τη δυνατότητα ποιοτικής και ημιποσοτικής ανάλυσης συγκεκριμένων σημείων και περιορισμένων επιφανειών της επιφάνειας του δοκιμίου με τη χρήση συστήματος EDS (Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy).

Ένα σχηματικό διάγραμμα του SEM φαίνεται στο σχήμα 4.7 . Η στήλη παραγωγής και εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων λειτουργεί σε κενό ( $<10^{-3}$  Pa). Η πηγή ηλεκτρονίων που λειτουργεί σε μια περιοχή τάσεων από 0 έως 30 kV , δημιουργεί δέσμη ηλεκτρονίων (πρωτογενή ηλεκτρόνια) , η οποία διερχόμενη μέσω μιας σειράς μαγνητικών φακών , επιταχύνεται , συγκεντρώνεται και εστιάζεται πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου. Το υπό εξέταση δοκίμιο σαρώνεται από την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων και τα εκπεμπόμενα από την επιφάνεια του δοκιμίου ηλεκτρόνια συλλέγονται και ενισχύονται έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα οπτικό σήμα. Το είδος της εκπεμπόμενης από την επιφάνεια του δοκιμίου ακτινοβολίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων και των ατόμων του υλικού. Στα παραγόμενα σήματα περιλαμβάνονται δευτερογενή ηλεκτρόνια (secondary), τα οποία παράγουν την εικόνα του SEM, οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (backscattered), περιθλώμενα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (diffracted backscattered), που υποδεικνύουν την κρυσταλλική δομή και τον προσανατολισμό, ακτίνες X που χρησιμοποιούνται για στοιχειακή ανάλυση, ορατό φως και θερμότητα. Τα δευτερογενή και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια παρέχουν την εικόνα του δοκιμίου : τα δευτερογενή ηλεκτρόνια δείχνουν τη μορφολογία και την τοπογραφία του δοκιμίου και τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια δείχνουν την αντίθεση στη σύσταση. Οι ακτίνες X παράγονται από το επιφανειακό στρώμα του δοκιμίου μέχρι βάρους έως  $1\mu\text{m}$  και εξαρτώνται από το είδος των ετόμων της επιφάνειας. Η ανάλυση των εκπεμπόμενων ακτίνων X οδηγεί σε χημική ανάλυση της επιφάνειας (μικροανάλυση ακτίνων X) , η οποία γίνεται συνήθως παράλληλα με την παρατήρηση στο SEM.

Λόγω του μεγάλου βάθους μεδίου , η προετοιμασία των δοκιμίων προς παρατήρηση στο SEM είναι η ελάχιστη δυνατή. Δοκίμια , έπειτα από θραύση , κοπή ή λείανση και χημική προσβολή είναι δυνατόν να παρατηρηθούν στο SEM. Η λείανση ακολουθείται συχνά από έντονη χημική προσβολή για την αύξηση του ανάγλυφου της επιφάνειας και κατά συνέπεια και της έντασης του σήματος που προέρχεται από τα

δευτερογενή ηλεκτρόνια. Μη αγώγιμα υλικά (π.χ. πολυμερή) επικαλύπτονται με λεπτά επιστρώματα Au , Cu ή γραφίτη για την επίτευξη αγωγιμότητας στην επιφάνεια.



Σχήμα 4.7 : Σχηματικό διάγραμμα του SEM.[JEOL U.S.A. , Inc.]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία , χρησιμοποιήθηκε το SEM του Εργαστηρίου Ναπηγικής Τεχνολογίας . Το μικροσκόπιο είναι της εταιρείας JEOL , τύπου 6390 , υψηλού κενού , ανάλυσης έως 3 nm (30 kV) , δυναμικού επιτάχυνσης 0.5 έως 30 kV(accelerating voltage) , με νήμα βολφραμίου (W). Τα δοκίμια που παρατηρήθηκαν στο μικροσκόπιο ήταν εγκιβωτισμένα σε εποξειδική ρητίνη , για αυτό και χρησιμοποιήθηκε επίστρωση από αλουμινόχαρτο για την επίτευξη αγωγιμότητας. Σκοπός των μικροσκοπικών παρατηρήσεων ήταν η μελέτη της μικροδομήστης επιφάνειας των δοκιμίων.



Εικόνα 4.7 : Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) του ENT.

## 4.7 Κλιματικός θάλαμος – Θάλαμος αλατονέφωσης [1][2][3][10][36]

### 4.7.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η χρήση της μεθόδου της αλατονέφωσης εφαρμόζεται για περισσότερα από 100 χρόνια για τον έλεγχο της επιδεκτικότητας στη διάβρωση μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών, καθώς και για τον έλεγχο του βαθμού προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δοκιμές εφαρμόζονται για τη σύγκριση της συμπεριφοράς μετάλλων και επικαλύψεων κατά την εφαρμογή συγκεκριμένου προτύπου. Στην επιστημονική κοινότητα γίνονται εκτεταμένες συζητήσεις σχετικά με την αξία των δοκιμών αυτών. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητο η προετοιμασία των δοκιμών, του πειράματος, αλλά και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων να εφαρμόζονται με ακρίβεια. Τότε είναι δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια την εφαρμογή προτυποποιημένου «ποσού διάβρωσης» για τη σύγκριση της σχετικής συμπεριφοράς των υλικών ή και των επιστρωμάτων.

Για τη διεξαγωγή δοκιμών διάβρωσης σε επικαλύψεις προστασίας του χάλυβα, προτάθηκε για πρώτη φορά δοκιμή με ουδέτερο διάλυμα αλατονέφωσης στο πλαίσιο του προτύπου ASTM B117. Πολλές βελτιώσεις και αναθεωρήσεις έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια τόσο ως προς τις δοκιμές αλατονέφωσης όσο και στους θαλάμους που χρησιμοποιούνται και τις διατάξεις.

Οι πιο κοινά αποδεκτές μέθοδοι εφαρμογής δοκιμών αλατονέφωσης περιγράφονται με ακρίβεια στα πρότυπα:

- ASTM B117 “Standard method of salt spray (FOG) testing”
- BS368 “Standard test method for copper-accelerated acetic- salt spray (FOG) testing”
- ASTM G 85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”

Σημειώνεται ότι υπάρχουν δοκιμές διάβρωσης στις οποίες εφαρμόζονται συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπου απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται ως συστατικό της διάβρωσης και στις οποίες δεν περιλαμβάνεται άλας ως στοιχείο διάβρωσης (ASTM D1735, ASTM D2247, ASTM G 60).

Οι δοκιμές αλατονέφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες
- Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Στις στατικές δοκιμές οι συνθήκες και η ατμόσφαιρα παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής: θερμοκρασία, πυκνότητα νέφους, pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι δοκιμές μπορεί να διαρκούν 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα για όλο το διάστημα έκθεσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από το θάλαμο για μελέτη και ανάλυση. Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό δοκιμών που προσομοιάζουν περισσότερα ρεαλιστικά την πραγματική έκθεση στο περιβάλλον και τις συνθήκες λειτουργίας. Με γνώμονα αυτό σχεδιάζονται νέες κυκλικές δοκιμές. Κατά

τις κυκλικές δοκιμές, τα δοκίμια υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη σειρά βημάτων συγκεκριμένου χρόνου, διαφορετικής ατμόσφαιρας, έως ότου ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος έκθεσης ή αριθμός κύκλων. Ένα πλήρες σύνολο βημάτων συνιστά έναν κύκλο.

Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Διαφορετικές θερμοκρασίες
- Μεταβαλλόμενα επίπεδα σχετικής υγρασίας RH (20-100%)
- Διάφορα διαβρωτικά συστατικά (ρυπαντές, ηλεκτρολύτες)

#### 4.7.1.1 Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες

Το πρότυπο ASTM B117 περιγράφει στατικές συνθήκες δοκιμής αλατονέφωσης. Η διαδικασία του προτύπου αυτού καθορίζει διαρκή έκθεση σε αλατονέφωση 5% σε θερμοκρασία 35°C. Στα τελευταία 70 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις στο πρότυπο ASTM B 117. Ωστόσο παρά τις βελτιώσεις αποτελεί κοινό τόπο ότι τα αποτελέσματα δοκιμών αλατονέφωσης σε στατικές συνθήκες δεν ανταποκρίνονται στα φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται στο περιβάλλον λειτουργίας.

#### 4.7.1.2 Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Οι δοκιμές κυκλικής διάβρωσης θεωρούνται απο πολλούς περισσότερο ρεαλιστικές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές προκαλείται διάβρωση των υλικών κατά τρόπο που ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα από τους συμβατικούς τρόπους έκθεσης. Δεδομένου ότι στο περιβάλλον λειτουργίας ενός υλικού περιλαμβάνονται συνήθως υγρές και ξηρές συνθήκες, στόχος είναι οι εργαστηριακές δοκιμές να προσομοιάζουν τις φυσικές κυκλικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της σύγχρονης έρευνας αποδεικνύουν ότι στις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης ο σχετικός ρυθμός διάβρωσης, η δομή και η μορφολογία που προκύπτει προσομοιάζουν το περιβάλλον λειτουργίας. Κατά τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης, τα δοκίμια εκτίθενται σε διαφορετικό περιβάλλον σε επαναλαμβανόμενο κύκλο. Οι απλοί κύκλοι αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες συνθήκες αλατονέφωσης και ξήρανσης. Οι πιο σύγχρονες αυτόματες μέθοδοι περιλαμβάνουν κύκλους πολλών βημάτων , όπως , υγρασία ή συμπύκνωση μαζί με αλατονέφωση και ξήρανση.

Για τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα που καθορίζουν με ακρίβεια τις συνθήκες του πειράματος :

- ASTM G85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”
- ISO 14993 (2001) “ Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, “dry” and “wet” conditions”

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τη μελέτη της διάβρωσης του χάλυβα υψηλής αντοχής AH36, υιοθετήθηκε το πρότυπο ISO 14993 (2001).

Οι συνθήκες αλατονέφωσης – ξήρανσης – υγρασίας στις οποίες εκτίθενται τα δοκίμια περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια :

**Αλατονέφωση (Fog)** , (σχήμα 4.8): Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αλατονέφωσης, ο θάλαμος λειτουργεί ως συμβατική διάταξη αλατονέφωσης:

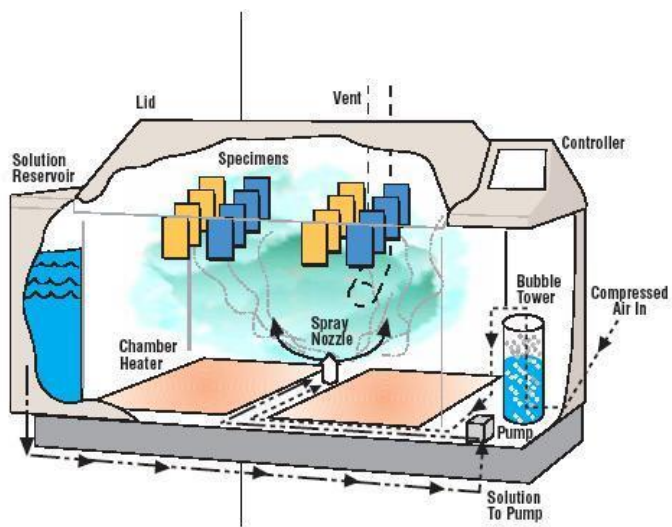
- Ο συμπιεσμένος αέρας υγροποιείται περνώντας από τη στήλη φυσαλίδων (bubble tower) κατά τη διαδρομή του προς το ακροφύσιο ψεκασμού.
- Διαβρωτικό διάλυμα αντλείται από την εσωτερική δεξαμενή (reservoir) στο ακροφύσιο ψεκασμού, όπου αναμιγνύεται με το συμπιεσμένο αέρα.
- Το ακροφύσιο ψεκασμού ατμοποιεί το διάλυμα και τον αέρα, δημιουργώντας νέφος διάβρωσης.
- Οι θερμοστάτες του θαλάμου (chamber heaters) διατηρούν την προγραμματισμένη θερμοκρασία του θαλάμου.

**Ξήρανση (Dry)** , (σχήμα 4.9): Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, ο συμπιεστής αέρα οδηγεί τον αέρα του δωματίου σε ένα θερμοστάτη αέρος στο θάλαμο. Αυτό δημιουργεί συνθήκες χαμηλής υγρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου. Η θερμοκρασία του θαλάμου ελέγχεται από τους θερμοστάτες του θαλάμου και το θερμοστάτη αέρος.

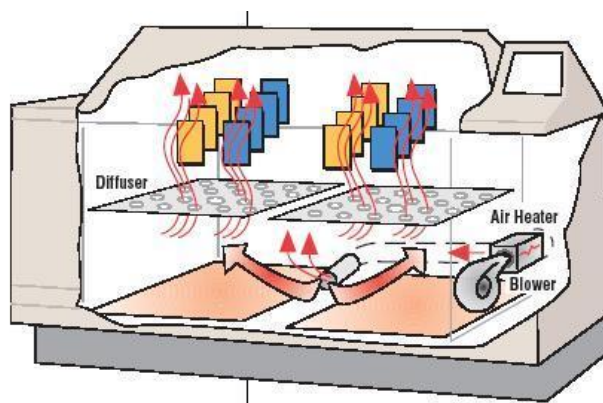
**Υγρασία (Humid)** , (σχήμα 4.10): Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας αυτής, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας παρέχοντας ατμούς νερού στο θάλαμο.



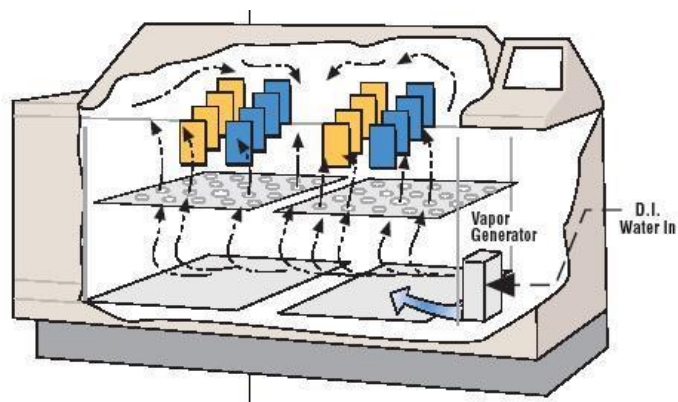
Ακολουθεί σχηματική αναπαράσταση ενός πλήρους κύκλου στο θάλαμο αλατονέφωσης.



Σχήμα 4.8: Συνθήκες Αλατονέφωσης στον κλιματικό θάλαμο.



Σχήμα 4.9: Συνθήκες Ξήρασης στον κλιματικό θάλαμο.



Σχήμα 4.10: Συνθήκες Υγρασίας στον κλιματικό θάλαμο.



### 4.7.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Θαλάμου

Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική είναι ο Q FOG CCT1100 (εικόνα 4.8), της εταιρείας Q Panel και διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Ονομαστικό μέγεθος 1100 l
- Χωρητικότητα με υγρό 1103 l
- Χωρητικότητα χωρίς υγρό 857 l



Εικόνα 4.8: Θάλαμος αλατονέφωσης (Q FOG CCT 1100)

Ο θάλαμος αλατονέφωσης είναι αρκετά μεγάλης χωρητικότητας ώστε να διασφαλίζονται ομοιογενείς συνθήκες κατανομής συνθηκών θερμοκρασίας, υγρασίας και κατανομής ψεκασμού. Τα ανώτερα μέρη του θαλάμου σχεδιάζονται έτσι ώστε οι σταγόνες που σχηματίζονται από την αλατονέφωση στις επιφάνειές του να μην πέφτουν στα δείγματα.

Τα κυριότερα μέρη του θαλάμου είναι τα εξής :

**Έλεγχος:** Οι συνθήκες δοκιμών ελέγχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας.

**Δοχείο διαλύματος άλατος:** Τα 120 l εξασφαλίζουν αρκετό διάλυμα για να μπορεί να πραγματοποιηθεί αλατονέφωση για 5 συνεχόμενες ημέρες.

**Στήλη φυσαλίδων (Bubble tower):** Ο σκοπός αυτής της διάταξης είναι ο κορεσμός του αέρα με υγρασία πριν να φτάσει το ακροφύσιο εκνέφωσης. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνεται κορεσμός του αέρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές του θαλάμου. Η θερμοκρασία και ο κορεσμός ελέγχονται αυτόματα.

**Γεννήτρια ατμού (Vapor generator):** Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της υγρασίας, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας από ατμούς που παράγονται κατά τη θέρμανση νερού στο Vapor generator.

**Συμπιεστής αέρα (Purge Blower) και Εναλλάκτης θερμότητας (Air Heater):** Ο συμπιεστής αέρα ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για να φέρνει αέρα δωματίου στο θάλαμο. Όταν απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του εργαστηρίου, ο εναλλάκτης

Θερμότητας ενεργοποιείται και η ροή αέρος από τον συμπιεστή περνάει απο τον ενεργοποιημένο εναλλάκτη θερμότητας στη διαδρομή του προς το θάλαμο.

**Θερμαντικές πλάκες:** Οι δύο πλάκες είναι τοποθετημένες στον πυθμένα του θαλάμου. Χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αλατονέφωσης. Επίσης ενεργοποιούνται, όποτε χρειάζεται, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για τη διατήρηση της προγραμματισμένης θερμοκρασίας θαλάμου.

### 4.7.3 Πρότυπη δοκιμή κατά ISO 14993:2001

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πειραματική διαδικασία εκτελέστηκε με βάση την πρότυπη διαδικασία ISO 14993 (2001). Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο ISO 14993 αναφέρεται σε «Διάβρωση μετάλλων και κραμάτων – Επιταχυνόμενη δοκιμή που περιλαμβάνει κυκλική έκθεση σε συνθήκες αλατονέφωσης, ξήρανσης και υγρασίας». Στο πρότυπο αυτό περιγράφεται η διάταξη και η πειραματική διαδικασία δοκιμών επιταχυνόμενης διάβρωσης για τη συγκριτική εκτίμηση υλικών με ή χωρίς προστατευτικές επικαλύψεις σε εξωτερικό περιβάλλον με υψηλά ποσοστά αλάτων. Το πρότυπο αυτό εφαρμόζεται για μέταλλα και κράματα, μεταλλικά επιστρώματα (ανοδικά και καθοδικά), οργανικά επιστρώματα σε μεταλλικά υλικά κ.λ.π.

Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι ο κλιματικός θάλαμος που περιγράφηκε πιο πάνω. Επίσης, πριν από την τοποθέτηση στο θάλαμο τα δοκίμια :

- Αμμοβολούνται στο μηχάνημα αμμοβολής του ENT , προκειμένου να απομακρυνθεί η προστατευτική επικάλυψη (shop primer) του χάλυβα από την πλευρά του δοκιμίου που θα εκτεθεί στις συνθήκες διάβρωσης
- Καθαρίζονται με απιονισμένο νερό, στη συνέχεια με αιθανόλη και ακολουθεί στέγνωμα με παροχή θερμού αέρα.
- Ζυγίζονται σε ζυγό ακριβείας (3 δεκαδικά)

Το διάλυμα που χρησιμοποιείται είναι διάλυμα NaCl 5% , σύμφωνα με το ISO 14993 . Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, κάθε κύκλος περιλαμβάνει τρία βήματα : αλατονέφωση, ξήρανση, υγρασία. Ο συνολικός χρόνος κάθε κύκλου είναι 8 ώρες και αποτελείται από τρία βήματα : 2 ώρες αλατονέφωση, 4 ώρες συνθήκες ξήρανσης, 2 ώρες συνθήκες υγρασίας.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του χάλυβα στην παρούσα διπλωματική εργασία, τοποθετήθηκαν 109 δοκίμια σε κλιματικό θάλαμο.

Αναλυτικότερα, οι συνθήκες περιγράφονται στον πίνακα 4.10 που ακολουθεί :

Πίνακας 4.10: Συνθήκες έκθεσης δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο.

|          |  |  |
|----------|--|--|
| <b>1</b> | <b>Συνθηκες αλατονέφωσης (Fog)</b><br>(1) Θερμοκρασία<br>(2) Διάλυμα άλατος                                    | <b>2 ώρες</b><br>35 °C±2 °C<br>50 g/l ± 5 g/l Διάλυμα NaCl |
| <b>2</b> | <b>Συνθήκες Ξήρανσης (Dry)</b><br>(παροχή αέρα σε συνθήκες ξήρανσης)<br>(1) Θερμοκρασία<br>(2) Σχετική υγρασία | <b>4 ώρες</b><br>60 °C±2 °C<br><30%RH                      |
| <b>3</b> | <b>Συνθήκες Υγρασίας (Humid)</b><br>(1) Θερμοκρασία<br>(2) Σχετική υγρασία                                     | <b>2 ώρες</b><br>50 °C±2 °C<br>>90%RH                      |

Σημειώνεται ότι στους χρόνους αυτούς περιλαμβάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για να αποκτήσει το σύστημα την καθορισμένη θερμοκρασία σε κάθε μεταβολή. Τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικές υποδοχές από αδρανές, μη μεταλλικό υλικό, υπό γωνία 15° – 25° . Για την πρώτη ομάδα δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν , για τη στήριξή τους , διαμορφωμένοι πλαστικοί σωλήνες από πολυπροπυλένιο random (PPR) , ενώ για τις άλλες δύο ομάδες δοκιμών διαμορφωμένα racks από fiberglass.

Επιπλέον, σύμφωνα με το πρότυπο, στα δοκίμια αυτά επικαλύφθηκε η πίσω πλευρά τους και οι ακμές με ειδική μονωτική ταινία, ώστε στις συνθήκες διάβρωσης να εκτίθεται μόνο η μία πλευρά, όπως έχει ήδη προαναφερθεί.

#### 4.7.4 Προετοιμασία και σήμανση δοκιμών

Για τη μελέτη της διάβρωσης των συγκολλήσεων χάλυβα ΑΗ36 σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης χρησιμοποιήθηκαν δύο πλάκες χάλυβα ΑΗ36 διαστάσεων 400x300x18mm<sup>3</sup> , τρεις πλάκες χάλυβα ΑΗ36 διαστάσεων 300x400x13mm<sup>3</sup> , καθώς και 37 δοκίμια διαστάσεων 50x70x 18mm<sup>3</sup> . Η κάθε μία από τις πλάκες διαμορφώθηκε σε δοκίμια διαστάσεων 100x70mm (εικόνα 4.9). Ο χαρακτηρισμός των δοκιμών έγινε ως εξής : ijk

i : ο αριθμός της πλάκας : I , II , ... , X

j : η σειρά στην οποία ανήκει το δοκίμιο (A, B, C , όπου το Β αντιστοιχεί πάντα σε δοκίμιο με συγκόλληση και τα Α, C στα εκάστοτε δοκίμια μετάλλου βάσης εκατέρωθεν αυτού)

k : η στήλη στην οποία ανήκει το δοκίμιο (1 - 4 για τις πλάκες πάχους 13 mm , 1 – 6 για τις πλάκες πάχους 18 mm )

Κατά τον τρόπο αυτό προέκυψαν συνολικά 18 δοκίμια από κάθε μια από τις δύο πλάκες πάχους 18mm και 12 δοκίμια από κάθε μια από τις τρεις πλάκες πάχους 13 mm.

- Για τα δοκίμια διαστάσεων 50x70 mm , i : I – V & k : 1 – 3
- Για τις δύο πλάκες πάχους 18mm , i : VI , VII & k : 1 – 4
- Για τις τρεις πλάκες πάχους 13mm , i : VIII , IX , X & k : 1 - 6

- j : A,B,C σε όλες τις περιπτώσεις

Για την έκθεση στο θάλαμο αλατονέφωσης , τα δοκίμια αρχικά αμμοβολήθηκαν στο μηχανουργείο του ENT (εικόνα 4.10) . Στη συνέχεια καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό , αιθανόλη και στεγνώθηκαν άμεσα με θερμό αέρα . Τέλος, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14993 στο θάλαμο τα δοκίμια εκτίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον μόνο από τη μία πλευρά. Για το λόγο αυτό οι υπόλοιπες πλευρές του κάθε δοκιμίου επικαλύφθηκαν με προστατευτική ταινία (3M 471 Vinyl Tape) .



Εικόνα 4.9: Σημαδεμένη πλάκα έτοιμη προς κοπή και παραγωγή δοκιμίων.



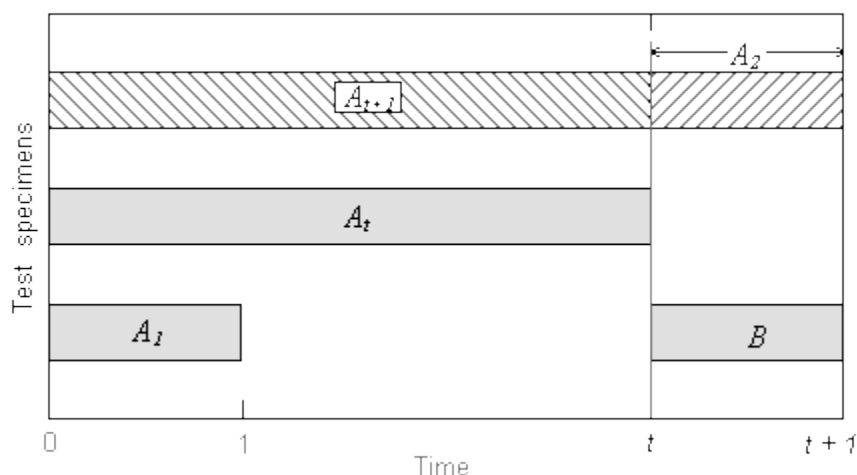
Εικόνα 4.10 : Μηχανή αμμοβολής στο μηχανουργείο του ENT.

#### 4.7.5 Διαδικασία τοποθέτησης – απομάκρυνσης δοκιμίων από το θάλαμο αλατονέφωσης (Planned Interval Test)

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G31-72 (1999) , τρόπος γνωστός και ως Planned Interval Test.

Ένα παράδειγμα σχετικά με την προτεινόμενη διαδικασία του Planned Interval Test είναι η εξής:

- **Δοκίμιο  $A_1$ :** Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο που αντιστοιχεί σε μια χρονική μονάδα (unit time).
- **Δοκίμιο  $A_t$ :** Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο t .
- **Δοκίμιο  $A_{t+1}$ :** Απομακρύνεται από το θάλαμο σε χρόνο t+1 (όπου 1= unit time) .
- **Δοκίμιο B:** Αντικαθιστά το δοκίμιο  $A_t$  όταν αυτό απομακρυνθεί από το θάλαμο σε χρόνο t και βγαίνει μαζί με το δοκίμιο  $A_{t+1}$ , δηλαδή παραμένει συνολικά στο θάλαμο χρόνο ίσο με unit time.



Σχήμα 4.11 : Σχηματική αναπαράσταση του Planned Interval Test.

Κατά αυτόν τον τρόπο με τη σύγκριση του ρυθμού διάβρωσης των A και B που παραμένουν τον ίδιο χρόνο αλλά σε διαφορετικές περιόδους μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για τις συνθήκες που επικρατούν στο θάλαμο και αν αυτές μεταβάλλονται (διαβρωτικό περιβάλλον).

Συγκρίνοντας δε το ρυθμό διάβρωσης του B με τη διαφορά του ρυθμού διάβρωσης μεταξύ των  $A_t$  και  $A_{t+1}$ , βλέπουμε πως συμπεριφέρεται το μέταλλο όσο διαβρώνεται. Φαίνεται δηλαδή αν ο ρυθμός διάβρωσης είναι σταθερός, αν αυξάνεται με την πρόοδο της διάβρωσης ή αν μειώνεται. Στην παρούσα διπλωματική, θεωρήθηκε unit time = 5 ημέρες και η τοποθέτηση των δοκιμίων στο θάλαμο κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν τουλάχιστον δύο δοκίμια που θα παραμείνουν τον ίδιο χρόνο μέσα στο θάλαμο, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

#### 4.7.6 Υπολογισμός απώλειας μάζας, ρυθμού διάβρωσης

Για την απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης και τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης επελέγη η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 8407 (1991).

Μετά την απομάκρυνση από το θάλαμο τα δοκίμια καθαρίζονται με απιονισμένο νερό και κατόπιν εμβαπτίζονται σε διάλυμα 1000 ml, για όσο χρόνο χρειαστεί, που αποτελείται από :

- 500ml HCl (37%)
- 3.5 g τετρ-αμινο-εξαμεθυλένιο ( hexamethyletetramine)
- απιονισμένο νερό έως τη συμπλήρωση 1000ml

Μετά την έκθεση στο διάλυμα τα δοκίμια καθαρίζονται με απιονισμένο νερό και αιθανόλη και ξηραίνονται με παροχή θερμού αέρα. Στη συνέχεια τα δοκίμια ζυγίζονται ξανά και από την απώλεια μάζας υπολογίζεται ο ρυθμός διάβρωσης με βάση τον τύπο :

$$\text{Corrosion\_rate} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

Όπου :

K : σταθερά (ανάλογα με τη μονάδα μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης (πίνακας 4.11)

W : η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A : η επιφάνεια έκθεσης (cm<sup>2</sup>) (με ακρίβεια 0.01cm<sup>2</sup>)

T : χρόνος έκθεσης σε ώρες (με προσέγγιση 0.01h)

D : πυκνότητα του χάλυβα (g/cm<sup>3</sup>)

Πίνακας 4.11: Τιμές σταθεράς K για διαφορετικές μονάδες μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης

| Μονάδες ρυθμού διάβρωσης  | Σταθερά (K)                   |
|---|-------------------------------|
| mils per year (mpy)   | $3,45 \times 10^6$            |
| inches per year (ipy)   | $3,45 \times 10^3$            |
| inches per month (ipm)  | $2,87 \times 10^2$            |
| millimeters per year (mm/y)   | $8,76 \times 10^4$            |
| micrometres per year ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )                             | $8,76 \times 10^7$            |
| picometres per second (pm/s)  | $2,78 \times 10^6$            |
| grams per square metre per hour ( $\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ )           | $1,00 \times 10^4 \times D^A$ |
| milligrams per square 105ecimetre per day (mdd)                             | $2,40 \times 10^6 \times D^A$ |
| micrograms per square metre per second ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ ) | $2,78 \times 10^6 \times D^A$ |

#### 4.7.7 Οργάνωση προγράμματος έκθεσης δοκιμών στον κλιματικό θάλαμο

Για την πραγματοποίηση του πειράματος το πρόγραμμα που σχεδιάστηκε βασίστηκε πάνω στη λογική του Planned Interval Test, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η διαδικασία ξεκίνησε στις 6 Μαρτίου 2014 και ολοκληρώθηκε στις 10 Απριλίου 2014, για τα πρώτα 37 δοκίμια , ενώ για τα υπόλοιπα ξεκίνησε στις 29 Αυγούστου 2014 και ολοκληρώθηκε στις 13 Οκτωβρίου 2014. όπως φαίνεται και αναλυτικά στις επόμενες σελίδες. Η χρονική διάρκεια λειτουργίας του θαλάμου με τις ημέρες έναρξης και λήξης του προγράμματος διαφέρουν εξαιτίας διακοπής της λειτουργίας του θαλάμου από τεχνική βλάβη.

Η τοποθέτηση των δοκιμών μέσα στο θάλαμο έγινε έτσι ώστε να μπορεί να ελεγχθεί η διαβρωτικότητα του θαλάμου καθώς επίσης και να υπάρχει επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα (πίνακες 4.12 , 4.13 , 4.14). Δηλαδή, δοκίμια που θα παρέμεναν στο θάλαμο για την ίδια χρονική διάρκεια, τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις πάνω στις ράγες (πίνακες 4.15 , 4.16). Μετά την απομάκρυνση κάθε δοκιμίου από το θάλαμο, ακολουθούσε ο καθαρισμός και η επεξεργασία τους. Όλα αυτά καταγράφονταν σε μία φόρμα για την καλύτερη οργάνωση και αρχειοθέτηση των εργασιών και των αποτελεσμάτων που εξάγονταν. Μία τέτοια φόρμα φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

Χρόνος έκθεσης στο θάλαμο ( ημέρες )  
t =

**ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:**

**ΗΜ/ΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ:**

**ΗΜ/ΝΙΑ ΕΞΟΔΟΥ:**

**ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ:**

- a. Φωτογράφιση του δοκιμίου
- b. Απομάκρυνση προστατευτικού tape από το δοκίμιο
- c. Απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης με το αντιδραστήριο (σύμφωνα με το ISO 8407)
- d. Καθαρισμός με απιονισμένο νερό και αιθανόλη
- e. Στέγνωμα στον αέρα
- f. Εκ νέου φωτογράφιση του δοκιμίου
- g. Ζύγιση
- h. Τοποθέτηση στον ξηραντήρα
- i. Ανάλυση φωτογραφίας
- j. Παρατήρηση στο στερεοσκόπιο

Αρχικό βάρος (g)  $m_i =$

Τελικό βάρος (g)  $m_f =$

Μεταβολή βάρους  $\Delta m = m_i - m_f =$



Πίνακας 4.12: Πρόγραμμα τοποθέτησης δοκιμών στο θάλαμο , Hybrid Laser – MAG+Tandem.

| Χρόνος t<br>παραμονής στο<br>θάλαμο (days) | <b>Δοκίμια</b>    |                 |                         |                 |
|--|-------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
|  | <b>Weld.</b>      |                 | <b>Parent metal</b>     |                 |
|  | <b>regular</b>    | <b>interval</b> | <b>regular</b>          | <b>interval</b> |
| 5  | IVB2              | IB3             | IIIA3 , VC1             | IC1 , IVC2      |
| 10   | IB1               | IIB2            | IIC3 , IA3              | IIC2 , IVA2     |
| 15   | IIB1              | VB2             | IC3 , IVA1              | IIIC2 , VA2     |
| 20   | IIIB1             | IIB3            | IC2 , IIA2              | IIIC1 , IIA1    |
| 25   | IVB3              | IIB4            | VC2 , IIC1              | IA2 , IVC3      |
| 30   | IB2 , IIIB2 , VB1 |                 | IA1 , IIA3 , IVC1 , VA1 |                 |

Πίνακας 4.13 : Πρόγραμμα τοποθέτησης δοκιμών στο θάλαμο , Hybrid Laser – MAG+Tandem.

| Χρόνος t<br>παραμονής στο<br>θάλαμο (days) | <b>Δοκίμια</b> |                 |                     |                 |
|--|----------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|  | <b>Weld.</b>   |                 | <b>Parent metal</b> |                 |
|  | <b>regular</b> | <b>interval</b> | <b>regular</b>      | <b>interval</b> |
| 5  | VIB1           | VIIB4           | VIC4 , VIIA5        | VIA2 , VIIC6    |
| 10   | VIB6           | IIB2            | VIA5 , VIIA4        | VIC3 , VIIC5    |
| 15   | VIIB1          | VB2             | VIC1 , VIIC2        | VIA6 , VIIA1    |
| 20   | VIIB5          | IIB3            | VIC5 , VIIA6        | VIA4 , VIIC3    |
| 25   | VIB3           | IIB4            | VIC6 , VIIC4        | VIA1 , VIIA2    |
| 30   | VIB4 , VIIB6   |                 | VIA3 , VIC2 , VIIC1 |                 |

Πίνακας 4.14 : Πρόγραμμα τοποθέτησης δοκιμών στο θάλαμο , FCAW.

| Χρόνος t<br>παραμονής στο<br>θάλαμο (days) | <b>Δοκίμια</b> |                 |                             |                   |
|--|----------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|
|  | <b>Weld.</b>   |                 | <b>Parent metal</b>         |                   |
|  | <b>regular</b> | <b>interval</b> | <b>regular</b>              | <b>interval</b>   |
| <b>5</b>                                   | VIII B3        | XB3             | VIII A2 , IX C4             | IX A1 , XC1       |
| <b>10</b>                                  | IX B4          | IX B2           | IX A1 , XA2                 | VIII A1 , VIII C2 |
| <b>15</b>                                  | IX B1          | VIII B4         | VIII C3 , XC4               | IX C3 , XC2       |
| <b>20</b>                                  | XB2            | VIII B2         | VIII C1 , IX C2             | VIII C4 , IX C1   |
| <b>25</b>                                  | VIII B1        | XB1             | VIII A4 , XA3               | IX A4 , XA4       |
| <b>30</b>                                  | IX B3 , XB4    |                 | VIII A3 , IX A2 , XA1 , XC3 |                   |

Πίνακας 4.15 : Θέσεις δοκιμών(διαστάσεων 50x70 mm) στις ράγες.

| Position | <b>Racks</b> |            |              |              |
|----------|--------------|------------|--------------|--------------|
|          | <b>A</b>     | <b>B</b>   | <b>C</b>     | <b>D</b>     |
| <b>1</b> | IV C1        | IA1        | IIC1 / IVC2  | IIIA3 / IVC3 |
| <b>2</b> | IIIB2        | IB2        | IIA2 / IVA2  | IA2 / IIA1   |
| <b>3</b> | IVB3 / IB3   | IVB2       | IIC3 / IIIC1 | IVA1 / IIIC2 |
| <b>4</b> | IIIB1 / IIB2 | IB1 / IIB3 | VC1 / IA3    | IC2 / IIC2   |
| <b>5</b> | VB1          | IIB1 / VB2 | VC2 / IC1    | IIA3         |
| <b>6</b> | VA1          | IIB4       | IC3 / VA2    |              |

Πίνακας 4.16 : Θέσεις δοκιμών (διαστάσεων 100x70 mm) πάνω στις ράγες.

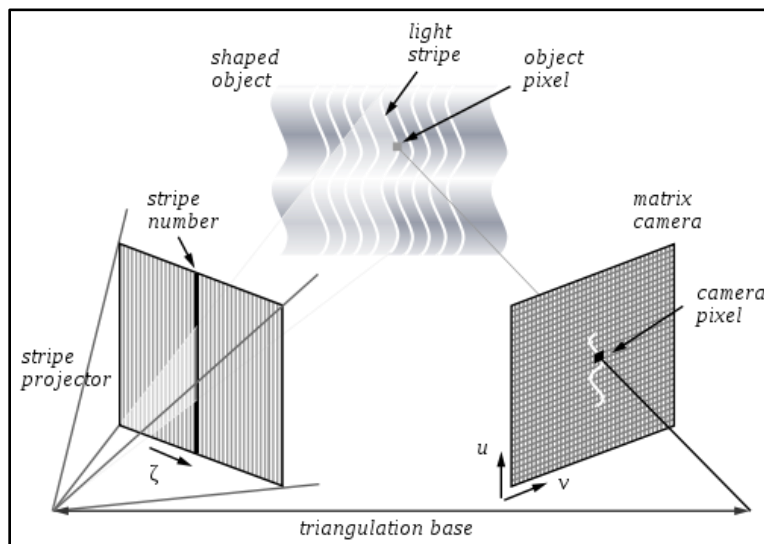
| Position | Racks          |                 |
|----------|----------------|-----------------|
|          | E              | F               |
| 1        | VIB3 / VIIC6   | XB4             |
| 2        | IXC4 / XA4     | XC3             |
| 3        | VIB4           | VIIIB1 / VIIIA1 |
| 4        | XA2 / IXC1     | IXB1 / XC2      |
| 5        | VIIIA5 / VIA1  | VIIIB5 / VIC3   |
| 6        | VIIIA3         | XA3 / IXA3      |
| 7        | VIC5 / VIIIB2  | VIC4 / VIIIA2   |
| 8        | IXA1 / VIIIB2  | IXB3            |
| 9        | VIIIA4 / VIA4  | VIIIA4 / XB3    |
| 10       | IXC2 / IXB2    | XB2 / VIIC2     |
| 11       | VIA3           | VIB1 / VIIIB3   |
| 12       | VIIIA2 / IXA4  | IXA2            |
| 13       | VIIIB2 / VIB2  | VIA5 / VIIC3    |
| 14       | XA1            | VIC2            |
| 15       | VIIIA6 / VIIC5 | VIC1 / VIB5     |
| 16       | VIIC3 / VIIIB4 | VIIIB1 / XC1    |
| 17       | VIIC1          | VIIC4 / VIA2    |
| 18       | XC4 / IXC3     | VIIC1 / VIIIA1  |
| 19       | VIIIB6         | -               |
| 20       | VIIIB3 / XB1   | IXB4 / VIIC4    |
| 21       | VIIC2 / VIA6   | VIC6 / VIIIB4   |

Στους πέντε παραπάνω πίνακες με κόκκινο φαίνονται τα interval δοκίμια (αυτά που παρεμβάλλονται κατά τη διάρκεια του πειράματος) , με μαύρο τα regular που παραμένουν στο θάλαμο για 5,10,15,20,25 ημέρες και με πράσινο τα regular που παραμένουν στο θάλαμο όλο το χρονικό διάστημα (30 ημέρες.)

## 4.8 Τρισδιάστατη σάρωση αντικειμένου με χρήση λευκού δομημένου φωτός (structured white light 3D scanning) [54][55]

Οι μέθοδοι τρισδιάστατης ανίχνευσης μπορούν να διακριθούν σε δύο ομάδες, παθητικές και ενεργητικές. Τα παθητικά συστήματα, όπως η κλασική φωτογραμμετρία, χρησιμοποιούν εντάσεις της εικόνας προκειμένου να αποκτήσουν μια πληροφορία για τις διαστάσεις του μετρούμενου αντικειμένου. Τα ενεργητικά συστήματα, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν ακτίνες laser ή δομημένο φως προκειμένου να αποκτήσουν πληροφορία για το μέγεθος και το σχήμα του αντικειμένου.

Η αρχή λειτουργίας και απόκτησης της πληροφορίας ενός σαρωτή δομημένου φωτός βασίζεται στον εντοπισμό της παραμόρφωσης ενός μοτίβου φωτός, το οποίο προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου από γνωστή οπτική γωνία. Το μοτίβο μπορεί να είναι μονοδιάστατο (γραμμή ή γραμμές) ή διδιάστατο (πλέγματα ακόμα και ελλείψεις). Μια κάμερα τοποθετείται ελαφρώς μετατοπισμένη ως προς τον προβολέα και καταγράφει το σχήμα της γραμμής υπό γωνία, ενώ η απόσταση από κάθε σημείο επί της γραμμής υπολογίζεται μέσω μιας τεχνικής παρόμοιας της τριγωνοποίησης. Ουσιαστικά ο προβολέας, η κάμερα και το υπό μελέτη αντικείμενο βρίσκονται στις κορυφές ενός τριγώνου (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 : Σχηματική αναπαράσταση αρχής λειτουργίας της μεθόδου σάρωσης με χρήση δομημένου φωτός.[55]

Όταν χρησιμοποιείται μονοδιάστατο μοτίβο την επιφάνεια του αντικειμένου σαρώνει μια γραμμή κάθε φορά. Ωστόσο, η ταυτόχρονη προβολή πολλών γραμμών είναι γρηγορότερη και πιο πολύπλευρη, επιτρέποντας της ταυτόχρονη λήψη πολλαπλών δειγμάτων. Η κάμερα καταγράφει την παραμόρφωση του μοτίβου και ένας πολύπλοκος αλγόριθμος υπολογίζει την απόσταση από κάθε σημείο επί της εκάστοτε γραμμής. Το εκτόπισμα των γραμμών επιτρέπει μια ακριβή ανάκτηση των καρτεσιανών συντεταγμένων στο χώρο κάθε λεπτομέρειας της επιφάνειας του αντικειμένου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η ταχύτητα καθώς είναι δυνατή η ταυτόχρονη σάρωση πολλαπλών σημείων ή αμέσως όλου του οπτικού πεδίου. Μερικά συστήματα επιτρέπουν ακόμα και τη

σάρωση αντικειμένων εν κινήσει , σε πραγματικό χρόνο. Όπως και με όλες τις οπτικές μεθόδους , οι ανακλαστικές ή διαφανείς επιφάνειες παρουσιάζουν δυσκολίες. Το φως ανακλάται είτε μακριά από την κάμερα είτε κατευθείαν πάνω στο οπτικό της σύστημα , καθώς καμπύλες επιφάνειες έχουν πάντα περιοχές περάλληλες με το επίπεδο εικόνας της κάμερας. Οι προκύπτουσες ανακλαστικές κοιλότητες , λοιπόν , είναι δύσκολες στο χειρισμό. Διαφανείς (ή ημιδιαφανείς) επιφάνειες πρέπει να επικαλυφθούν με ένα λεπτό στρώμα αδιαφανούς υλικού (spray).

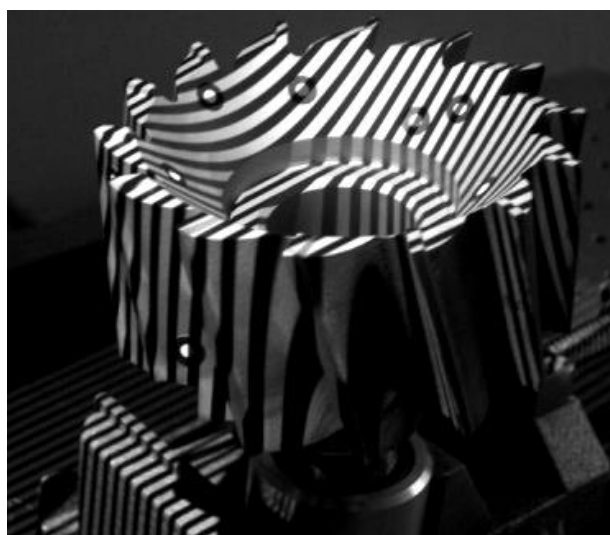
Τέλος , επειδή η πηγή φωτός είναι μη συνεκτική , η καταγραφή από την κάμερα δεν επηρεάζεται από φαινόμενα speckling , αλλά η ένταση μειώνεται δραστικά με την αύξηση της απόστασης από την πηγή. Κατά συνέπεια , η σάρωση με χρήση δομημένου φωτός περιορίζεται σε εφαρμογές κοντινών αποστάσεων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια πρώτη προσπάθεια αποτύπωσης , με χρήση της εν λόγω μεθόδου , της διαβρωμένης επιφάνειας ενός δοκιμίου με συγκόλληση FCAW (δοκίμιο IXB3 , regular , 30 ημερών) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης . Επίσης , χρησιμοποιήθηκε άλλο ένα δοκίμιο ίδιων διαστάσεων , αφού είχε αμμοβοληθεί , ώστε να γίνει μια προσπάθεια σύγκρισης των επιφανειών πριν και μετά τη διάβρωση (ιδανικά θα έπρεπε να μελετηθεί το ίδιο ακριβώς δοκίμιο πριν και μετά τη διάβρωση). Το scanner σάρωσε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά δημιουργώντας ένα πλέγμα κάθε φορά. Στη συνέχεια τα δύο πλέγματα συγκρίθηκαν με χρήση δύο διαφορετικών λογισμικών , του CloudCompare και του Rapidform XOR3. Το scanner που χρησιμοποιήθηκε είναι το IScan M300 (εικόνα 4.11) της εταιρείας Imetric. Στην εικόνα 4.12 φαίνεται ένα παράδειγμα του μοτίβου που προβάλλει το scanner του εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στην παράγραφο 5.4.3 .

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κατεργασιών των Υλικών (Μηχανουργικό & Μηχανολογικό Εργοστάσιο) της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.



Εικόνα 4.11 : 3D scanner IScan 300 της εταιρείας Imetric.[Imetric.Swiss 3D scanning systems]



Εικόνα 4.12 : Μοτίβο γραμμών που προβάλλει ένα scanner λευκού δομημένου φωτός.[56]



## Κεφάλαιο 5 : Αποτελέσματα – Συζήτηση

### 5.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς τους σε διάβρωση , τα συγκολλημένα και μη δοκίμια χάλυβα ΑΗ36 τοποθετήθηκαν σε κλιματικό θάλαμο , σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης (κυκλική αλατονέφωση), όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4. Η επεξεργασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Παράλληλα με τα ανωτέρω, για την ολοκληρωμένη μελέτη του θέματος , τα δοκίμια εξετάστηκαν ως προς τη μικροδομή και τη μικροσκληρότητά τους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται στην αρχή του κεφαλαίου.

### 5.2 Μεταλλογραφική μελέτη δοκιμίων

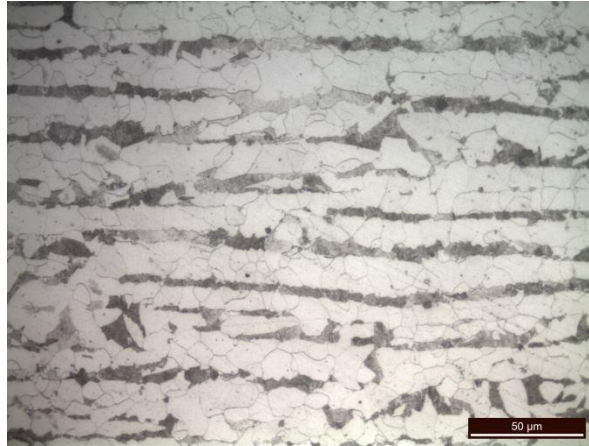
#### Μέταλλο βάσης

Όσον αφορά το μέταλλο βάσης, παρατηρήθηκε **φεριτο-περλιτική** μικροδομή όπως φαίνεται στην εικόνες 5.1 , 5.2 . Η φερριτική δομή έχει μεγαλύτερη έκταση , πράγμα αναμενόμενο λόγω της χημικής σύστασης του χάλυβα (0.18% C). Επίσης , οι κόκκοι φερρίτη και περλίτη έχουν έντονο προσανατολισμό, πράγμα που οφείλεται στην παραγωγική διαδικασία (έλαση) των ελασμάτων του χάλυβα. Ο προσανατολισμός των κόκκων είναι κάθετος στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου.



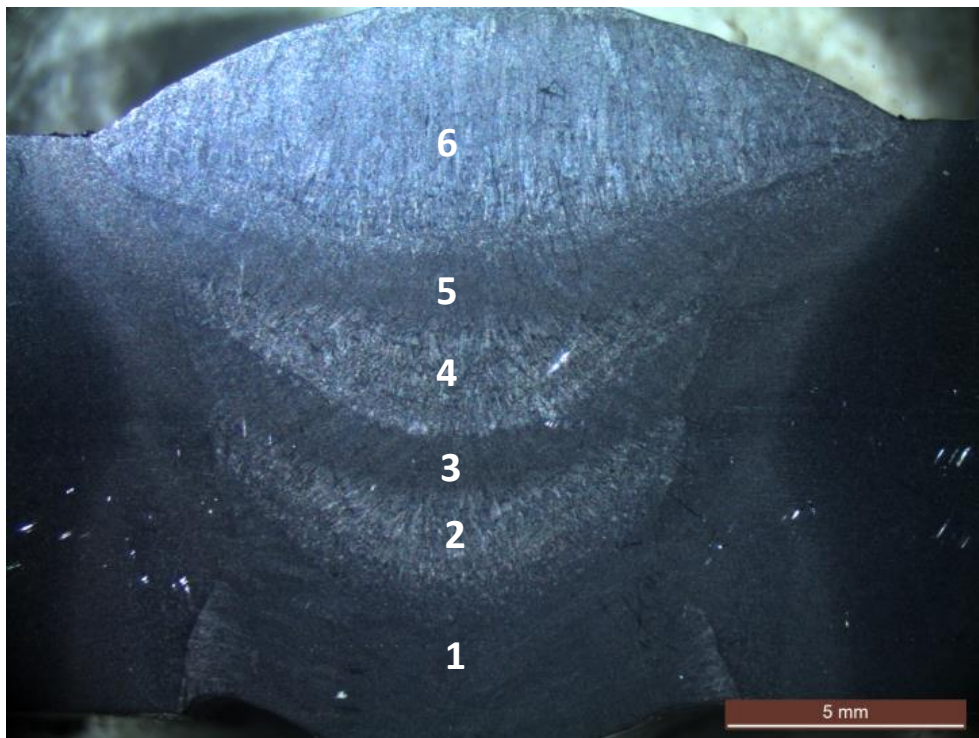
Εικόνα 5.1: Μέταλλο βάσης χάλυβα ΑΗ36.





Εικόνα 5.2 : Μέταλλο βάσης χάλυβα AH36.

### 5.2.1 Συγκολληση τύπου FCAW

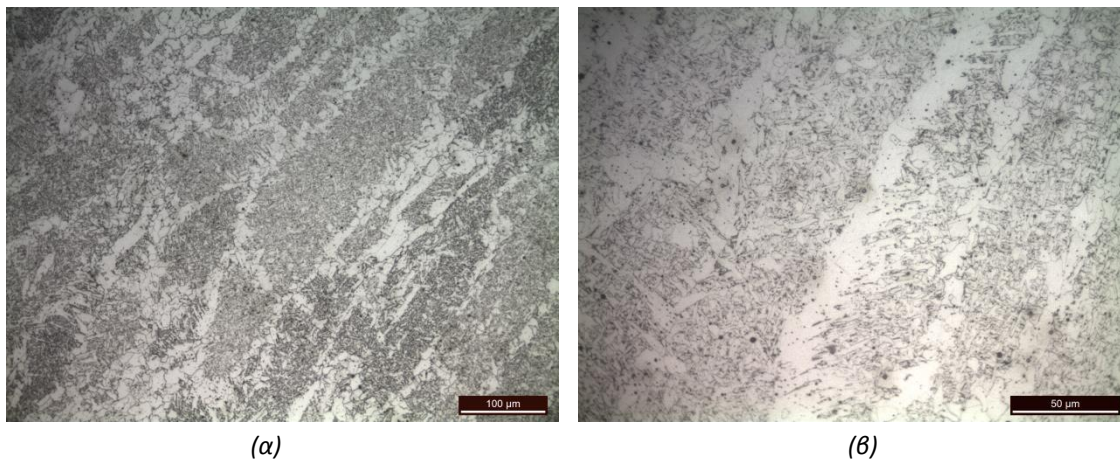


Εικόνα 5.3 : Ζώνη τήξης και ΘΕΖ συγκόλλησης FCAW.

## Ζώνη τήξης

### Περιοχές 2 , 4 , 6

Μελετώντας τη μικροδομή των συγκεκριμένων περιοχών ανοιχτού χρώματος (εικόνα 5.3) , παρατηρείται ότι παρουσιάζουν **φερριτο-μπαινιτική** μικροδομή. Οι κόκκοι έχουν χαρακτηριστική μορφή δενδριτών, κάτι το οποίο οφείλεται στη γρήγορη απόψυξη κατά τη συγκόλληση. Επίσης , παρατηρείται τοπικά η ύπαρξη βελονοειδούς φερρίτη Widmastätten (εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4 : Μικρογραφία ζώνης τήξης συγκόλλησης FCAW χάλυβα AH36 (περιοχές 2 , 4 , 6).

### Περιοχές 1 , 3 , 5

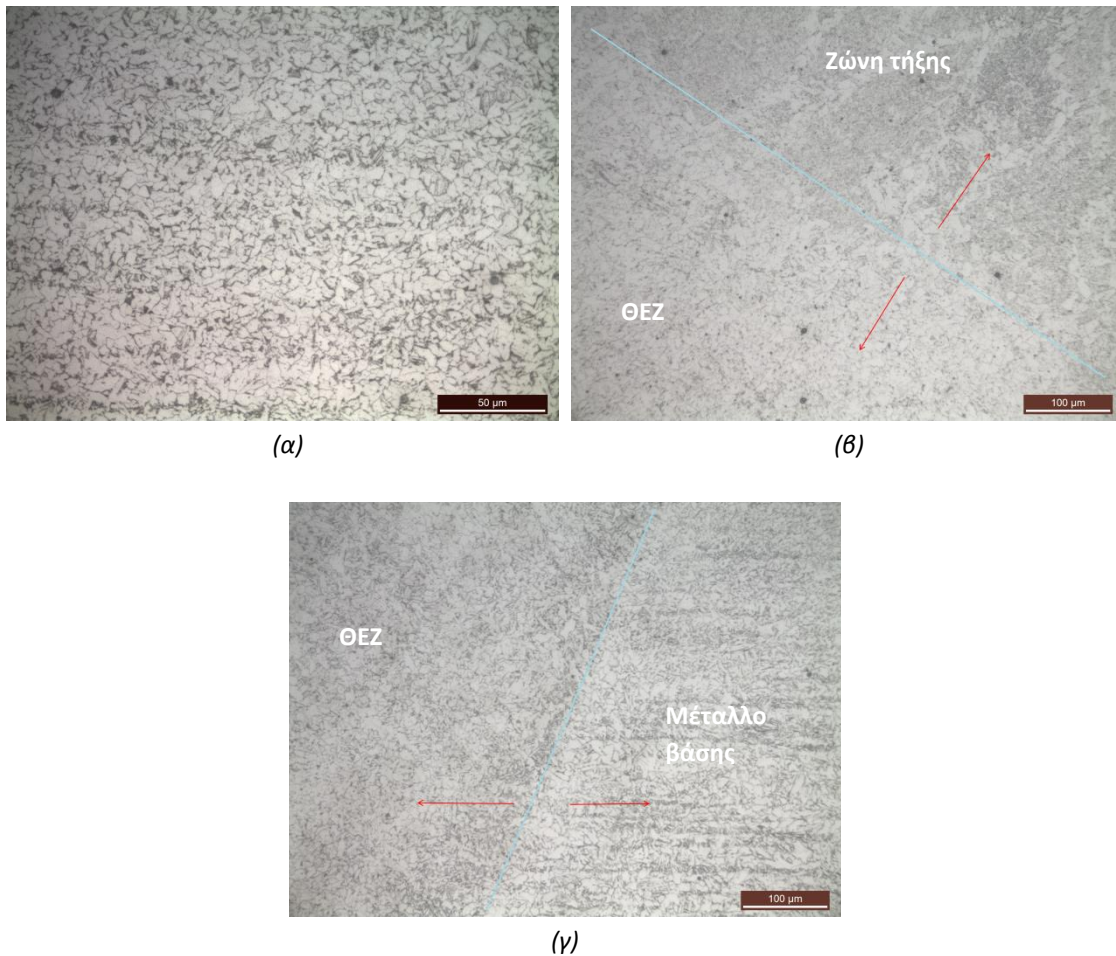
Μελετώντας της μικροδομή των περιοχών αυτών βαθύτερου χρώματος (εικόνα 5.3) , παρατηρείται ότι παρουσιάζουν **φερριτο-μπαινιτική** μικροδομή με μεγαλύτερα ποσοστά φερρίτη (εικόνα 5.5) από ότι οι περιοχές 2 , 4 , 6 . Η διαφορά στη μέγεθος των κόκκων οφείλεται στο γεγονός ότι οι περιοχές αυτές υφίστανται ανόπτηση κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης .



Εικόνα 5.5 : Μικρογραφία ζώνης τήξης συγκόλλησης FCAW χάλυβα AH36 (περιοχές 1 , 3 , 5).

### Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ)

Γενικά η μικροδομή της ΘΕΖ παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με τη μικροδομή των περιοχών 1 , 3 , 5 , της ζώνης τήξης. Παρατηρείται και εδώ **φερριτο-μπαινιτική** μικροδομή και είναι εμφανής η μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ καθώς και από τη ΘΕΖ στο μέταλλο βάσης (εικόνα 5.6).

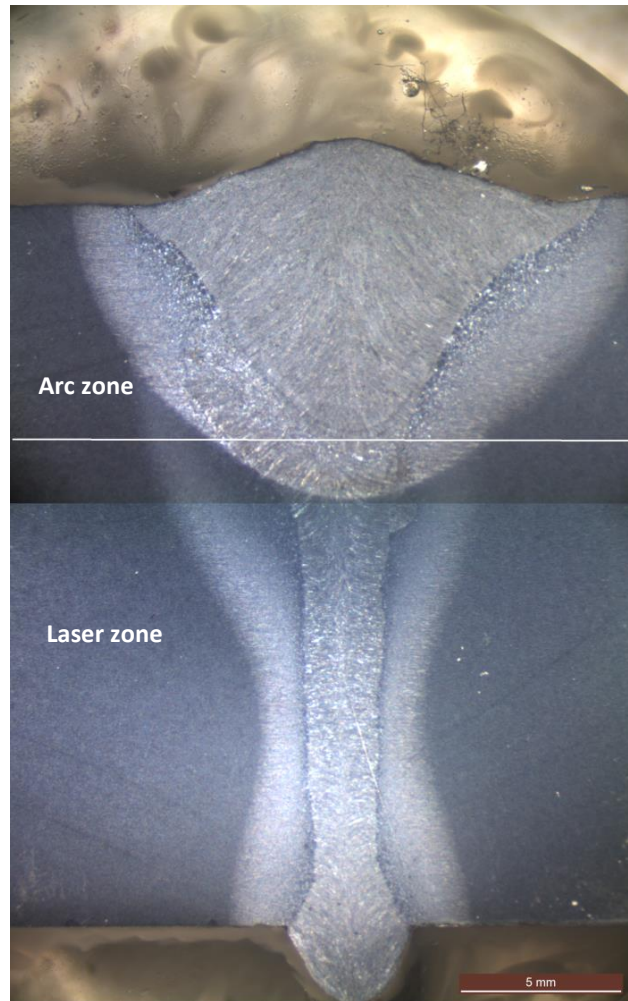


Εικόνα 5.6 : (α) Μικροδομή Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης συγκόλλησης FCAW χάλυβα AH36 , (β) Μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ , (γ) Μετάβαση από τη ΘΕΖ στο μέταλλο βάσης.



### 5.2.2 Υβριδική συγκόλληση Laser – MAG+Tandem

Στην εικόνα 5.7 που ακολουθεί, διακρίνονται εύκολα η ζώνη τήξης και η ΘΕΖ της υβριδικής συγκόλλησης. Στη ζώνη τήξης φαίνονται ξεκάθαρα η περιοχή που εργάζεται το laser (κατώτερο μέρος, πιο στενό, περίπου 12mm) και η περιοχή που εργάζεται το τόξο (ανώτερο μέρος, φαρδύτερο, περίπου 6mm) κατά την εκτέλεση της υβριδικής συγκόλλησης.

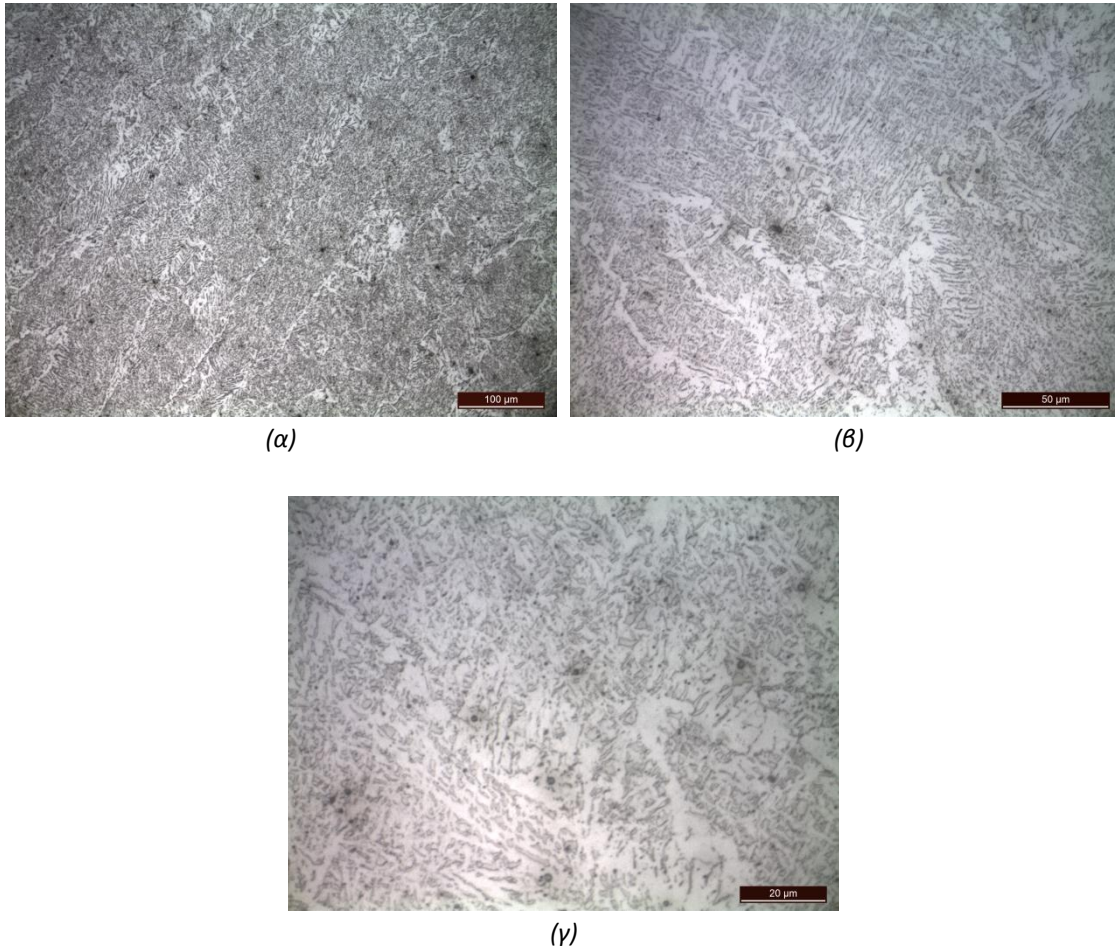


Εικόνα 5.7 : Ζώνη τήξης και ΘΕΖ υβριδικής συγκόλλησης Laser – GMA+Tandem.

## Ζώνη τήξης

### Ανώτερη περιοχή της συγκόλλησης (Arc Zone)

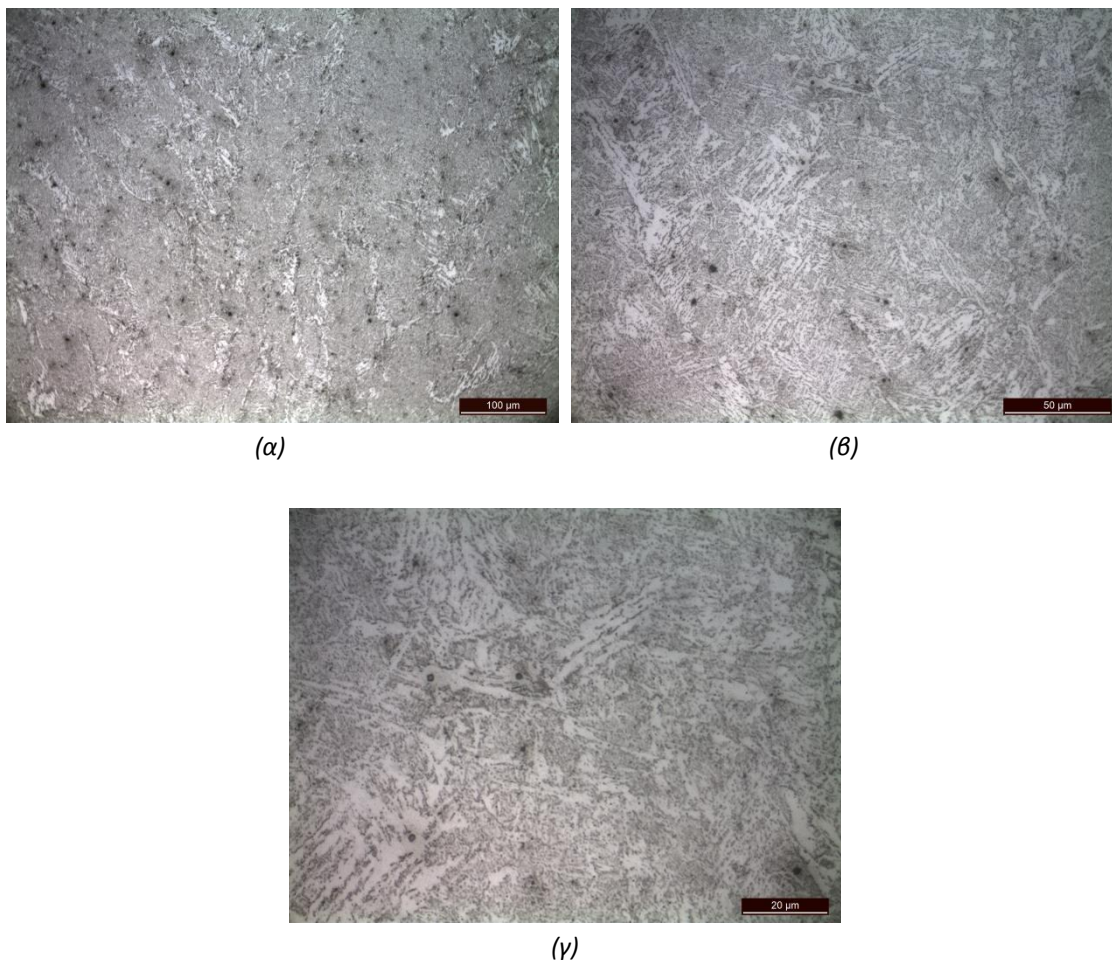
Μελετώντας τη μικροδομή του ανώτερου μέρους της υβριδικής συγκόλλησης , της περιοχής δηλαδή που εργάζεται το tandem τόξο (εικόνα 5.7) , παρατηρείται **φερριτο-μπαϊνιτική** μικροδομή. Οι κόκκοι βρίσκονται υπό τη μορφή δενδριτών με χαρακτηριστική μορφολογία ταχείας στερεοποίησης (εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8 : Μικροδομή ανώτερης περιοχής ζώνης τήξεως , υβριδικής συγκόλλησης Laser-MAG+Tandem.

**Κατώτερη περιοχή της συγκόλλησης (Laser zone)**

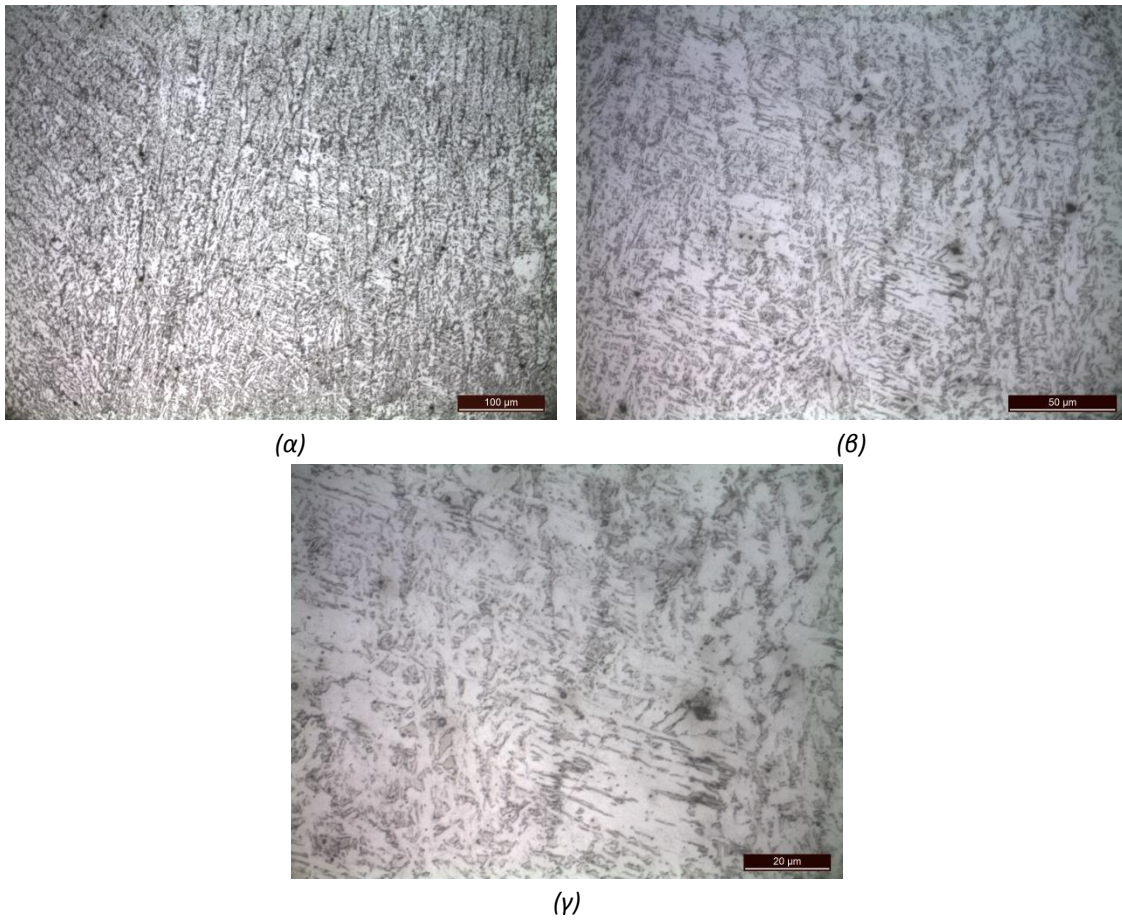
Η περιοχή που εργάζεται το laser (εικόνα 5.7) , εμφανίζει επίσης **φερριτο-μπαϊνιτική** μικροδομή με χαρακτηριστική δενδριτική μορφή των κόκκων (εικόνα 5.9) . Παρατηρείται , επίσης , χαρακτηριστική μορφολογία ταχείας στερεοποίησης.



Εικόνα 5.9 : Μικροδομή κατώτερης περιοχής ζώνης τήξεως , υβριδικής συγκόλλησης Laser-MAG+Tandem.



**Ζώνη μετάβασης από laser zone σε arc zone**



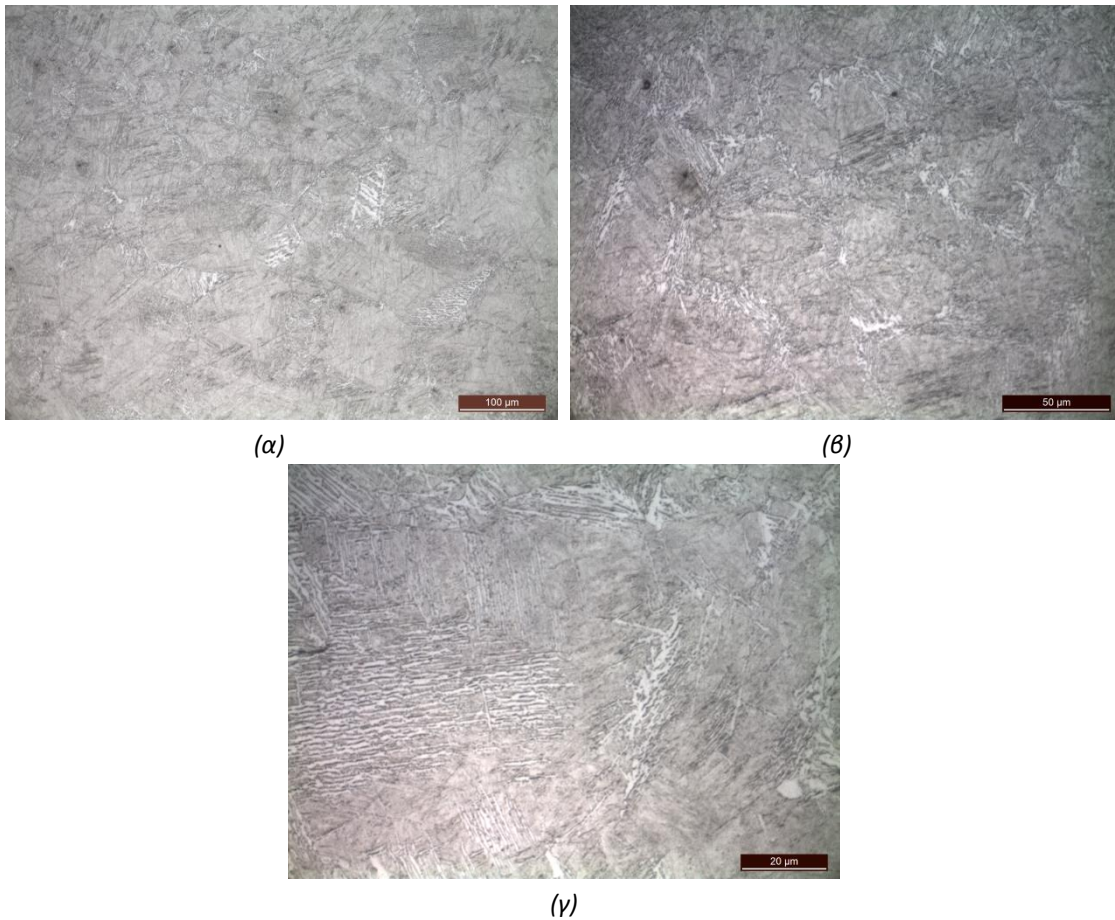
Εικόνα 5.10 : Μικροδομή περιοχής μετάβασης laser zone – arc zone στη ζώνη τήξης υβριδικής συγκόλλησης Laser-MAG+Tandem.



### Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (ΘΕΖ)

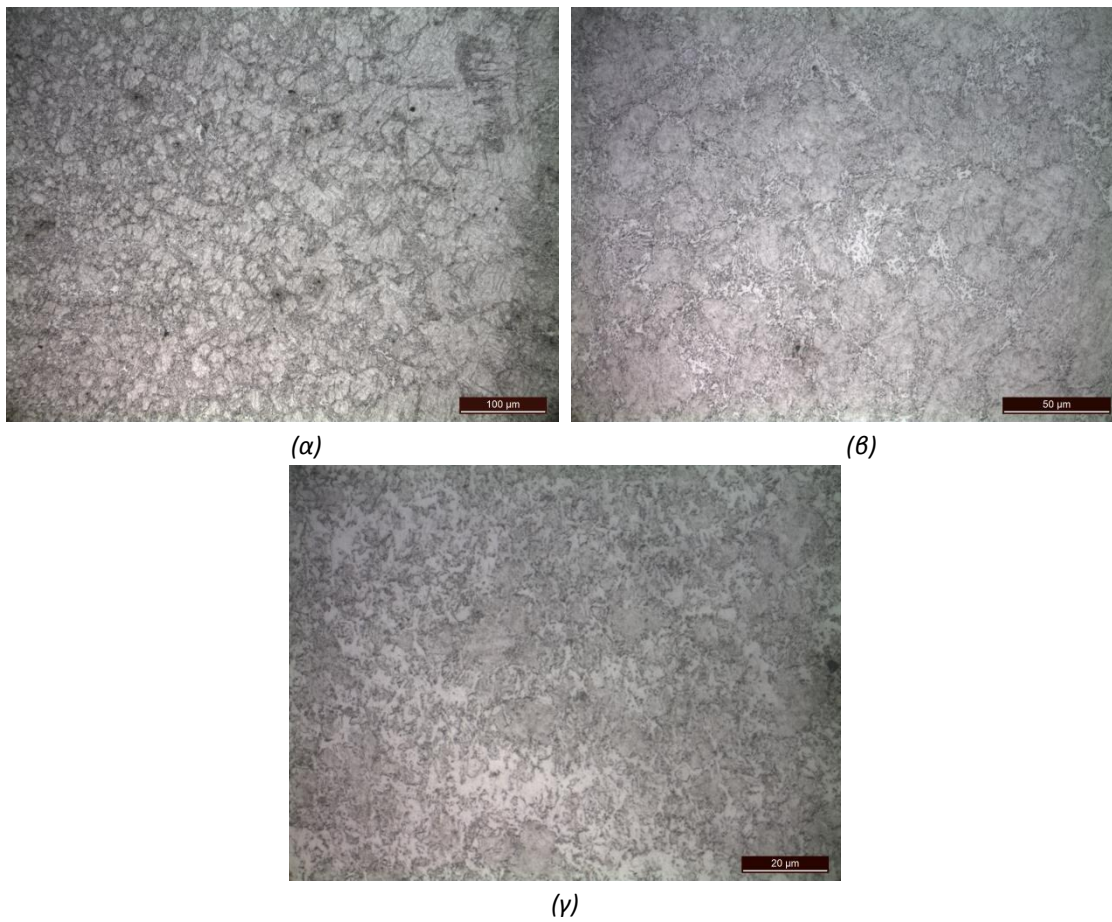
Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, τόσο στην περιοχή του τόξου (Εικ. 5.11), όσο και στην περιοχή του laser (Εικ. 5.12) παρατηρείται μεγέθυνση των κόκκων.

### Ανώτερη περιοχή υβριδικής συγκόλλησης (Arc zone)



Εικόνα 5.11 : Μικροδομή ΘΕΖ ανώτερης περιοχής υβριδικής συγκόλλησης Laser-MAG+Tandem.

**Κατώτερη περιοχή υβριδικής συγκόλλησης (Laser zone)**



Εικόνα 5.12 : Μικροδομή ΘΕΖ κατώτερης περιοχής υβριδικής συγκόλλησης Laser-MAG+Tandem.

### 5.3 Μικροσκληρομετρήσεις

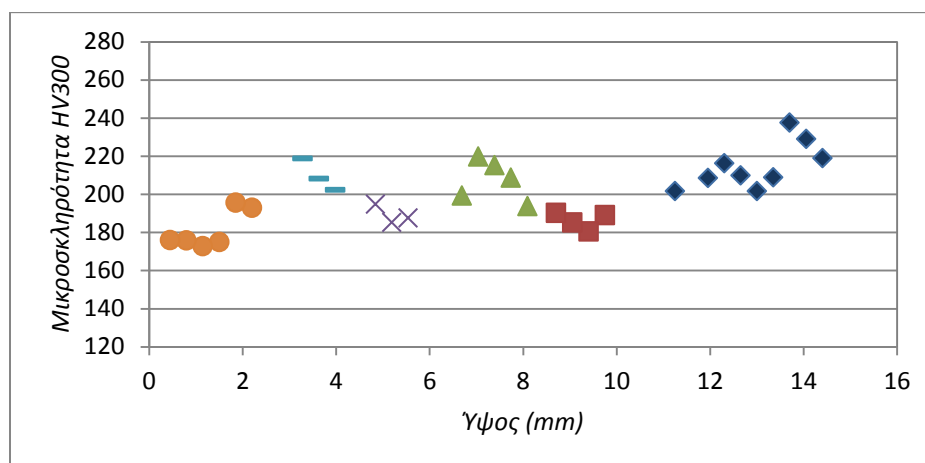
Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στα ίδια δοκίμια που έγινε και η μεταλλογραφική μελέτη , ώστε να διακρίνονται οι περιοχές που γίνεται η μέτρηση κάθε φορά (μέταλλο βάσης , ΘΕΖ , ζώνη τήξης).

#### 5.3.1 Συγκόλληση τύπου FCAW

Κατ' αρχάς έγιναν μετρήσεις κατά το ύψος της συγκόλλησης στη ζώνη τήξης , με σημείο αναφοράς τη ρίζα της συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1 και στο σχήμα 5.1.

Πίνακας 5.1 : Αποτελέσματα σκληρομέτρησης κατά το ύψος της ζώνης τήξης.

| Αριθμός δοκιμής | Απόσταση γ (mm) από τη ρίζα της συγκόλλησης | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> |
|-----------------|---|-----------------------------------|
| 1               | 0.45  | 176                               |
| 2               | 0.8   | 175.7                             |
| 3               | 1.15  | 172.8                             |
| <b>4</b>        | <b>1.5</b>                                  | <b>175</b>                        |
| 5               | 1.85  | 195.6                             |
| 6               | 2.2   | 192.9                             |
| 7               | 3.28  | 218.7                             |
| <b>8</b>        | <b>3.63</b>                                 | <b>208.2</b>                      |
| 9               | 3.98  | 202.3                             |
| 10              | 4.84  | 194.7                             |
| <b>11</b>       | <b>5.19</b>                                 | <b>185.2</b>                      |
| 12              | 5.54  | 187.5                             |
| 13              | 6.69  | 199.2                             |
| 14              | 7.04  | 219.2                             |
| <b>15</b>       | <b>7.39</b>                                 | <b>215.2</b>                      |
| 16              | 7.74  | 208.7                             |
| 17              | 8.09  | 193.8                             |
| 18              | 8.7   | 190.2                             |
| 19              | 9.05  | 185.2                             |
| <b>20</b>       | <b>9.4</b>                                  | <b>180.4</b>                      |
| 21              | 9.75  | 189.1                             |
| 22              | 11.25                                       | 201.7                             |
| 23              | 11.95                                       | 208.5                             |
| 24              | 12.3  | 216.3                             |
| <b>25</b>       | <b>12.65</b>                                | <b>209.8</b>                      |
| 26              | 13  | 201.4                             |
| 27              | 13.35                                       | 208.8                             |
| 28              | 13.7  | 237.5                             |
| 29              | 14.05                                       | 229                               |
| 30              | 14.4  | 218.9                             |



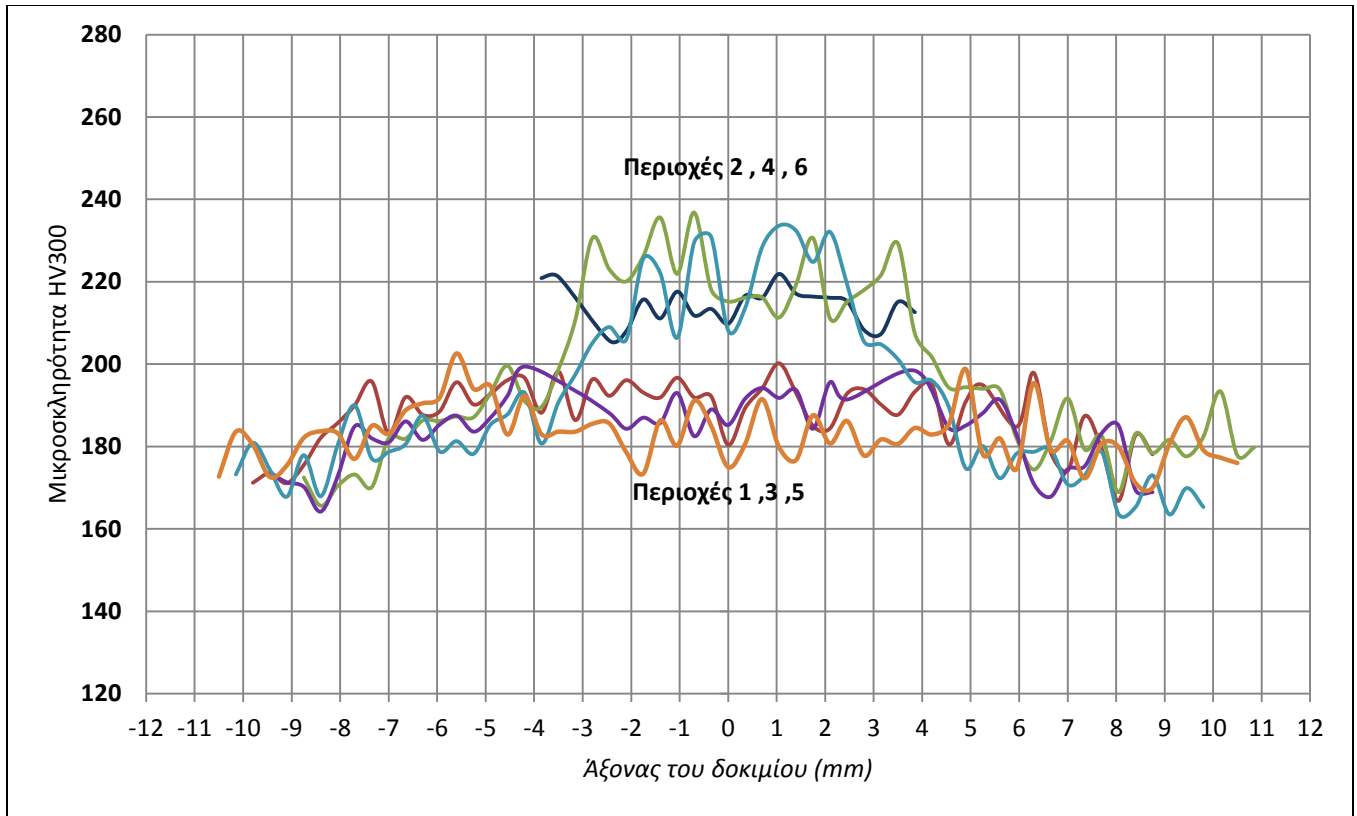
Σχήμα 5.1 : Η μικροσκληρότητα της ζώνης τήξης συναρτήσεϊ της απόστασης από τη ρίζα της συγκόλλησης.

Παρατηρείται ότι οι περιοχές 1 , 3 , 5 εμφανίζουν μικρότερες τιμές σκληρότητας από τις 2 , 4 , 6 κατ'αναλογία με τις διαφορές που παρουσιάζουν στη μικροδομή , γεγονός που οφείλεται στην ανόπτηση που έχουν υποστεί οι πρώτες κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Στη συνέχεια , πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με κέντρα τις δοκιμές 4 , 8 , 11 , 15 , 20 , 25 (πίνακας 5.1) και κατά άξονα κάθετο στη ραφή κάθε φορά , με ισοαπόσταση 0.35 mm. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.2. Παρατηρώντας το σχήμα 5.2 , φαίνεται πως οι μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας εμφανίζονται στη ζώνη τήξης (αυξημένες σε ένα ποσοστό της τάξης του 20%) και μειώνονται όσο οι μετρήσεις προχωρούν προς τη ΘΕΖ και στη συνέχεια στο μέταλλο βάσης. Η τιμή σκληρότητας για τη ΘΕΖ είναι  $184 \pm 7$  HV<sub>300</sub> , ενώ για το μέταλλο βάσης  $176 \pm 7$  HV<sub>300</sub> . Στη ζώνη τήξης , για τις περιοχές 1,3,5 η τιμή σκληρότητας είναι  $189 \pm 6$  HV<sub>300</sub> και για τις περιοχές 2,4,6 αντίστοιχα  $212 \pm 13$  HV<sub>300</sub> . Οι περιοχές που έχουν υποστεί ανόπτηση (1,3,5) δεν εμφανίζουν μεγάλη μεταβολή στη σκληρότητα , σε αντίθεση με τις περιοχές 2,4 ,όσο οι μετρήσεις εκτείνονται προς τη ΘΕΖ , λόγω παρόμοιας μικροδομής. Τέλος , η σκληρότητα στις ανοπτημένες περιοχές της ζώνης τήξης εμφανίζει μείωση της τάξης του 11% σε σχέση με τις μη ανοπτημένες. Όλοι οι πίνακες με τις σκληρομετρήσεις παρατίθενται στο παράρτημα Γ.

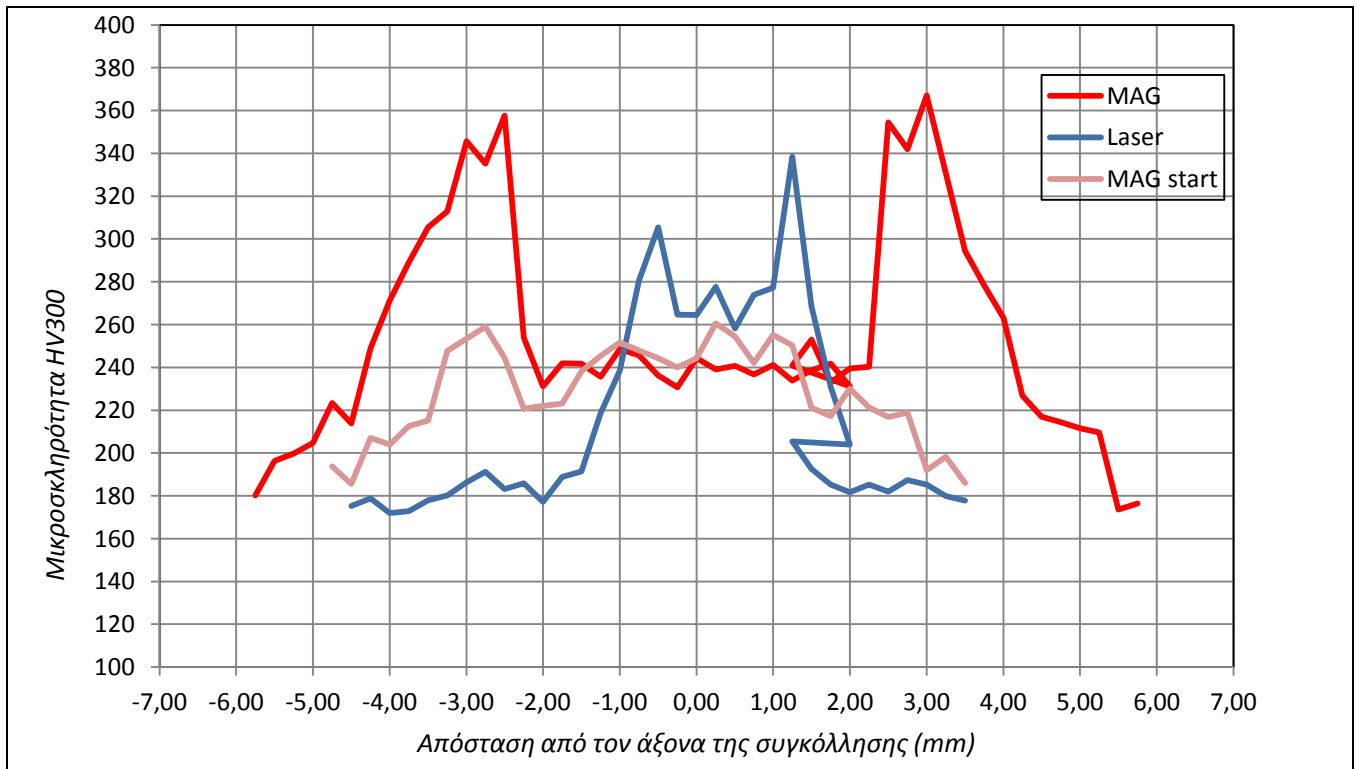
### 5.3.2 Υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem

Όσον αφορά στην υβριδική συγκόλληση , πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή που εργάζεται το laser , στην περιοχή που εργάζεται το τόξο (arc zone) , καθώς και στην περιοχή μετάβασης , εκεί δηλαδή που ξεκινά να εργάζεται το τόξο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 5.3.

Παρατηρώντας το σχήμα 5.3 , φαίνεται κατ'αρχάς ότι η σκληρότητα μειώνεται αισθητά όσο γίνεται η μετάβαση προς το μέταλλο βάσης , σε τιμές της τάξης των 180 HV<sub>300</sub> . Χαρακτηριστικό είναι , ωστόσο , πως οι μέγιστες τιμές σκληρότητας εμφανίζονται κατά τη μετάβαση από τη ζώνη τήξης στη ΘΕΖ. Όσον αφορά στην περιοχή του τόξου (MAG στο σχήμα) , στη ζώνη τήξης παρατηρείται μια μέση σκληρότητα της τάξης των 240 HV<sub>300</sub> και κατά τη μετάβαση στη ΘΕΖ η τιμή αυτή ανεβαίνει στα 340 HV<sub>300</sub> . Όσον αφορά στην περιοχή του laser , στη ζώνη τήξης παρατηρείται μια μέση σκληρότητα της τάξης των 260 HV<sub>300</sub> , ενώ κατά τη μετάβαση στη ΘΕΖ η τιμή αυτή ανεβαίνει στα 320 HV<sub>300</sub> .



Σχήμα 5.2 : Μεταβολή της μικροσκληρότητας κατά μήκος της τομής της συγκόλλησης FCAW.



Σχήμα 5.3 : Μεταβολή της σκληρότητας κατά μήκος της τομής της υβριδικής συγκόλλησης.



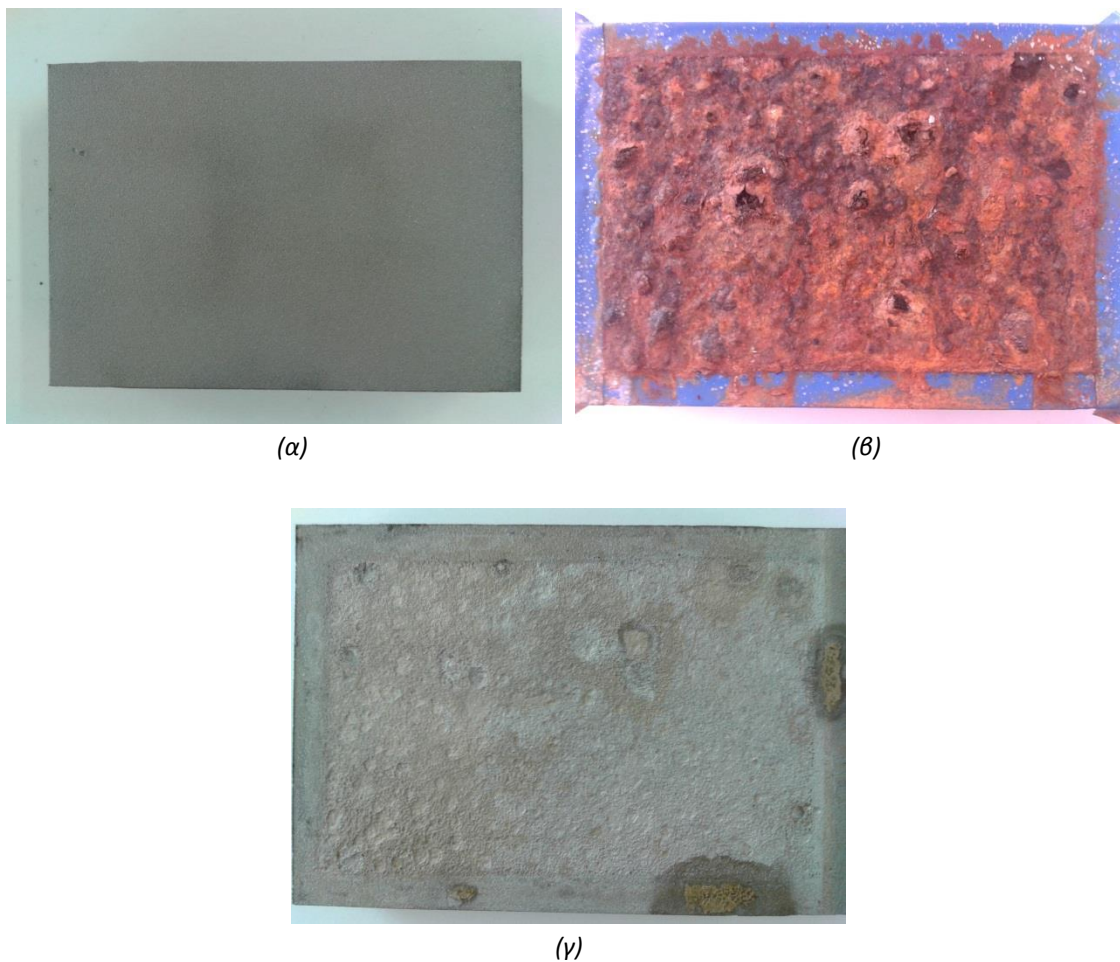
## 5.4 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης

Τα δοκίμια , με την τοποθέτησή τους στον κλιματικό θάλαμο , εκτέθηκαν σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς τους σε διάβρωση (βλ. παρ. 4.7). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

### 5.4.1 Μακροσκοπικές παρατηρήσεις

Για τη μακροσκοπική μελέτη , τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή :

- πριν την τοποθέτησή τους στο θάλαμο αλατονέφωσης (εικόνα 5.13α)
- μετά την απομάκρυνσή τους από αυτόν (εικόνα 5.13β) και
- μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης (εικόνα 5.13γ)



Εικόνα 5.13 : (α) Δοκίμιο πριν την τοποθέτησή του στο θάλαμο, (β) Δοκίμιο μετά την απομάκρυνσή του από το θάλαμο, (γ) Δοκίμιο μετά τον καθαρισμό του από τα προϊόντα της διάβρωσης.

#### 5.4.1.1 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετάλλου βάσης μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο

Παρατηρώντας τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο θάλαμο για πέντε (5) ημέρες , προκύπτει ότι η εκτεθειμένη επιφάνεια κάθε δοκιμίου καλύπτεται ολοκληρωτικά από προϊόν διάβρωσης καφέ χρώματος. Παράλληλα , εμφανίζονται κατά τόπους σημεία ανοιχτότερου χρώματος που περιβάλλονται από γριζωπό περίγραμμα (εικόνες 5.14,5.15).

Στη συνέχεια (10 ημέρες) τα εντοπισμένα αυτά σημεία , πληθαίνουν , μεγάλωνουν ως προς τη διάμετρό τους και καταλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερη επιφάνεια του δοκιμίου. Παράλληλα σε ορισμένα δοκίμια (κυρίως interval) παρατηρείται η εμφάνιση μικρών κρατήρων και διαρρηγνύονται οι πρώτοι από αυτούς.

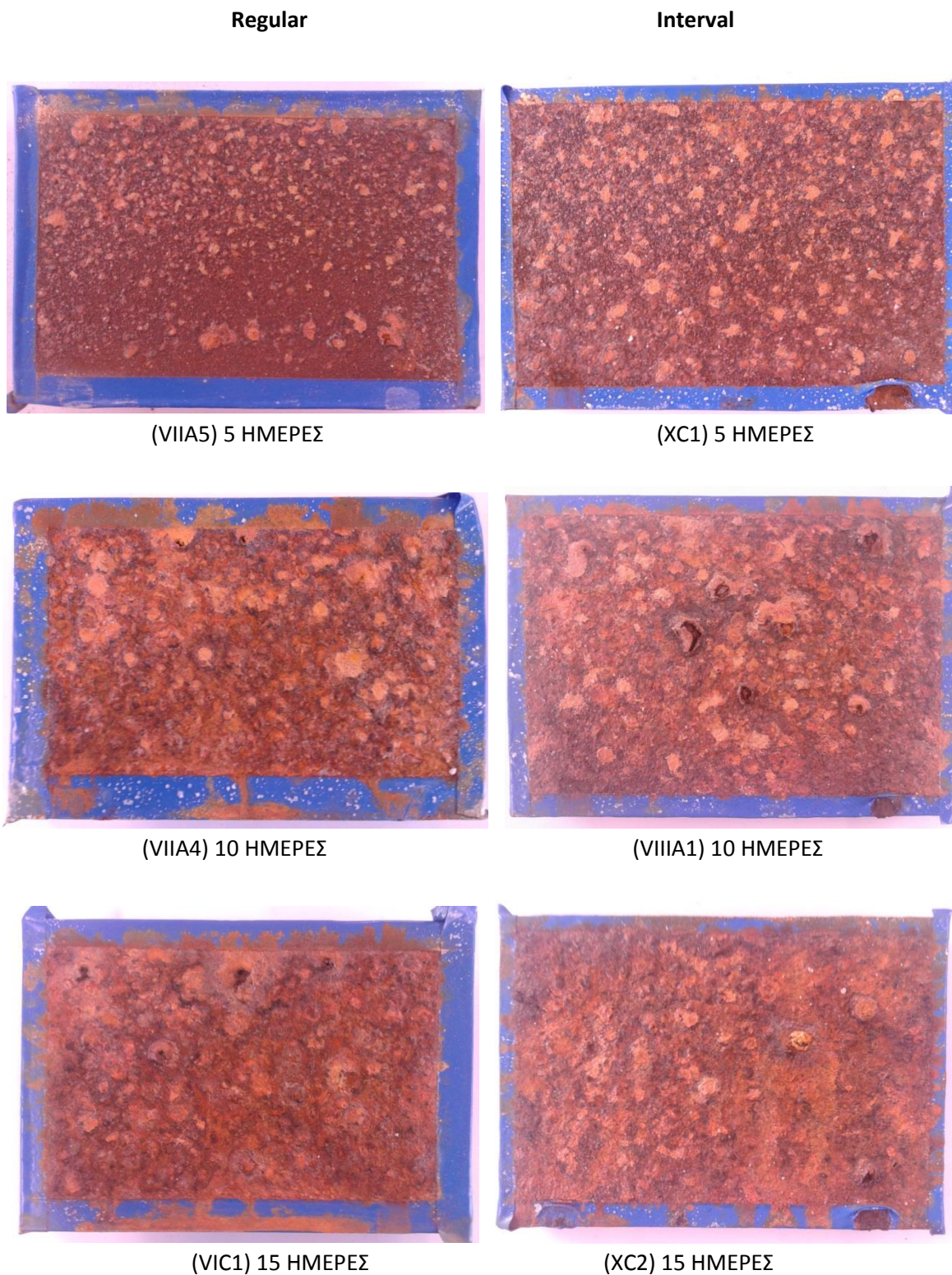
Μετά από παραμονή 15 ημερών στο θάλαμο , τα εντοπισμένα σημεία έχουν καλύψει σχεδόν ολοκληρωτικά την επιφάνεια του δοκιμίου , ο αριθμός των μικρών κρατήρων αυξάνεται όπως αυξάνεται και ο αριθμός αυτών που έχουν διαρρηχθεί.

Μετά το πέρας των 20 ημερών , οι μικροί αυτοί κρατήρες ενώνονται μεταξύ τους προς το σχηματισμό μεγαλύτερων , η πλειοψηφία των οποίων έχει διαρρηχθεί.

Η συνένωση των μικρών κρατήρων σε μεγαλύτερους και η διάρρηξή τους εξελίσσεται έως και το τέλος του πειράματος , αποκαλύπτοντας επάλληλα στρώματα προϊόντων διάβρωσης. Τα ανώτερα στρώματα των προϊόντων διάβρωσης είναι εύθρυπτα και απομακρύνονται εύκολα από το δοκίμιο.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια που τοποθετήθηκαν από την αρχή στο θάλαμο σύμφωνα με το πρόγραμμα (regular) με αυτά που τοποθετήθηκαν στο θάλαμο μεταγενέστερα (interval) , για τους ίδιους χρόνους παραμονής, παρατηρείται πως το φαινόμενο εξελίσσεται με μεγαλύτερη ταχύτητα στα δεύτερα. Η διαφορά είναι σαφέστερη για τα δοκίμια που παραμένουν στο θάλαμο για μικρό χρονικό διάστημα , σε διαφορετικές χρονικές στιγμές , π.χ. 5 ημέρες (0-5 και 25-30) και 10 ημέρες (0-10 και 20-30).



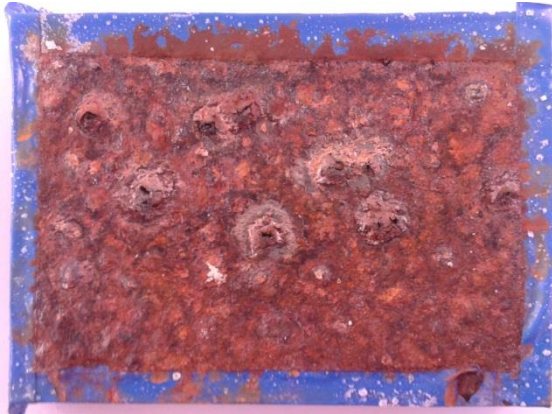


Εικόνα 5.14 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμίων μετάλλου βάσης regular – interval , για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (5,10,15 ημερών).

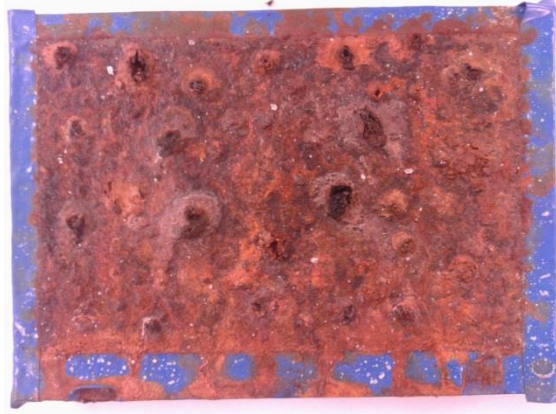


Regular

Interval



(VIII C1) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(IX C1) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VIII C4) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(IX A4) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(XA1) 30 ΗΜΕΡΕΣ



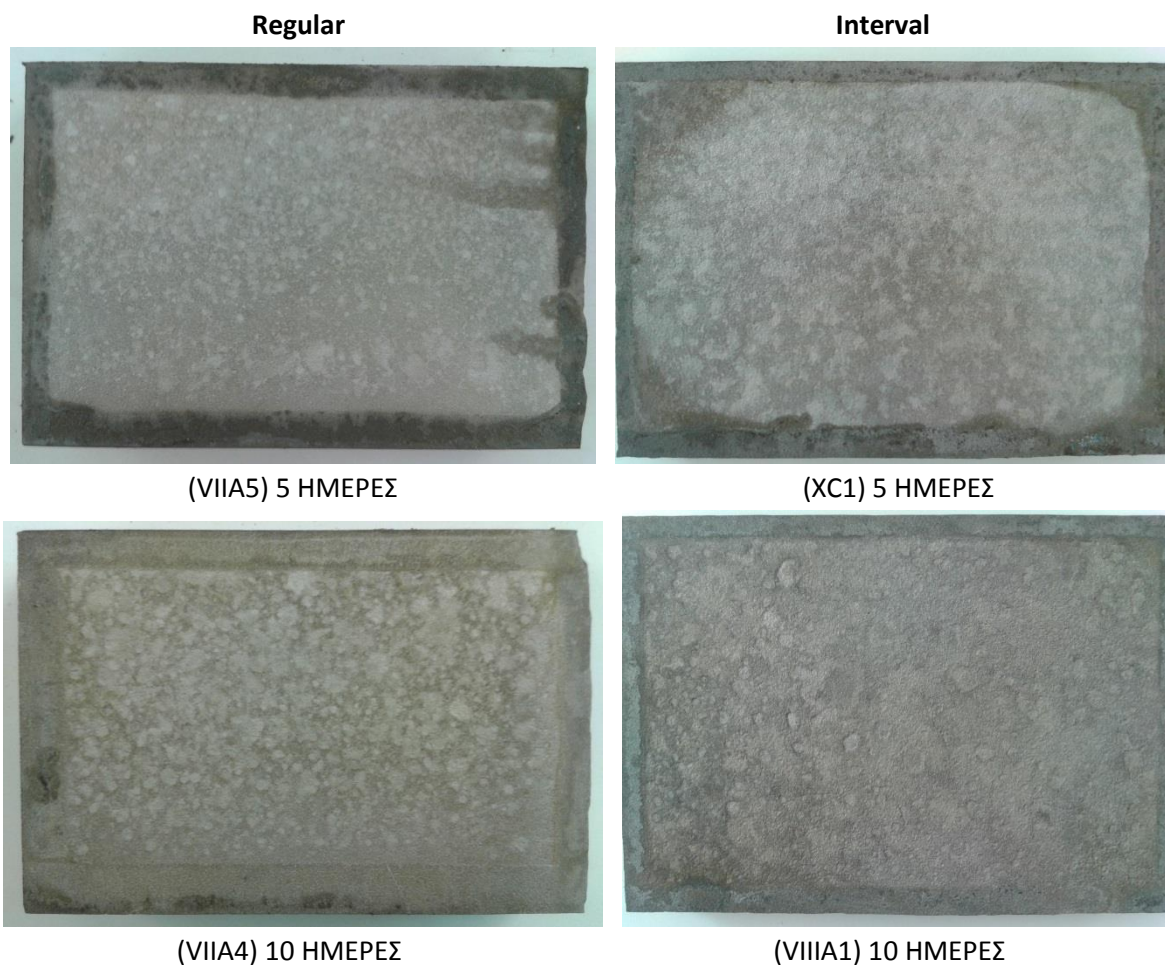
(XC3) 30 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.15 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμών μετάλλου θάσης *regular* – *interval* , για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (20,25,30 ημερών). Τα δοκίμια 30 ημερών είναι όλα *regular*.

#### 5.4.1.2 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών μετάλλου βάσης μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης

Η απομάκρυνση των προϊόντων της διάβρωσης από την επιφάνεια των δοκιμών (βλ. παρ. 4.7.6) αποκαλύπτει τη μορφολογία της διάβρωσης. Η μορφή της διάβρωσης που παρατηρείται προσομοιάζει με εκείνη της διάβρωσης με βελονισμούς (pitting corrosion). Οι βελονισμοί εξελίσσονται κατά το πλάτος, ενώνονται με διπλανά σημεία εντοπισμένης διάβρωσης σχηματίζοντας μεγαλύτερες περιοχές, ενώ ταυτόχρονα βαθαινούν δημιουργώντας τελικά κοιλοότητες. Το βάθος των κοιλοτήτων αυξάνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής των δοκιμών στο θάλαμο.

Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι τα προϊόντα της διάβρωσης αρχικά απομακρύνονται με ευκολία από την επιφάνεια του δοκιμίου, όμως η δυσκολία αυξάνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής του δοκιμίου στο θάλαμο. Είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής τα προϊόντα της διάβρωσης εμφανίζουν ισχυρότερη συνάφεια με το υπόστρωμα, εξαιτίας και της προκύπτουσας μορφολογίας της επιφάνειας (μεγαλύτερη τραχύτητα, κοιλοότητες). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι τα δοκίμια που παρέμειναν στο θάλαμο 5 ημέρες χρειάστηκαν 40 – 45 λεπτά για τον καθαρισμό της επιφάνειάς τους, ενώ για τα δοκίμια που παρέμειναν στο θάλαμο για 30 ημέρες χρειάστηκαν έως και 6 - 7 ώρες.



Εικόνα 5.16 : Σύγκριση επιφανειών δοκιμών μετάλλου βάσης *regular* – *interval* μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης, για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (5,10 ημερών).



**Regular**

**Interval**



(VIC1) 15 ΗΜΕΡΕΣ



(XC2) 15 ΗΜΕΡΕΣ.



(VIIC1) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(IXC1) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VIIC4) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(IXA4) 25 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.17 : Σύγκριση επιφανειών δοκιμίων μετάλλου βάσης *regular* – *interval* μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης, για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (15,20,25ημερών).



(XA1) 30 ΗΜΕΡΕΣ



(XC3) 30 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.18 : Σύγκριση επιφανειών δοκιμίων μετάλλου βάσης (*regular* 30 ημερών) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.

### 5.4.1.3 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών με συγκόλληση μετά την απομάκρυνσή τους από το θάλαμο

Παρατηρείται πως η εξέλιξη της διάβρωσης στα δοκίμια με συγκόλληση ακολουθεί την ίδια πορεία όπως και στα δοκίμια μετάλλου βάσης. Παρατίθενται στη συνέχεια οι εικόνες των δοκιμών, όπως αυτά εμφανίζονται μετά την έκθεση στο θάλαμο αλατονέφωσης.

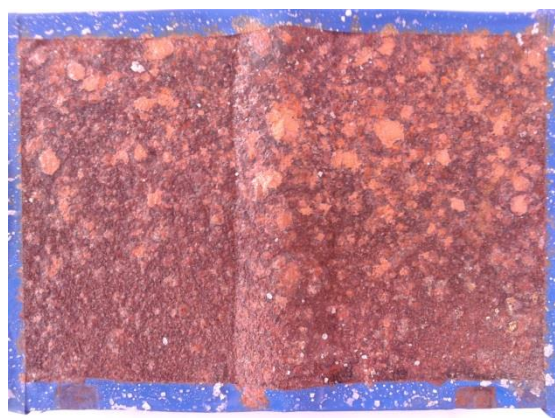
#### Δοκίμια με συγκόλληση FCAW

Regular

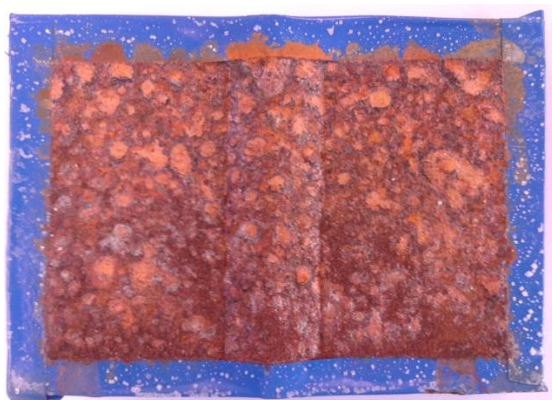
Interval



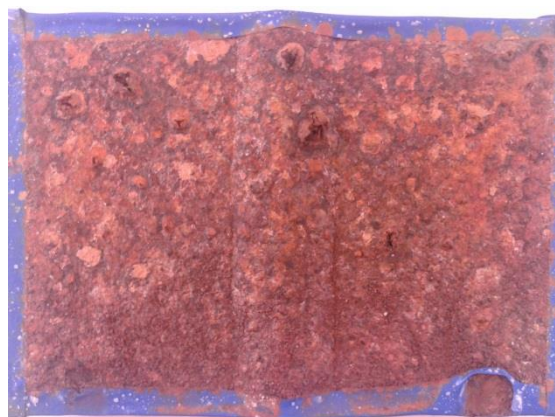
(VIII B3) 5 ΗΜΕΡΕΣ



(IX B3) 5 ΗΜΕΡΕΣ



(IX B4) 10 ΗΜΕΡΕΣ



(IX B2) 10 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.19 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμών (regular-interval) με συγκόλληση FCAW, για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (5,10 ημερών).



**Regular**

**Interval**



(IXB1) 15 ΗΜΕΡΕΣ



(VIII B4) 15 ΗΜΕΡΕΣ



(XB2) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VIII B2) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VIII B1) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(XB1) 25 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.20 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμίων (*regular-interval*) με συγκόλληση FCAW , για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (15,20,25 ημερών).





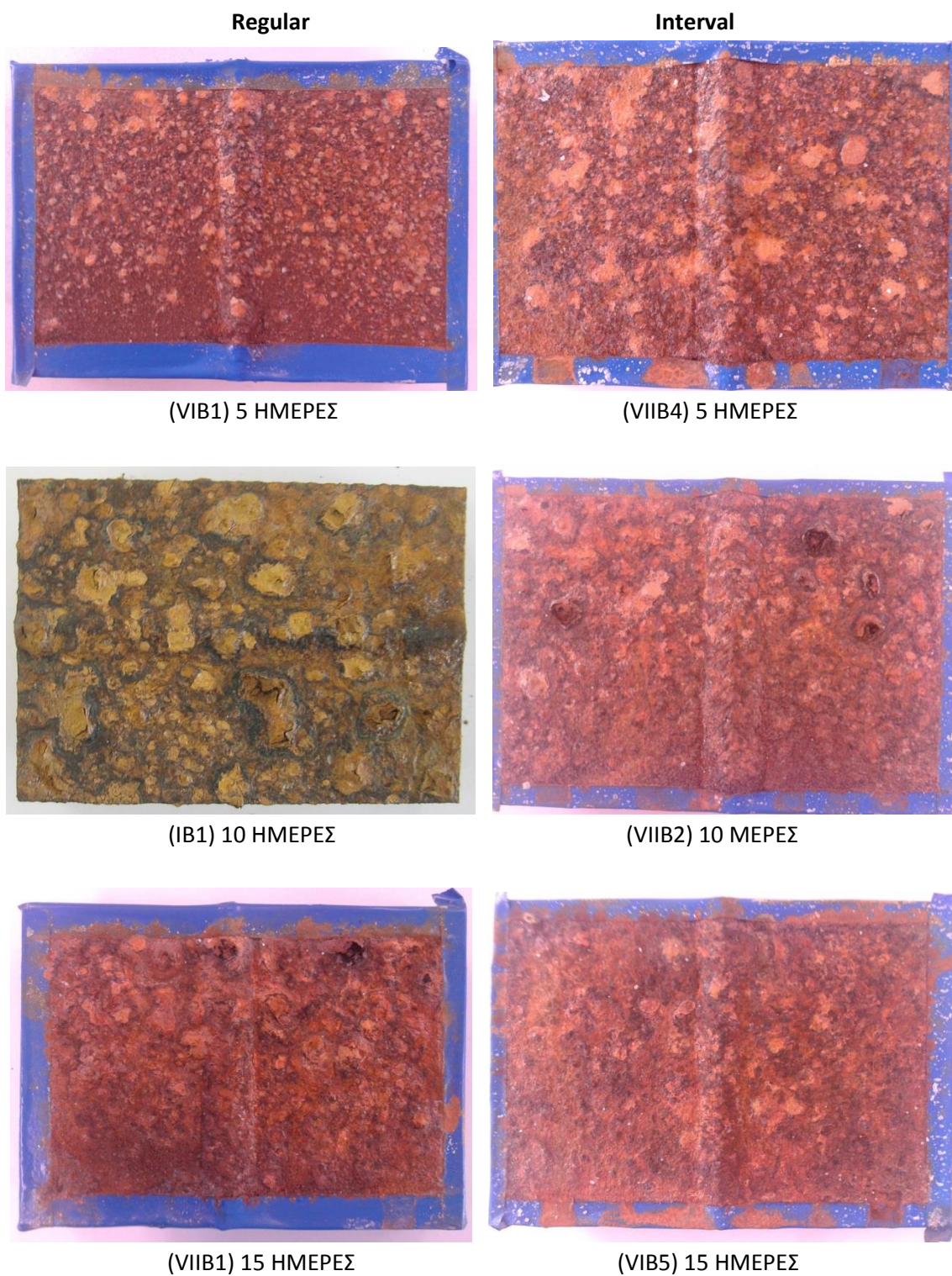
(IXB3) 30 ΗΜΕΡΕΣ



(XB4) 30 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.21 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμών (regular 30 ημερών) με συγκόλληση FCAW.

Υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem



Εικόνα 5.22 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμών (regular-interval) με υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem , για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (5,10,15 ημερών).



Regular

Interval



(VIIB5 20) ΗΜΕΡΕΣ



(VIB2) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VIB3 25) ΗΜΕΡΕΣ



(VIIB3) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(VIB4) 30 ΗΜΕΡΕΣ



(IIIB2) 30 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.23 : Σύγκριση επιφανειών διαβρωμένων δοκιμίων (*regular-interval*) με υβριδική συγκόλληση *Laser-MAG+Tandem* , για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (20,25,30 ημερών). Τα δοκίμια 30 ημερών είναι όλα *regular*.

#### 5.4.1.4 Παρατηρήσεις για την επιφάνεια των δοκιμών με συγκόλληση μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.

Στις εικόνες που ακολουθούν , παρουσιάζονται τα δοκίμια με συγκόλληση μετά την έκθεσή τους από το θάλαμο και μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.

##### Δοκίμια με συγκόλληση FCAW

Regular

Interval



(VIII B3) 5 ΗΜΕΡΕΣ



(XB3) 5 ΗΜΕΡΕΣ



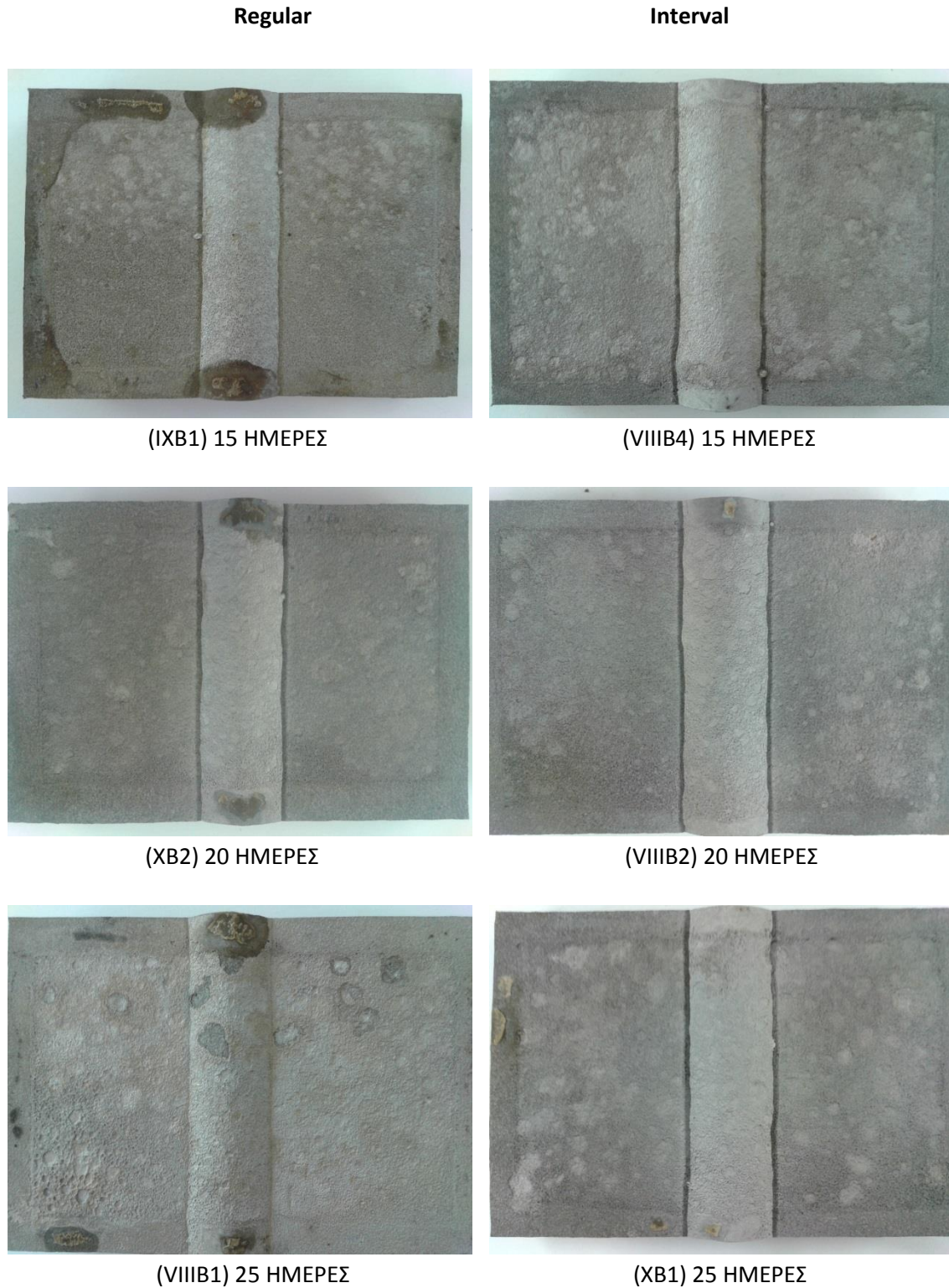
(IX B4) 10 ΗΜΕΡΕΣ



(IX B2) 10 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.24 : Σύγκριση επιφανειών δοκιμών (regular – interval) με συγκόλληση FCAW για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (5,10 ημερών), μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.





Εικόνα 5.25 : Σύγκριση επιφανειών δοκιμίων (regular – interval) με συγκόλληση FCAW για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (15,20,25 ημερών), μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.



(IXB3) 30 ΗΜΕΡΕΣ

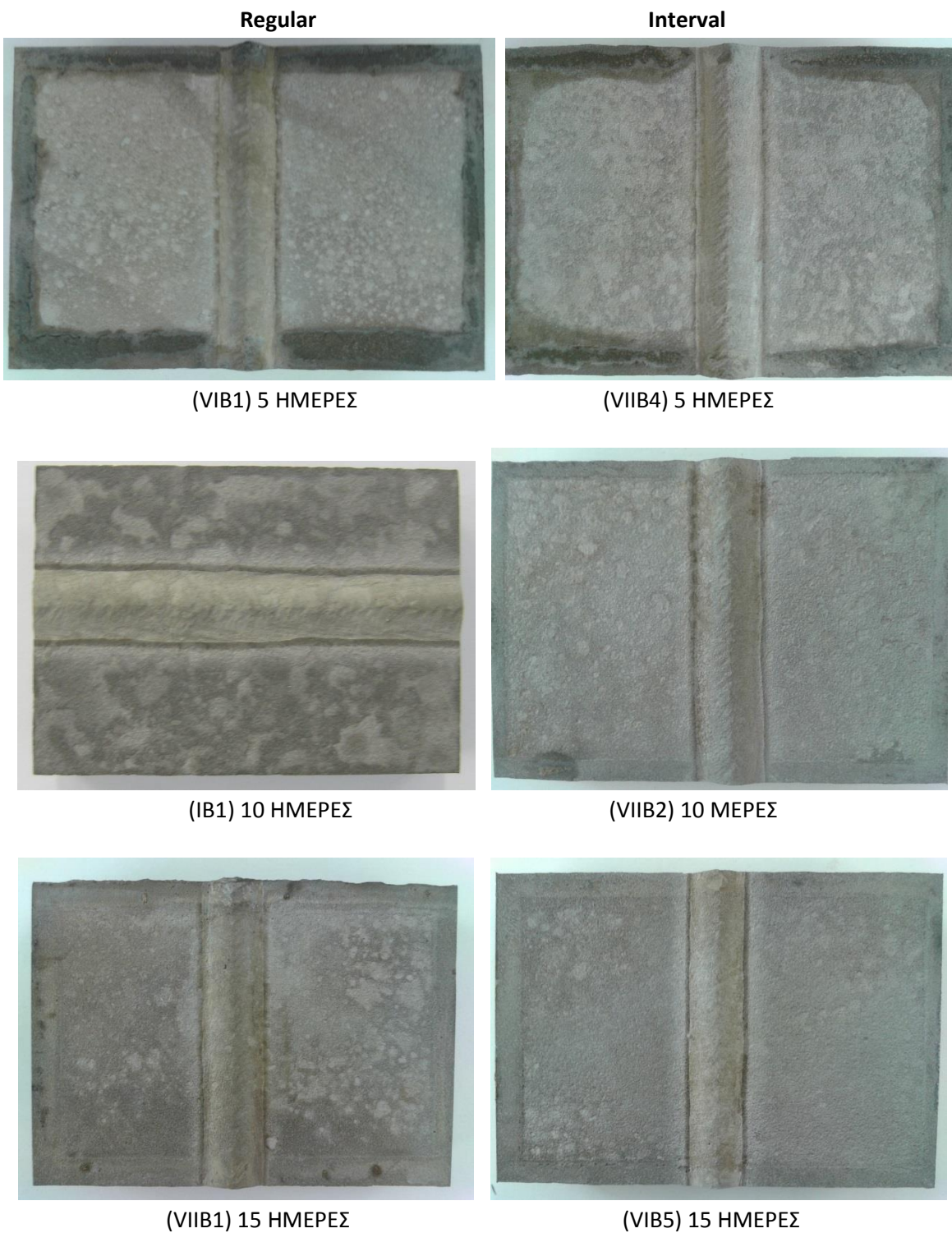


(XB4) 30 ΗΜΕΡΕΣ

Εικόνα 5.26 : Σύγκριση δοκιμίων (*regular* 30 ημερών) με συγκόλληση FCAW μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.



Δοκίμια με υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem



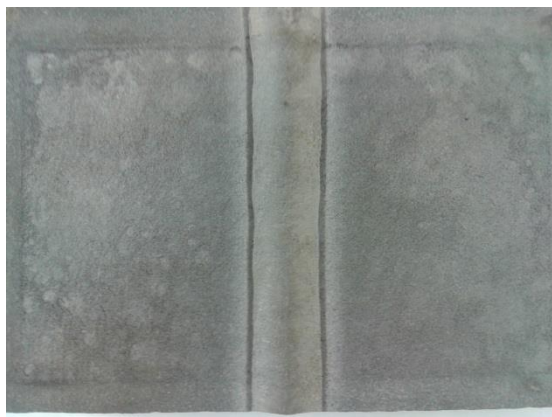
Εικόνα 5.27 : Σύγκριση δοκιμίων(regular – interval) με υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (5,10,15 ημερών) , μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.

**Regular**

**Interva**



(VII B5) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VI B2) 20 ΗΜΕΡΕΣ



(VI B3) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(VII B3) 25 ΗΜΕΡΕΣ



(VI B4) 30 ΗΜΕΡΕΣ

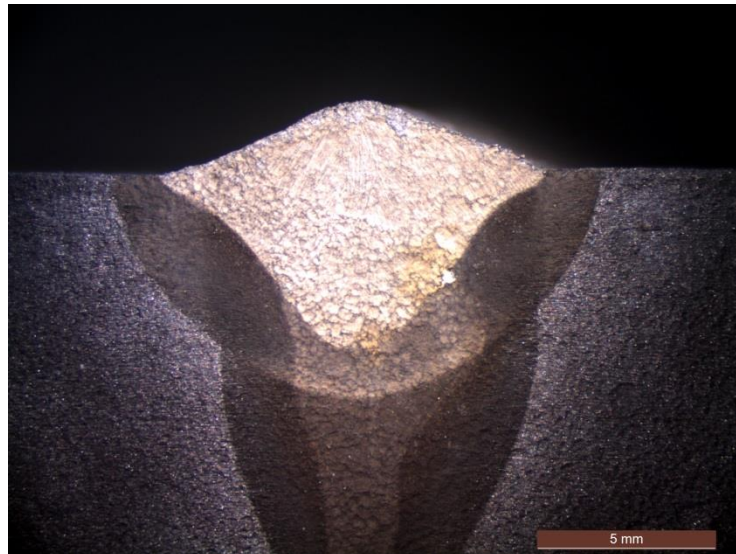


(III B2) 30 ΗΜΕΡΕΣ

*Εικόνα 5.28 : Σύγκριση δοκιμίων(regular – interval) με υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης (20,25,30 ημερών) , μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης. Τα δοκίμια 30 ημερών είναι όλα regular.*

Από την παρατήρηση των δοκιμών προκύπτει , εκ πρώτης όψεως , ότι το φαινόμενο εξελίσσεται στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τρόπο ανάλογο με εκείνο των δοκιμών χωρίς συγκόλληση. Ειδικότερα , μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις :

- Στα δοκίμια που έχουν παραμείνει στο θάλαμο για μεγάλους χρόνους , παρατηρείται η εμφάνιση μεγάλων κρατήρων και κοιλοτήτων τόσο στο μέταλλο συγκόλλησης όσο και στο μέταλλο βάσης του δοκιμίου.
- Στα δοκίμια με συγκόλληση τόξου παρατηρείται μια πιο ομοιόμορφη κατανομή των κρατήρων στο μέταλλο συγκόλλησης σε σχέση με το μέταλλο βάσης του δοκιμίου.
- Στα δοκίμια με συγκόλληση τόξου που παρέμειναν στο θάλαμο για 15 και 20 ημέρες , καθώς και για το αντίστοιχο δοκίμιο interval που παρέμεινε στο θάλαμο για 25 ημέρες , φαίνεται να έχει προσβληθεί η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη της συγκόλλησης (διακρίνεται εύκολα με πιο σκούρο χρώμα σε σχέση με το υπόλοιπο δοκίμιο).
- Η προηγούμενη παρατήρηση ισχύει για όλα τα δοκίμια με υβριδική συγκόλληση. Στα δοκίμια που παρέμειναν στο θάλαμο για μικρούς χρόνους δεν έχει τόσο έντονο χρώμα , ωστόσο αυτό αλλάζει για χρόνους 15 έως 30 ημερών (εικόνα 5.29).
- Δεν μπορεί να γίνει κατανοητή με αυτόν τον τρόπο η αλληλεπίδραση του μετάλλου συγκόλλησης και του μετάλλου βάσης στη συμπεριφορά του δοκιμίου στη διάβρωση. Παρότι , με την εξέλιξη του πειράματος , κρατήρες παρατηρούνται και στο μέταλλο συγκόλλησης και στο μέταλλο βάσης δεν είναι σαφές που συμβαίνει η έναρξη του φαινομένου , με ποιο ρυθμό εξελίσσεται σε κάθε μια από τις προαναφερθείσες περιοχές και τελικά που αναμένεται η μεγαλύτερη διάβρωση.



Εικόνα 5.29 : Τομή συγκόλλησης δοκιμίου με υβριδική συγκόλληση (20 ημέρες , interval) μετά την απομάκρυνση των προϊόντων διάβρωσης.



## 5.4.2 Μετρήσεις απώλειας βάρους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων απώλειας βάρους , όπως αυτές περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.7. Τα δοκίμια που τοποθετήθηκαν στο θάλαμο αλατονέφωσης ήταν συνολικά 108 :

- 37 δοκίμια με συγκόλληση (12 με συγκόλληση τύπου FCAW και 25 με υβριδική συγκόλληση laser-MAG+Tandem)
- 71 δοκίμια μετάλλου βάσης

Παρατίθενται στη συνέχεια εκ νέου οι πίνακες 4.12 , 4.13 , 4.14 για την αρτιότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 4.12: Πρόγραμμα τοποθέτησης δοκιμών στο θάλαμο , Hybrid Laser – MAG+Tandem (50x70mm).

| Χρόνος t<br>παραμονής στο<br>θάλαμο (days) | <u>Δοκίμια</u>    |          |                         |              |
|--|-------------------|----------|-------------------------|--------------|
|  | <u>Weld.</u>      |          | <u>Parent metal</u>     |              |
|  | regular           | interval | regular                 | interval     |
| 5  | IVB2              | IB3      | IIIA3 , VC1             | IC1 , IVC2   |
| 10   | IB1               | IIB2     | IIC3 , IA3              | IIC2 , IVA2  |
| 15   | IIB1              | VB2      | IC3 , IVA1              | IIIC2 , VA2  |
| 20   | IIIB1             | IIB3     | IC2 , IIA2              | IIIC1 , IIA1 |
| 25   | IVB3              | IIB4     | VC2 , IIC1              | IA2 , IVC3   |
| 30   | IB2 , IIIB2 , VB1 |          | IA1 , IIA3 , IVC1 , VA1 |              |

Πίνακας 4.13 : Πρόγραμμα τοποθέτησης δοκιμών στο θάλαμο , Hybrid Laser – MAG+Tandem (100x70mm).

| Χρόνος t<br>παραμονής στο<br>θάλαμο (days) | <u>Δοκίμια</u> |          |                     |              |
|--|----------------|----------|---------------------|--------------|
|  | <u>Weld.</u>   |          | <u>Parent metal</u> |              |
|  | regular        | interval | regular             | interval     |
| 5  | VIB1           | VIB4     | VIC4 , VIIA5        | VIA2 , VIIC6 |
| 10   | VIB6           | IIB2     | VIA5 , VIIA4        | VIC3 , VIIC5 |
| 15   | VIIB1          | VB2      | VIC1 , VIIC2        | VIA6 , VIIA1 |
| 20   | VIIB5          | IIB3     | VIC5 , VIIA6        | VIA4 , VIIC3 |
| 25   | VIB3           | IIB4     | VIC6 , VIIC4        | VIA1 , VIIA2 |
| 30   | VIB4 , VIIB6   |          | VIA3 , VIC2 , VIIC1 |              |

Πίνακας 4.14 : Πρόγραμμα τοποθέτησης δοκιμών στο θάλαμο , FCAW (100x70mm).

| Χρόνος t<br>παραμονής στο<br>θάλαμο (days) | <u>Δοκίμια</u> |          |                           |                |
|--|----------------|----------|---------------------------|----------------|
|  | <u>Weld.</u>   |          | <u>Parent metal</u>       |                |
|  | regular        | interval | regular                   | interval       |
| 5  | VIIIB3         | XB3      | VIIIA2 , IXC4             | IXA1 , XC1     |
| 10   | IXB4           | IXB2     | IXA1 , XA2                | VIIIA1 , VIIC2 |
| 15   | IXB1           | VIIIB4   | VIIC3 , XC4               | IXC3 , XC2     |
| 20   | XB2            | VIIIB2   | VIIC1 , IXC2              | VIIC4 , IXC1   |
| 25   | VIIIB1         | XB1      | VIIIA4 , XA3              | IXA4 , XA4     |
| 30   | IXB3 , XB4     |          | VIIIA3 , IXA2 , XA1 , XC3 |                |

Στους παραπάνω πίνακες , όπως έχει προαναφερθεί στην παράγραφο 4.7 , με **κόκκινο** φαίνονται τα interval δοκίμια (αυτά που παρεμβάλλονται κατά τη διάρκεια του πειράματος) , με μαύρο τα regular που παραμένουν στο θάλαμο για 5,10,15,20,25 ημέρες και με **πράσινο** τα regular που παραμένουν στο θάλαμο όλο το χρονικό διάστημα (30 ημέρες.) Η τοποθέτηση των δοκιμών μέσα στο θάλαμο έγινε έτσι ώστε διαφορετικά δοκίμια να παραμένουν για τον ίδιο χρόνο μέσα στο θάλαμο για διαφορετικές χρονικές στιγμές του συνολικού πειράματος (βλ. παρ. 4.7.5). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελεγχθεί η διαβρωτικότητα του θαλάμου και του κράματος, καθώς επίσης και να υπάρχει επαναληψιμότητα στα αποτελέσματα (πίνακες 4.12 , 4.13 , 4.14). Σημειώνεται ότι τα δοκίμια που θα παρέμεναν στο θάλαμο για την ίδια χρονική διάρκεια, τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές θέσεις πάνω στις ράγες (βλ. παρ. 4.7 , πίνακες 4.15 , 4.16).

Οι πειραματικές μετρήσεις , όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.7.6 , έδωσαν αποτελέσματα σχετικά με την απώλεια βάρους των δοκιμών. από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών και το βάθος της διάβρωσης.

Ειδικότερα , σύμφωνα με το ASTM G31-72 , ο **ρυθμός διάβρωσης** προκύπτει από τον εξής τύπο :

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

Όπου :

K : σταθερά (ανάλογα με τη μονάδα μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης) , ίση με  $8.76 \times 10^4$  για υπολογισμό σε mm/year

W : η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A : η επιφάνεια έκθεσης ( $\text{cm}^2$ ) (με ακρίβεια  $0.01\text{cm}^2$ ). Η επιφάνεια έκθεσης υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο, θεωρώντας το παραλληλόγραμμο με πλευρές ίσες με το μέσο όρο των δύο πλευρών. Για κάθε συγκολλημένο δοκίμιο μετρήθηκε , μέσω επεξεργασίας εικόνων από το στερεοσκόπιο , το μήκος του τόξου της συγκόλλησης και για το εμβαδό αθροίστηκαν τα εμβαδά της επιφάνειας της ζώνης τήξης (ραφή) και του υπόλοιπου δοκιμίου (ΘΕΖ και ΜΒ).

T : χρόνος έκθεσης σε ώρες

D : πυκνότητα του χάλυβα (ίση με  $7.86 \text{ g/cm}^3$ )

Σύμφωνα με το ISO 14993 μπορεί να υπολογισθεί το **βάθος της διάβρωσης** σε συνάρτηση με τη μεταβολή της μάζας. Δηλαδή :

$$\text{Βάθος διάβρωσης} = \frac{W}{A \times D}$$

W : η απώλεια μάζας (g) με ακρίβεια χιλιοστού του g

A : η επιφάνεια έκθεσης ( $\text{cm}^2$ ) (με ακρίβεια  $0.01\text{cm}^2$ ), όπως ανωτέρω

D : πυκνότητα του χάλυβα ( $\text{g/cm}^3$ )  $\approx 7,86 \text{ g/cm}^3$



Στους πίνακες 5.2 , 5.3 , 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δοκίμια με συγκόλληση και στους πίνακες 5.5 , 5.6 , 5.7 τα αποτελέσματα για τα δοκίμια μετάλλου βάσης. Σε κάθε πίνακα παρουσιάζεται το αρχικό βάρος των δοκιμών , το τελικό βάρος τους , η απώλεια βάρους σε (g) και σε % ποσοστό , ο χρόνος έκθεσης σε ώρες , κύκλους και ημέρες , η εκτεθειμένη επιφάνεια , το βάθος διάβρωσης και τέλος ο ρυθμός διάβρωσης κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 5.2 : Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης για δοκίμια με υβριδική συγκόλληση.

| α/α | Δοκίμιο | Τύπος | Αρχικό βάρος (g) | Τελικό βάρος (g) | Διαφορά (g) | Χρόνος έκθεσης (hrs) | Κύκλοι | Ημέρες | A (cm <sup>2</sup> ) | Βάθος διάβρωσης (μm) | Ρυθμός διάβρωσης (mm/year) | Διαφορά % |
|-----|---------|-------|------------------|------------------|-------------|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| 1   | IVB2    | r     | 504,442          | 501,973          | 2,469       | 119                  | 15     | 5      | 70,092               | 44,815               | 3,299                      | 0,489     |
| 2   | IB3     | i     | 503,588          | 502,019          | 1,569       | 120                  | 15     | 5      | 25,743               | 77,544               | 5,661                      | 0,312     |
| 3   | IB1     | r     | 504,466          | 498,396          | 6,07        | 233                  | 29     | 10     | 70,238               | 109,950              | 4,134                      | 1,203     |
| 4   | IIB2    | i     | 502,104          | 499,17           | 2,934       | 238                  | 30     | 10     | 26,034               | 143,383              | 5,277                      | 0,584     |
| 5   | IIB1    | r     | 502,898          | 494,985          | 7,913       | 331                  | 41     | 14     | 69,507               | 144,840              | 3,833                      | 1,573     |
| 6   | VB2     | i     | 510,352          | 504,69           | 5,662       | 359                  | 45     | 15     | 34,344               | 209,747              | 5,118                      | 1,109     |
| 7   | IIIB1   | r     | 504,52           | 493,276          | 11,244      | 452                  | 57     | 19     | 70,120               | 204,014              | 3,954                      | 2,229     |
| 8   | IIB3    | i     | 501,869          | 490,655          | 11,214      | 457                  | 57     | 19     | 69,117               | 206,420              | 3,957                      | 2,234     |
| 9   | IVB3    | r     | 506,709          | 491,347          | 15,362      | 570                  | 71     | 24     | 69,615               | 280,753              | 4,315                      | 3,032     |
| 10  | IIB4    | i     | 500,985          | 488,445          | 12,54       | 572                  | 72     | 24     | 68,344               | 233,438              | 3,575                      | 2,503     |
| 11  | IB2     | r     | 506,24           | 490,381          | 15,859      | 691                  | 86     | 29     | 69,456               | 290,498              | 3,683                      | 3,133     |
| 12  | VB1     | r     | 510,925          | 498,055          | 12,87       | 691                  | 86     | 29     | 69,501               | 235,595              | 2,987                      | 2,519     |
| 13  | IIIB2   | r     | 509,073          | 492,008          | 17,065      | 691                  | 86     | 29     | 69,275               | 313,407              | 3,973                      | 3,352     |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Πίνακας 5.3 : Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης για δοκίμια με υβριδική συγκόλληση.

| α/α | Δοκίμιο | Τύπος | Αρχικό βάρος (g) | Τελικό βάρος (g) | Διαφορά (g) | Χρόνος έκθεσης (hrs) | Κύκλοι | Ημέρες | A (cm <sup>2</sup> ) | Βάθος διάβρωσης (μm) | Ρυθμός διάβρωσης (mm/year) | Διαφορά % |
|-----|---------|-------|------------------|------------------|-------------|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| 1   | VIB1    | r     | 962              | 960              | 2           | 116                  | 15     | 5      | 48,603               | 52,353               | 3,954                      | 0,208     |
| 2   | VIIIB4  | i     | 962              | 959              | 3           | 104                  | 13     | 4      | 52,439               | 72,785               | 6,131                      | 0,312     |
| 3   | VIB6    | r     | 723              | 721              | 2           | 229                  | 29     | 10     | 29,538               | 86,144               | 3,295                      | 0,277     |
| 4   | VIIIB2  | i     | 951              | 945              | 6           | 213                  | 27     | 9      | 54,367               | 140,407              | 5,774                      | 0,631     |
| 5   | VIIIB1  | r     | 966              | 959              | 7           | 326                  | 41     | 14     | 47,975               | 185,635              | 4,988                      | 0,725     |
| 6   | VIB5    | i     | 982              | 973              | 9           | 365                  | 46     | 15     | 51,624               | 221,804              | 5,323                      | 0,916     |
| 7   | VIIIB5  | r     | 962              | 954              | 8           | 478                  | 60     | 20     | 43,133               | 235,973              | 4,325                      | 0,832     |
| 8   | VIB2    | i     | 973              | 964              | 9           | 462                  | 58     | 19     | 49,502               | 231,312              | 4,386                      | 0,925     |
| 9   | VIB3    | r     | 978              | 966              | 12          | 587                  | 73     | 24     | 49,325               | 309,520              | 4,619                      | 1,227     |
| 10  | VIIIB3  | i     | 969              | 959              | 10          | 575                  | 72     | 24     | 46,706               | 272,398              | 4,150                      | 1,032     |
| 11  | VIB4    | r     | 967              | 954              | 13          | 691                  | 86     | 29     | 44,577               | 371,028              | 4,704                      | 1,344     |
| 12  | VIIIB6  | r     | 677              | 667              | 10          | 691                  | 86     | 29     | 33,405               | 380,865              | 4,828                      | 1,477     |

Πίνακας 5.4 : Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης για δοκίμια με συγκόλληση FCAW.

| α/α | Δοκίμιο | Τύπος | Αρχικό βάρος (g) | Τελικό βάρος (g) | Διαφορά (g) | Χρόνος έκθεσης (hrs) | Κύκλοι | Ημέρες | A (cm <sup>2</sup> ) | Βάθος διάβρωσης (μm) | Ρυθμός διάβρωσης (mm/year) | Διαφορά % |
|-----|---------|-------|------------------|------------------|-------------|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| 1   | VIIIB3  | r     | 704              | 702              | 2           | 116                  | 15     | 5      | 50,887               | 50,004               | 3,776                      | 0,284     |
| 2   | XB3     | i     | 688              | 685              | 3           | 104                  | 13     | 4      | 59,450               | 64,202               | 5,408                      | 0,436     |
| 3   | IXB4    | r     | 688              | 684              | 4           | 229                  | 29     | 10     | 56,511               | 90,054               | 3,445                      | 0,581     |
| 4   | IXB2    | i     | 694              | 689              | 5           | 213                  | 27     | 9      | 54,696               | 116,303              | 4,783                      | 0,720     |
| 5   | IXB1    | r     | 683              | 678              | 5           | 326                  | 41     | 14     | 49,332               | 128,950              | 3,465                      | 0,732     |
| 6   | VIIIB4  | i     | 689              | 682              | 7           | 365                  | 46     | 15     | 52,122               | 170,866              | 4,101                      | 1,016     |
| 7   | XB2     | r     | 679              | 672              | 7           | 478                  | 60     | 20     | 46,010               | 193,562              | 3,547                      | 1,031     |
| 8   | VIIIB2  | i     | 684              | 675              | 9           | 462                  | 58     | 19     | 51,090               | 224,122              | 4,250                      | 1,316     |
| 9   | VIIIB1  | r     | 705              | 696              | 9           | 587                  | 73     | 24     | 45,396               | 252,234              | 3,764                      | 1,277     |
| 10  | XB1     | i     | 675              | 664              | 11          | 575                  | 72     | 24     | 50,528               | 276,975              | 4,220                      | 1,630     |
| 11  | IXB3    | r     | 685              | 674              | 11          | 691                  | 86     | 29     | 48,457               | 288,811              | 3,661                      | 1,606     |
| 12  | XB4     | r     | 666              | 656              | 10          | 691                  | 86     | 29     | 45,541               | 279,364              | 3,542                      | 1,502     |

Πίνακας 5.5 : Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης για δοκίμια μετάλλου βάσης.

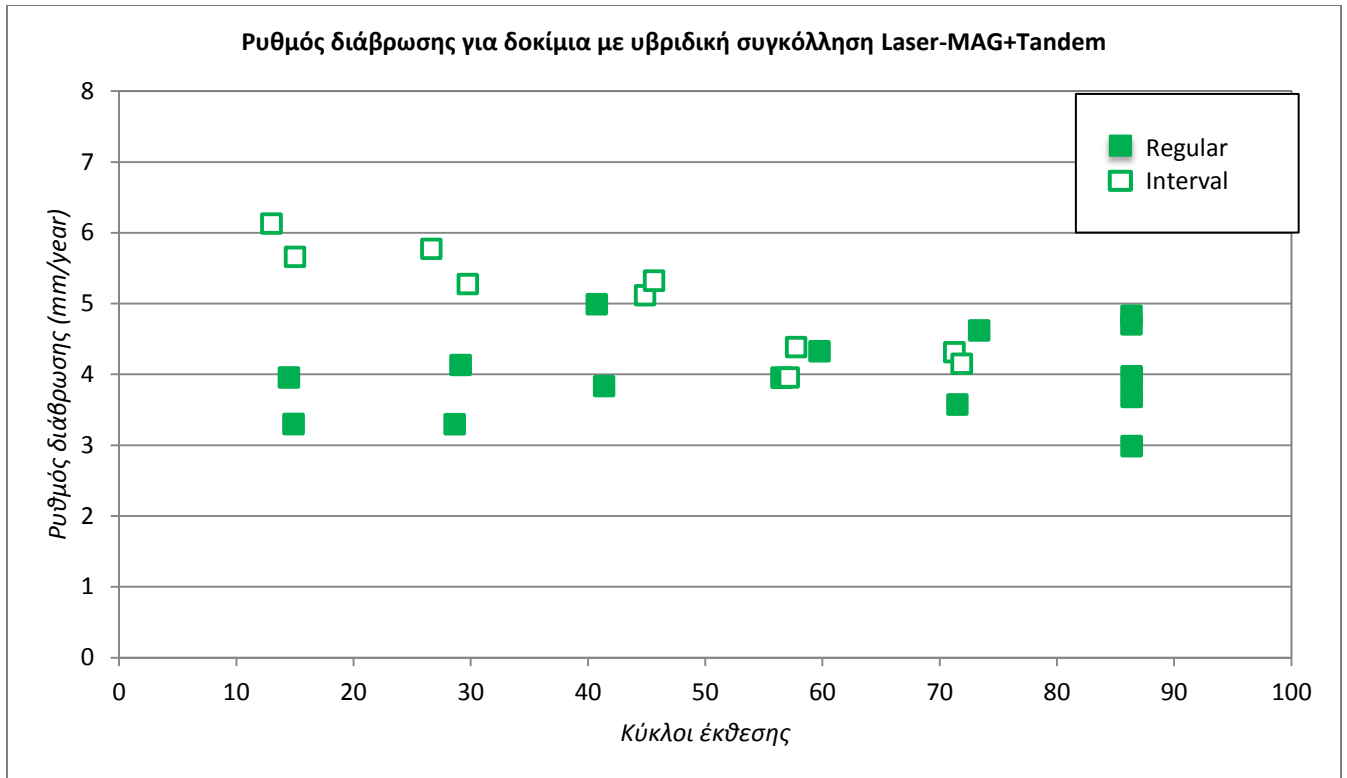
| α/α | Δοκίμιο | Τύπος | Αρχικό βάρος (g) | Τελικό βάρος (g) | Διαφορά (g) | Χρόνος έκθεσης (hrs) | Κύκλοι | Ημέρες | A (cm <sup>2</sup> ) | Βάθος διάβρωσης (μm) | Ρυθμός διάβρωσης (mm/year) | Διαφορά % |
|-----|---------|-------|------------------|------------------|-------------|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| 1   | IIIA3   | r     | 484,18           | 481,95           | 2,23        | 119                  | 15     | 5      | 66,769               | 42,492               | 3,128                      | 0,461     |
| 2   | VC1     | r     | 511,622          | 509,66           | 1,962       | 119                  | 15     | 5      | 70,041               | 35,639               | 2,624                      | 0,383     |
| 3   | IC1     | i     | 484,234          | 482,903          | 1,331       | 120                  | 15     | 5      | 26,076               | 64,940               | 4,741                      | 0,275     |
| 4   | IVC2    | i     | 484,466          | 482,858          | 1,608       | 120                  | 15     | 5      | 26,660               | 76,737               | 5,602                      | 0,332     |
| 5   | IA2     | r     | 486,804          | 480,942          | 5,862       | 233                  | 29     | 10     | 67,410               | 110,637              | 4,160                      | 1,204     |
| 6   | IIC3    | r     | 481,637          | 475,919          | 5,718       | 233                  | 29     | 10     | 66,163               | 109,952              | 4,134                      | 1,187     |
| 7   | IIC2    | i     | 483,946          | 481,118          | 2,828       | 238                  | 30     | 10     | 25,707               | 139,960              | 5,151                      | 0,584     |
| 8   | IVA2    | i     | 502,209          | 498,655          | 3,554       | 238                  | 30     | 10     | 28,659               | 157,774              | 5,807                      | 0,708     |
| 9   | IC3     | r     | 487,72           | 480,566          | 7,154       | 331                  | 41     | 14     | 66,301               | 137,279              | 3,633                      | 1,467     |
| 10  | IVA1    | r     | 487,596          | 479,416          | 8,18        | 331                  | 41     | 14     | 65,808               | 158,144              | 4,185                      | 1,678     |
| 11  | IIIC2   | i     | 502,684          | 497,496          | 5,188       | 359                  | 45     | 15     | 35,527               | 185,790              | 4,533                      | 1,032     |
| 12  | VA2     | i     | 495,753          | 490,525          | 5,228       | 359                  | 45     | 15     | 34,538               | 192,584              | 4,699                      | 1,055     |
| 13  | IC2     | r     | 484,89           | 474,288          | 10,602      | 452                  | 57     | 19     | 67,952               | 198,500              | 3,847                      | 2,186     |
| 14  | IIA2    | r     | 499,621          | 487,46           | 12,161      | 452                  | 57     | 19     | 69,885               | 221,391              | 4,291                      | 2,434     |
| 15  | IIA1    | i     | 486,502          | 475,144          | 11,358      | 457                  | 57     | 19     | 68,225               | 211,805              | 4,060                      | 2,335     |
| 16  | IIIC1   | i     | 485,556          | 473,785          | 11,771      | 457                  | 57     | 19     | 68,124               | 219,831              | 4,214                      | 2,424     |
| 17  | IIC1    | r     | 482,707          | 467,91           | 14,797      | 570                  | 71     | 24     | 67,592               | 278,519              | 4,280                      | 3,065     |
| 18  | VC2     | r     | 497,529          | 484,59           | 12,939      | 570                  | 71     | 24     | 68,992               | 238,606              | 3,667                      | 2,601     |
| 19  | IA3     | i     | 483,538          | 470,855          | 12,683      | 572                  | 72     | 24     | 66,401               | 243,011              | 3,722                      | 2,623     |
| 20  | IVC3    | i     | 493,456          | 479,097          | 14,359      | 572                  | 72     | 24     | 67,789               | 269,488              | 4,127                      | 2,910     |
| 21  | IA1     | r     | 485,458          | 469,617          | 15,841      | 691                  | 86     | 29     | 68,435               | 294,496              | 3,733                      | 3,263     |
| 22  | IIA3    | r     | 483,237          | 469,275          | 13,962      | 691                  | 86     | 29     | 67,981               | 261,298              | 3,313                      | 2,889     |
| 23  | IVC1    | r     | 482,162          | 467,463          | 14,699      | 691                  | 86     | 29     | 67,768               | 275,957              | 3,498                      | 3,049     |
| 24  | VA1     | r     | 489,703          | 477,12           | 12,583      | 691                  | 86     | 29     | 68,038               | 235,293              | 2,983                      | 2,570     |

Πίνακας 5.6 : Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης για δοκίμια μετάλλου βάσης.

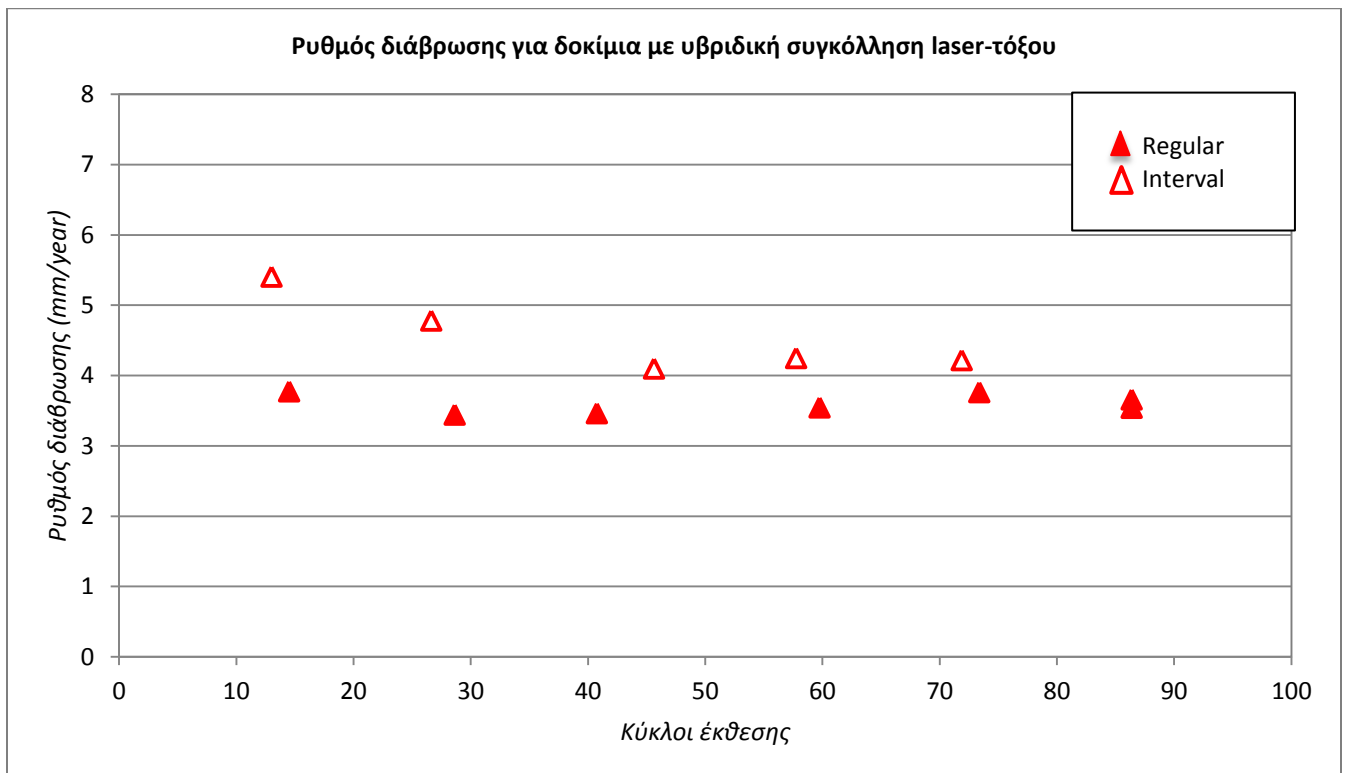
| α/α | Δοκίμιο | Τύπος | Αρχικό βάρος (g) | Τελικό βάρος (g) | Διαφορά (g) | Χρόνος έκθεσης (hrs) | Κύκλοι | Ημέρες | A (cm <sup>2</sup> ) | Βάθος διάβρωσης (μm) | Ρυθμός διάβρωσης (mm/year) | Διαφορά % |
|-----|---------|-------|------------------|------------------|-------------|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| 1   | VIC4    | r     | 932              | 930              | 2           | 116                  | 15     | 5      | 47,312               | 53,782               | 4,061                      | 0,215     |
| 2   | VIIA5   | r     | 943              | 941              | 2           | 116                  | 15     | 5      | 47,259               | 53,842               | 4,066                      | 0,212     |
| 3   | VIA2    | i     | 938              | 935              | 3           | 104                  | 13     | 4      | 52,507               | 72,691               | 6,123                      | 0,320     |
| 4   | VIIC6   | i     | 669              | 667              | 2           | 104                  | 13     | 4      | 36,935               | 68,892               | 5,803                      | 0,299     |
| 5   | VIA5    | r     | 943              | 939              | 4           | 229                  | 29     | 10     | 43,221               | 117,744              | 4,504                      | 0,424     |
| 6   | VIIA4   | r     | 941              | 937              | 4           | 229                  | 29     | 10     | 43,945               | 115,805              | 4,430                      | 0,425     |
| 7   | VIC3    | i     | 938              | 932              | 6           | 213                  | 27     | 9      | 53,341               | 143,110              | 5,886                      | 0,640     |
| 8   | VIIC5   | i     | 924              | 918              | 6           | 213                  | 27     | 9      | 50,581               | 150,919              | 6,207                      | 0,649     |
| 9   | VIC1    | r     | 949              | 943              | 6           | 326                  | 41     | 14     | 46,453               | 164,331              | 4,416                      | 0,632     |
| 10  | VIIC2   | r     | 938              | 933              | 5           | 326                  | 41     | 14     | 44,289               | 143,632              | 3,860                      | 0,533     |
| 11  | VIA6    | i     | 725              | 719              | 6           | 365                  | 46     | 15     | 39,130               | 195,083              | 4,682                      | 0,828     |
| 12  | VIIA1   | i     | 962              | 954              | 8           | 365                  | 46     | 15     | 50,740               | 200,594              | 4,814                      | 0,832     |
| 13  | VIC5    | r     | 936              | 929              | 7           | 478                  | 60     | 20     | 44,686               | 199,300              | 3,652                      | 0,748     |
| 14  | VIIA6   | r     | 655              | 650              | 5           | 478                  | 60     | 20     | 30,762               | 206,795              | 3,790                      | 0,763     |
| 15  | VIA4    | i     | 942              | 933              | 9           | 462                  | 58     | 19     | 49,548               | 231,098              | 4,382                      | 0,955     |
| 16  | VIIC3   | i     | 938              | 930              | 8           | 462                  | 58     | 19     | 48,357               | 210,479              | 3,991                      | 0,853     |
| 17  | VIC6    | r     | 715              | 707              | 8           | 587                  | 73     | 24     | 36,749               | 276,965              | 4,133                      | 1,119     |
| 18  | VIIC4   | r     | 930              | 922              | 8           | 587                  | 73     | 24     | 46,750               | 217,714              | 3,249                      | 0,860     |
| 19  | VIA1    | i     | 956              | 946              | 10          | 575                  | 72     | 24     | 48,720               | 261,138              | 3,978                      | 1,046     |
| 20  | VIIA2   | i     | 920              | 910              | 10          | 575                  | 72     | 24     | 47,688               | 266,791              | 4,065                      | 1,087     |
| 21  | VIA3    | r     | 939              | 930              | 9           | 691                  | 86     | 29     | 45,900               | 249,464              | 3,163                      | 0,958     |
| 22  | VIC2    | r     | 933              | 922              | 11          | 691                  | 86     | 29     | 46,999               | 297,770              | 3,775                      | 1,179     |
| 23  | VIIC1   | r     | 950              | 938              | 12          | 691                  | 86     | 29     | 46,861               | 325,796              | 4,130                      | 1,263     |

Πίνακας 5.7 : Αποτελέσματα δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης για δοκίμια μετάλλου βάσης.

| α/α | Δοκίμιο | Τύπος | Αρχικό βάρος (g) | Τελικό βάρος (g) | Διαφορά (g) | Χρόνος έκθεσης (hrs) | Κύκλοι | Ημέρες | A (cm <sup>2</sup> ) | Βάθος διάβρωσης (μm) | Ρυθμός διάβρωσης (mm/year) | Διαφορά % |
|-----|---------|-------|------------------|------------------|-------------|----------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------------|-----------|
| 1   | VIIIA2  | r     | 662              | 660              | 2           | 116                  | 15     | 5      | 43,876               | 57,993               | 4,379                      | 0,302     |
| 2   | IXC4    | r     | 661              | 659              | 2           | 116                  | 15     | 5      | 46,385               | 54,857               | 4,143                      | 0,303     |
| 3   | IXA3    | i     | 656              | 653              | 3           | 104                  | 13     | 4      | 54,720               | 69,751               | 5,875                      | 0,457     |
| 4   | XC1     | i     | 659              | 656              | 3           | 104                  | 13     | 4      | 54,179               | 70,448               | 5,934                      | 0,455     |
| 5   | IXA1    | r     | 661              | 658              | 3           | 229                  | 29     | 10     | 42,657               | 89,477               | 3,423                      | 0,454     |
| 6   | XA2     | r     | 653              | 649              | 4           | 229                  | 29     | 10     | 43,510               | 116,963              | 4,474                      | 0,613     |
| 7   | VIIIA1  | i     | 677              | 671              | 6           | 213                  | 27     | 9      | 55,083               | 138,583              | 5,699                      | 0,886     |
| 8   | VIIIC2  | i     | 653              | 648              | 5           | 213                  | 27     | 9      | 52,629               | 120,872              | 4,971                      | 0,766     |
| 9   | VIIIC3  | r     | 678              | 672              | 6           | 326                  | 41     | 14     | 45,815               | 166,618              | 4,477                      | 0,885     |
| 10  | XC4     | r     | 652              | 647              | 5           | 326                  | 41     | 14     | 43,672               | 145,661              | 3,914                      | 0,767     |
| 11  | IXC3    | i     | 666              | 658              | 8           | 365                  | 46     | 15     | 54,000               | 188,484              | 4,524                      | 1,201     |
| 12  | XC2     | i     | 659              | 653              | 6           | 365                  | 46     | 15     | 52,936               | 144,203              | 3,461                      | 0,910     |
| 13  | VIIIC1  | r     | 673              | 666              | 7           | 478                  | 60     | 20     | 44,805               | 198,769              | 3,643                      | 1,040     |
| 14  | IXC2    | r     | 666              | 659              | 7           | 478                  | 60     | 20     | 45,209               | 196,994              | 3,610                      | 1,051     |
| 15  | VIIIC4  | i     | 668              | 659              | 9           | 462                  | 58     | 19     | 49,280               | 232,354              | 4,406                      | 1,347     |
| 16  | IXC1    | i     | 670              | 661              | 9           | 462                  | 58     | 19     | 47,624               | 240,436              | 4,559                      | 1,343     |
| 17  | VIIIA4  | r     | 667              | 658              | 9           | 587                  | 73     | 24     | 44,194               | 259,093              | 3,867                      | 1,349     |
| 18  | XA3     | r     | 658              | 649              | 9           | 587                  | 73     | 24     | 43,605               | 262,593              | 3,919                      | 1,368     |
| 19  | IXA4    | i     | 660              | 650              | 10          | 575                  | 72     | 24     | 50,750               | 250,691              | 3,819                      | 1,515     |
| 20  | XA4     | i     | 646              | 635              | 11          | 575                  | 72     | 24     | 50,649               | 276,312              | 4,210                      | 1,703     |
| 21  | VIIIA3  | r     | 666              | 656              | 10          | 691                  | 86     | 29     | 47,153               | 269,819              | 3,421                      | 1,502     |
| 22  | IXA2    | r     | 664              | 656              | 8           | 691                  | 86     | 29     | 45,837               | 222,050              | 2,815                      | 1,205     |
| 23  | XA1     | r     | 660              | 650              | 10          | 691                  | 86     | 29     | 46,050               | 276,281              | 3,502                      | 1,515     |
| 24  | XC3     | r     | 663              | 653              | 10          | 691                  | 86     | 29     | 47,233               | 269,357              | 3,415                      | 1,508     |

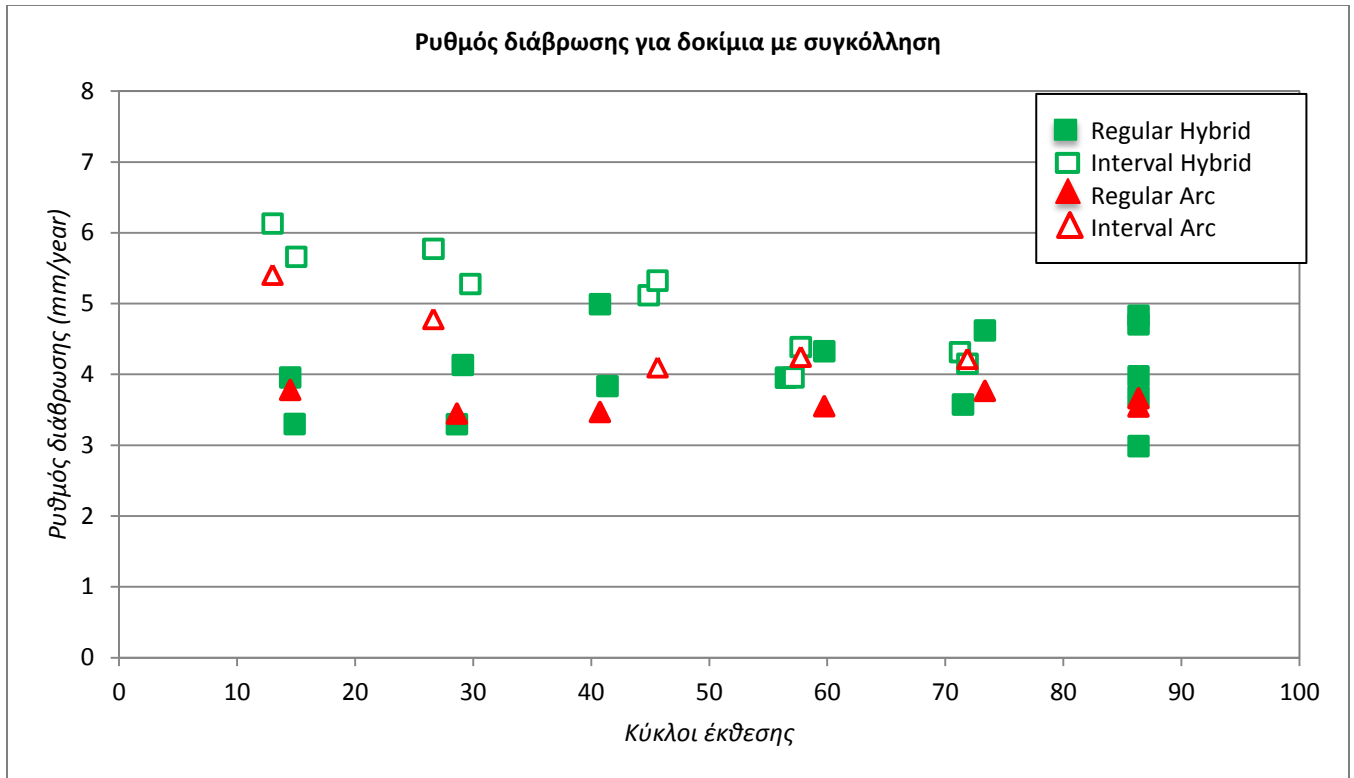


Σχήμα 5.4 : Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης για δοκίμια με υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem.

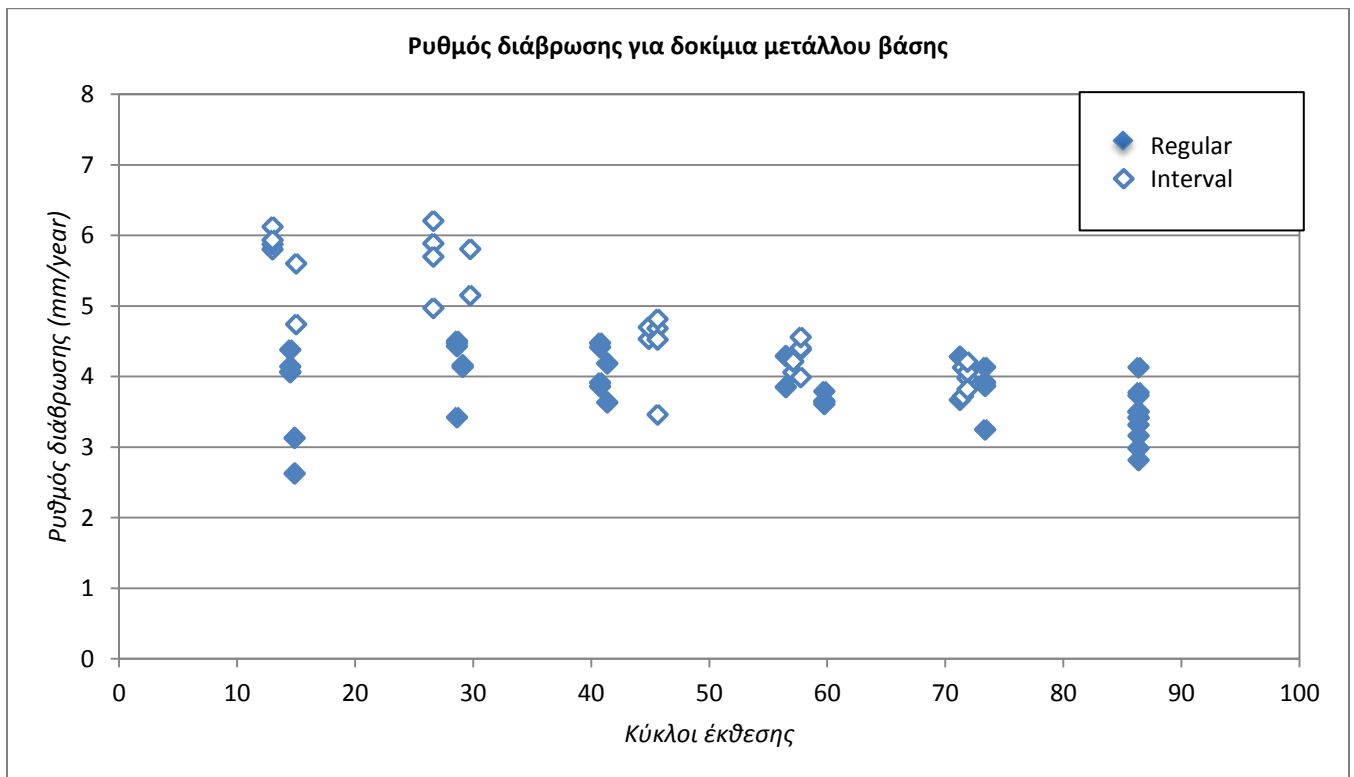


Σχήμα 5.5 : Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης για δοκίμια με συγκόλληση FCAW.

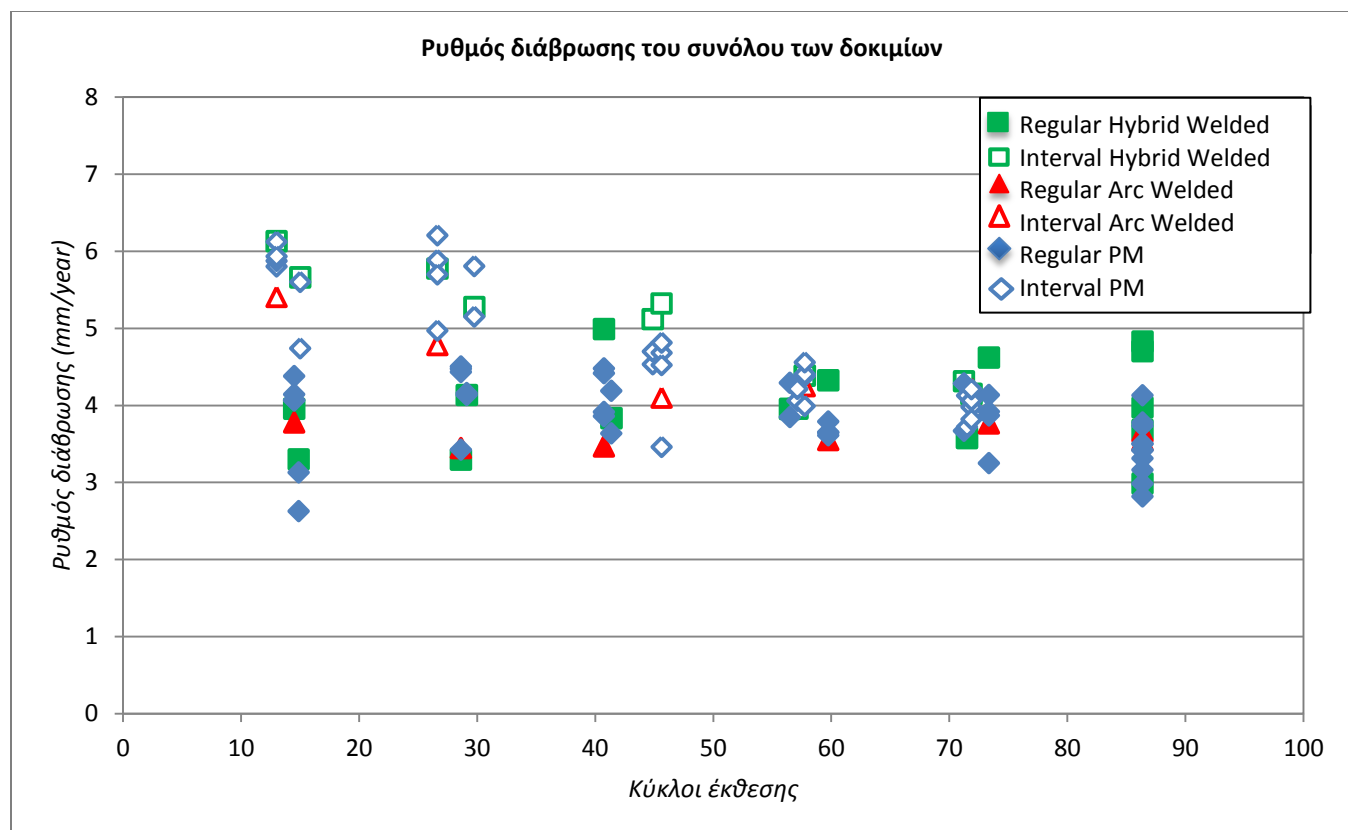




Σχήμα 5.6 : Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης για δοκίμια με συγκόλληση.



Σχήμα 5.7 : Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης για δοκίμια μετάλλου βάσης.

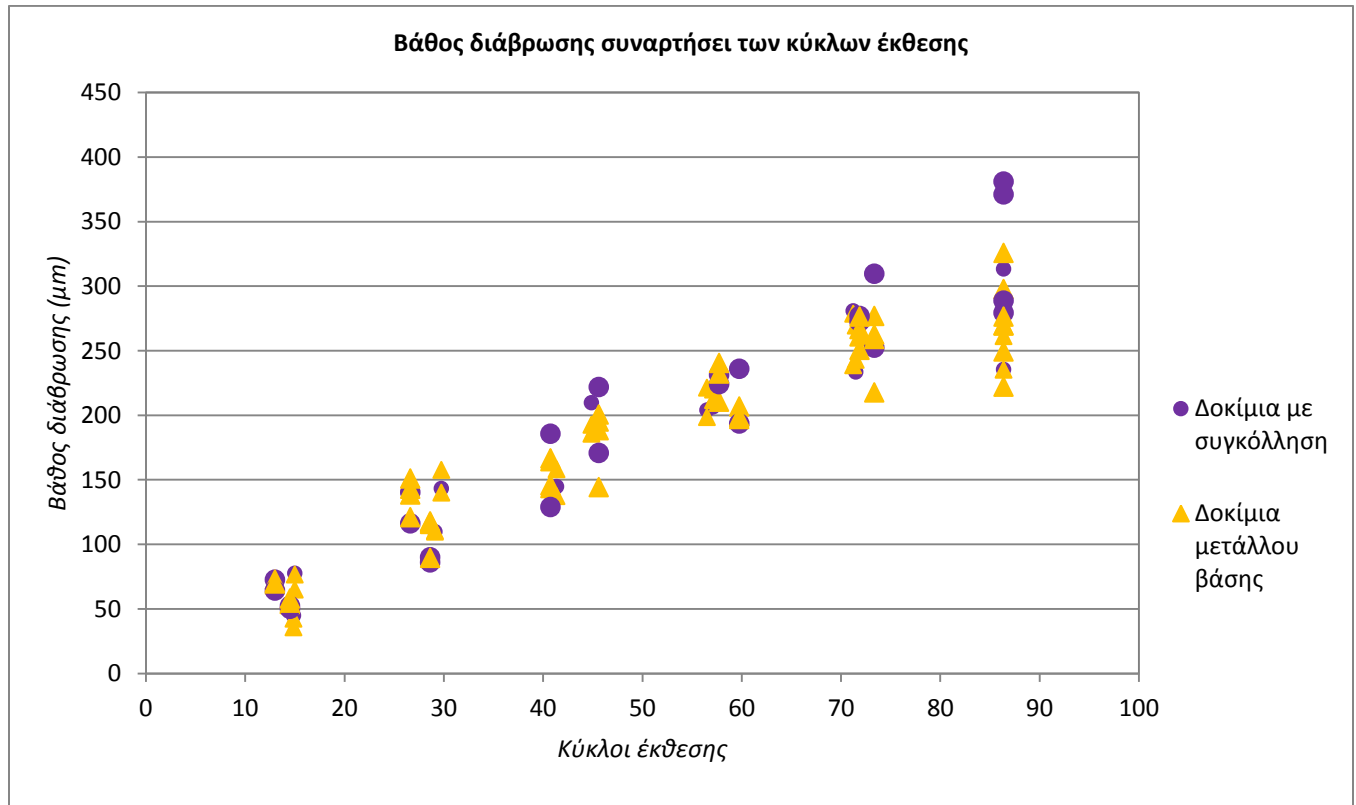


Σχήμα 5.8 : Μεταβολή του ρυθμού διάβρωσης του συνόλου των δοκιμών.

Από τους πίνακες 5.2 έως 5.7 και από τα διαγράμματα 5.4 έως 5.8 , προκύπτει ότι :

- Ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών γενικά κυμαίνεται μεταξύ 3-5 mm/year. Για δοκίμια interval με μικρούς χρόνους έκθεσης (έως 30 κύκλους) η τιμή ανέρχεται έως και 6 mm/year.
- Τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης εμφανίζουν τα interval δοκίμια με μικρούς χρόνους έκθεσης (10,30 κύκλοι έκθεσης).
- Τα δοκίμια που φέρουν υβριδικές συγκολλήσεις παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ρυθμούς διάβρωσης από τα δοκίμια που φέρουν απλές συγκολλήσεις τόξου. Τα δοκίμια που φέρουν υβριδικές συγκολλήσεις παρουσιάζουν μέσους ρυθμούς διάβρωσης της τάξης των **4.06±0.57 mm/year (regular)** και **4.94±0.82 mm/year (interval)**. Αντίστοιχα , τα δοκίμια που φέρουν συγκολλήσεις τόξου παρουσιάζουν μέσους ρυθμούς διάβρωσης της τάξης των **3.60±0.13 mm/year** και **4.55±0.49 mm/year** . Τέλος , οι μέσοι ρυθμοί διάβρωσης για τα δοκίμια μετάλλου βάσης είναι **3.78±0.47 mm/year** και **4.80±0.80 mm/year** .
- Για τα δοκίμια regular παρατηρείται αύξηση του ρυθμού διάβρωσης με την αύξηση των κύκλων έκθεσης.
- Αντίθετα , για τα δοκίμια interval ο ρυθμός διάβρωσης ξεκινά με υψηλές τιμές και στη συνέχεια μειώνεται.
- Με την αύξηση των κύκλων έκθεσης , οι τιμές του ρυθμού διάβρωσης των regular και interval δοκιμών δείχνουν να συγκλίνουν (δοκίμια που έχουν εκτεθεί στο θάλαμο για 60-70 κύκλους).

Από τους πίνακες 5.2 έως 5.7 και το διάγραμμα του σχήματος 5.9 προκύπτει ότι το υπολογιζόμενο βάθος διάβρωσης των δοκιμίων αυξάνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων στο θάλαμο. Για τα δοκίμια με συγκόλληση η τιμή του για περίπου 30 ημέρες έκθεσης ανέρχεται στην τιμή των 380μm.



Σχήμα 5.9 : Βάθος διάβρωσης συναρτήσει των κύκλων έκθεσης.

Από τη σύγκριση των ρυθμών διάβρωσης του συνόλου των δοκιμίων προκύπτει ότι :

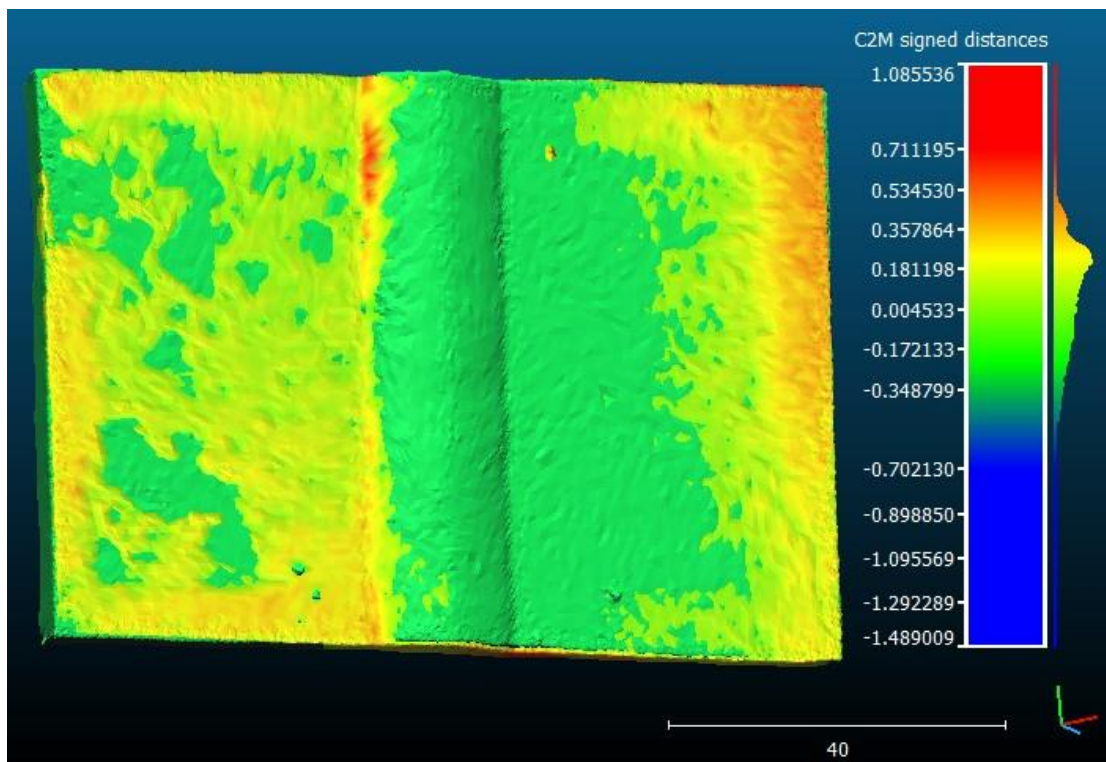
- Ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων που τοποθετήθηκαν στο θάλαμο κατά το πρόγραμμα (r,regular) είναι μικρότερος από εκείνα που τοποθετήθηκαν στη συνέχεια (i,interval), για το ίδιο χρονικό διάστημα. Αυτό παρατηρείται μάλιστα για τα μικρά χρονικά διαστήματα 5, 10 ημέρες και η διαφορά αυτή βαίνει φθίνουσα έως τις 30 ημέρες έκθεσης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται τα δοκίμια, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.
- Ο ρυθμός διάβρωσης του δοκιμίου που εκτέθηκε για 15 ημέρες (π.χ. IIVB1) είναι μεγαλύτερος από τη διαφορά του ρυθμού διάβρωσης δοκιμίων με διαφορά χρόνου έκθεσης 15 ημερών (π.χ. VIB3 : 25 ημέρες , VIB6 : 10 ημέρες) (βλ.πίνακα 5.3). Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαβρωτικότητα του κράματος μειώνεται συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης.

### 5.4.3 Σύγκριση επιφανειών δοκιμίων μετά από σάρωσή τους μέσω της μεθόδου λευκού δομημένου φωτός (structured white light 3D scanning)

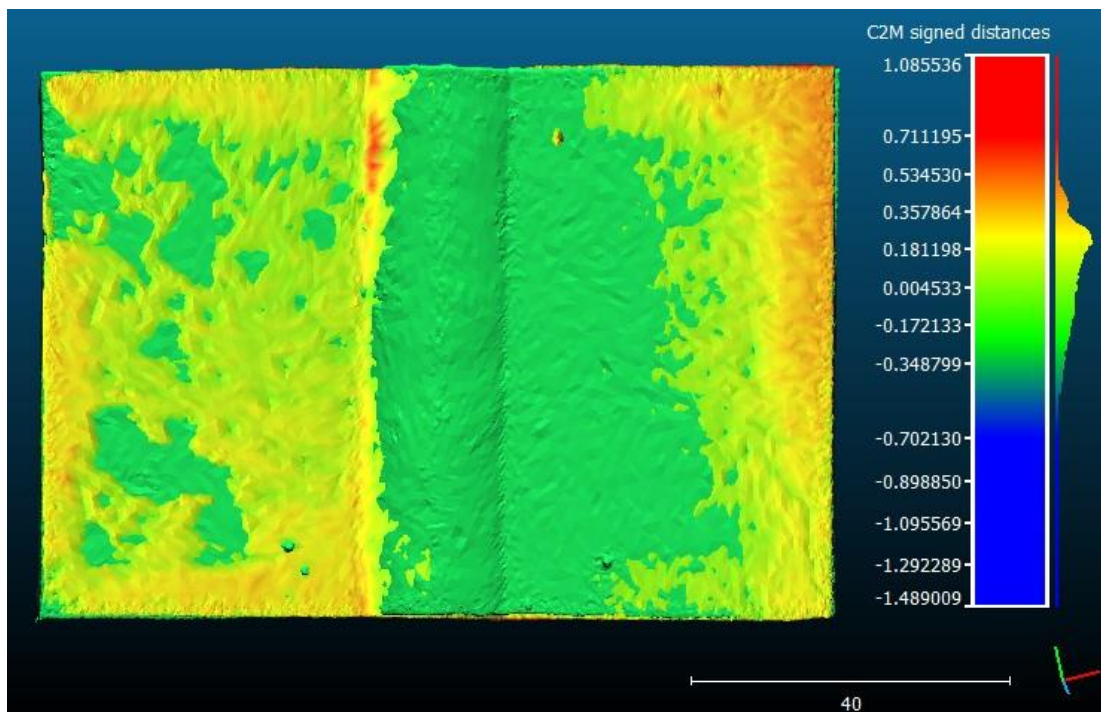
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.8 για τη συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια με συγκόλληση FCAW , ίδιων διαστάσεων. Το ένα είχε αμμοβοληθεί και το άλλο είχε παραμείνει στο θάλαμο αλατονέφωσης για χρονικό διάστημα 30 ημερών και εν συνεχεία αφαιρέθηκαν από την επιφάνειά του τα προϊόντα διάβρωσης (εικόνα 5.18 , δοκίμιο IXB3).

Η επιφάνεια κάθε δοκιμίου σαρώθηκε δημιουργώντας κάθε φορά ένα πλέγμα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύγκρισης των δύο πλεγμάτων μέσω δύο διαφορετικών λογισμικών , του CloudCompare και του Rapidform XOR3 . **Ως πλέγμα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά το πλέγμα που προέκυψε από το αμμοβολημένο δοκίμιο.** Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται παρακάτω.

- Σύγκριση πλεγμάτων μέσω CloudCompare



(a)



(b)

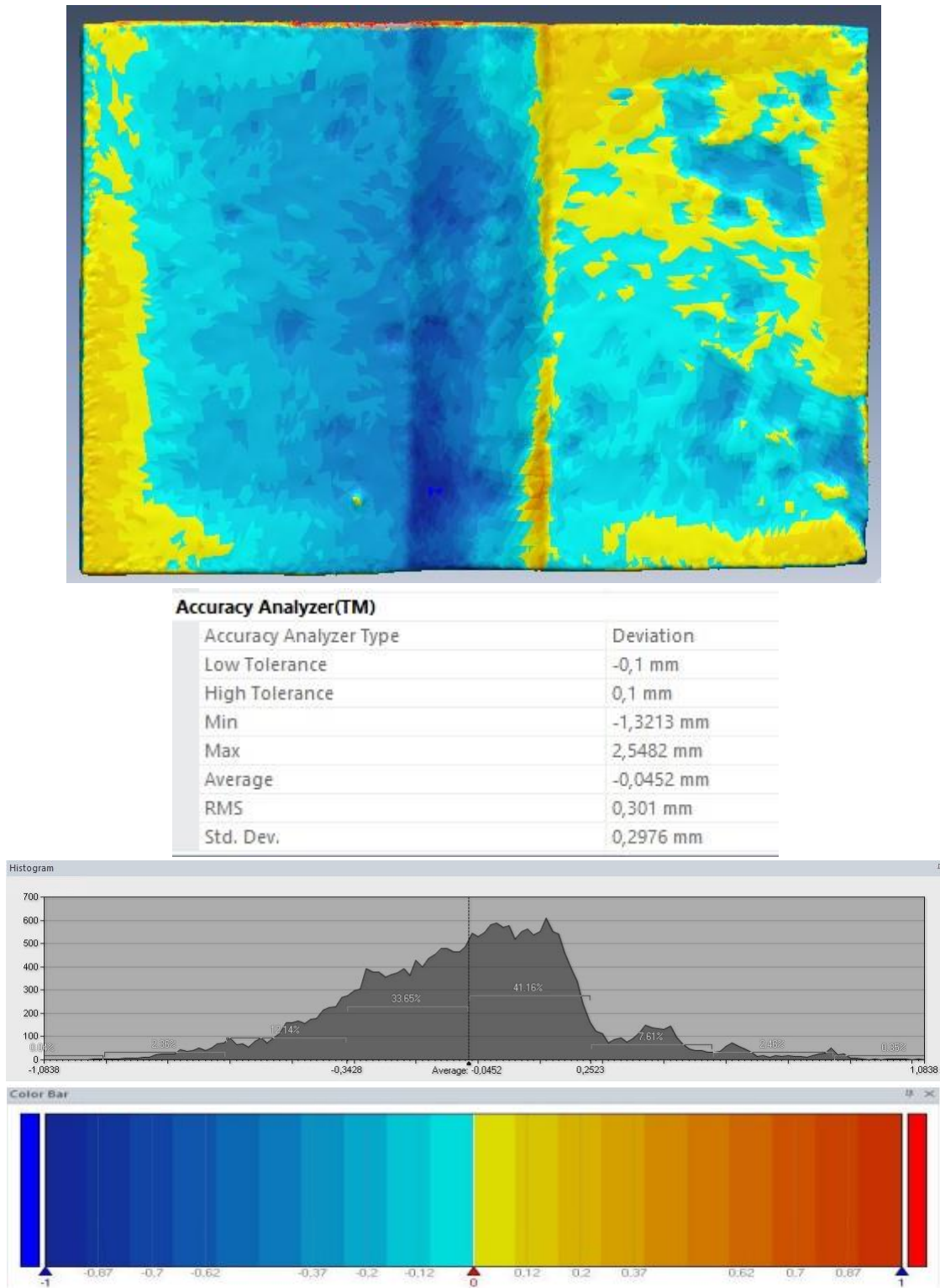
Εικόνα 5.21 : (a) , (b) Σύγκριση πλεγμάτων επιφανειών των δύο δοκιμών (αμμοβολημένου-διαβρωμένου) μέσω του λογισμικού CloudCompare.

Από τη δοκιμή με το λογισμικό CloudCompare παρατηρείται από την κατανομή των αποστάσεων ότι το μεγαλύτερο ποσοστό συγκεντρώνεται περίπου στα 200-250  $\mu\text{m}$ . Το βάθος διάβρωσης για το δοκίμιο IXB3 έχει υπολογισθεί θεωρητικά ίσο με 290  $\mu\text{m}$  περίπου.

Από τη δοκιμή με το λογισμικό Rapidform XOR3 (εικόνα 5.22) , το μεγαλύτερο ποσοστό της κατανομής έδειξε επίσης να συγκεντρώνεται περίπου στα 200-250  $\mu\text{m}$ .

Να σημειωθεί πως λόγω του ότι δε χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ακριβώς δοκίμιο για τη δημιουργία των πλεγμάτων , τα αποτελέσματα είναι επισφαλή. Επίσης , πρόκειται για αποτελέσματα δοκιμών και όχι ανάλυσης εις βάθος. Στην παρούσα διπλωματική , δηλαδή , παρουσιάζεται μια πρώτη εικόνα για τις δυνατότητες της συγκεκριμένης διαδικασίας.

- Σύγκριση πλεγμάτων μέσω Rapidform XOR3



Εικόνα 5.22 : Σύγκριση πλεγμάτων επιφανειών των δύο δοκιμών (αμμοβολημένου-διαβρωμένου) μέσω του λογισμικού Rapidform XOR3.



## Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μικροδομή συγκολλήσεων τόξου και υβριδικών συγκολλήσεων laser – τόξου χαλύβων AH36, καθώς και η συμπεριφορά τους σε διάβρωσης με βάση την έκθεσή τους σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης σε θάλαμο αλατονέφωσης.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από την παρούσα εργασία είναι τα εξής :

Αναφορικά με τις ιδιότητες του υλικού :

- Το μέταλλο βάσης παρουσιάζει φερριτο-περλιτική δομή , προσανατολισμένη λόγω έλασης.
- Στη **συγκόλληση τόξου (FCAW)** : στις μη ανοπτημένες περιοχές της ζώνης τήξης παρατηρείται φερριτο-μπαινιτική μικροδομή , κυρίως υπό μορφή δενδριτών ενώ παρατηρείται τοπικά η ύπαρξη βελονοειδούς φερρίτη Widmstätten. Στι περιοχές που έχουν υποστεί ανόπτηση , παρατηρείται φερριτο-μπαινιτική μικροδομή με μεγαλύτερα ποσοστά φερρίτη. Τέλος , στη ΘΕΖ παρατηρείται παρόμοια μικροδομή με τις ανοπτημένες περιοχές της ζώνης τήξης.
- Στην **υβριδική συγκόλληση Laser-MAG+Tandem** : στη ζώνη τήξης παρατηρείται φερριτο-μπαινιτική μικροδομή με τους κόκκους να έχουν χαρακτηριστική δενδριτική μορφή. Επίσης , παρατηρείται χαρακτηριστική μορφολογία ταχείας στερεοποίησης.
- Όσον αφορά στις σκληρομετρήσεις , για τη **συγκόλληση τόξου** οι υψηλότερες τιμές σκληρότητας εμφανίζονται στη ζώνη τήξης. Για την **υβριδική συγκόλληση** , οι υψηλότερες τιμές σκληρότητας εμφανίζονται στην περιοχή μετάβασης από τη ζώνη τήξης στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων επιταχυνόμενης γήρανσης προκύπτουν τα εξής :

- Ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών γενικά κυμαίνεται μεταξύ 3-5 mm/year. Για δοκίμια interval με μικρούς χρόνους έκθεσης (έως 30 κύκλους) το νούμερο ανέρχεται στα 6 mm/year.
- Τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης εμφανίζουν τα interval δοκίμια με μικρούς χρόνους έκθεσης (10,30 κύκλοι έκθεσης).
- Τα δοκίμια που φέρουν υβριδικές συγκολλήσεις παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές ρυθμού διάβρωσης από τα δοκίμια που φέρουν απλές συγκολλήσεις τόξου.
- Για ορισμένα δοκίμια με συγκόλληση τόξου για μεγάλους χρόνους έκθεσης (60-70 κύκλοι έκθεσης) , καθώς και για όλα τα δοκίμια με υβριδική συγκόλληση , φαίνεται να έχει προσβληθεί η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (διακρίνεται εύκολα με βαθύ σκούρο χρώμα).
- Τα δοκίμια regular παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ρυθμού διάβρωσης από τα δοκίμια interval , ειδικά για λίγους κύκλους έκθεσης , ενώ με την αύξηση των κύκλων έκθεσης οι τιμές

τείνουν να εξομειωθούν. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται τα δοκίμια, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου.

- Ο ρυθμός διάβρωσης του δοκιμίου που εκτέθηκε για 15 ημέρες (π.χ. IIVB1) είναι μεγαλύτερος από τη διαφορά του ρυθμού διάβρωσης δοκιμίων με διαφορά χρόνου έκθεσης 15 ημερών (π.χ. VIB3 : 25 ημέρες , VIB6 : 10 ημέρες) (βλ.πίνακα 5.3). Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διαβρωτικότητα του κράματος μειώνεται συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης.

**Βιβλιογραφία**

- [1] ASTM G 31 – 72 (Reapproved 1999), Standard Practice for Labarotary Immersion Corrosion Testing of Metals.
- [2] ISO 14993:2001(E), “Corrosion of metals and alloys – Accelerated testing involving cyclic exposure to salt mist, “dry” and “wet” conditions”.
- [3] ISO 8407:1991(E), “Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens”.
- [4] British Standard EN 1043–1:1996 , “ Destructive tests on welds in metallic materials. Hardness testing – Part 1 : Hardness test on arc welded joints ” .
- [5] British Standard EN 1321:1997 , “ Destructive tests on welds in metallic materials – Macroscopic and microscopic examination of welds ” .
- [6] Παντελής Δ.Ι., Χρυσουλάκης Γ. Δ., “Επιστήμη και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών”, Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007 .
- [7] Παπάζογλου Β.Ι., “Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων”, Σημειώσεις , Αθήνα 1994.
- [8] Παπάζογλου Β.Ι., “Ναυπηγική Τεχνολογία”, Σημειώσεις , Αθήνα 1995.
- [9] Παντελής Δ.Ι., Τσιούρβα Θ. , “Διάβρωση και προστασία ναυπηγικών κατασκευών”, Αθήνα 2006.
- [10] Λούντζης Γ.Ν. , “Συμπεριφορά σε διάβρωση χάλυβα ΑΗ36 σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης ” , Διπλωματική εργασία , 2007.
- [11] ABS ( American Buraeu of Shipping) , “ Rules for Materials and Welding , Part 2 ” , 2014 .
- [12] IACS ( International Association of Classification Societies) , “ Requirements concerning Materials and Welding ” , 2014.
- [13] Sindo Kou , “Welding Metallurgy, second edition ” , 2003.
- [14] ASM International , “Corrosion of Weldments” , 2006.
- [15] Babu, S.S. David, S.A. Quintana, M.A. 2001. “Modelling microstructure development in selfshielded FCAW” , *Welding Journal*, 80(4): 91s-97s.
- [16] Miller Electric, 2013, “Guidelines for Gas Metal Arc Welding (GMAW)”, Miller Electric Mfg. Co., Illinois.
- [17] Lincoln Electric, 2004. “GMAW welding guide”. Ohio: The Lincoln Electric Company.
- [18] Kobe Steel Ltd., 2011, “Essential Factors in Gas Metal Arc Welding 4th edition”, Kobe Steel Ltd., Tokyo.
- [19] Morrett B and Giese B, 2006, “Troubleshooting the GMAW Process”, *Welding Journal*, Miami.
- [20] Gadallah R, Fahmy R, Khalifa T, Sadek \$, 2012, “Influence of Shielding Gas Composition on the Properties of Flux-Cored Arc Welds of Plain Carbon Steel”, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, vol. 2, Cairo.
- [21] BOC, 2007, “GMAW (MIG)/ FCAW”, Section 4, BOC.
- [22] Morrett B and Giese B, 2006, “Troubleshooting the GMAW Process”, *Welding Journal*, Miami.
- [23] N. B. Mostafa, M. N. Khajavi, 2006, “Optimization of Welding Parameters for Weld Penetration in FCAW Volume 16, Issue 1 -2”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Iran.
- [24] Myers, T. 2010. “Choosing a shielding gas for FCAW” . *Welding Journal*, 89(3): 30-33.

- [25] American welding society, 2003, "Fusion welding Processes", Miami, AWS.
- [26] Kristensen J K , Webster S , Petring D , "Hybrid laser welding of thick section steels – The HYBLAS project" , 2009.
- [27] HYBLAS: Economical and safe laser hybrid welding of structural steel, Contract No RFSR-CT-2003-00010.
- [28] Goecke S , Hedegård J , Lundin M , Kaufmann H , "Tandem MIG/MAG Welding" , 2001.
- [29] Kah P , "Usability of Laser-Arc Hybrid Welding processes in industrial applications." , 2011.
- [30] Tani G, Campana G, Fortunato A, Ascari A (2007), "The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding"
- [31] Kah P, Salminen A, Martikainen J, "The influence of parameters on penetration, speed and bridging in laser hybrid welding", MECHANIKA , 2011
- [32] Kah P, Salminen A, Martikainen J, "Laser Arc Hybrid Welding Processes" , The Paton Welding Journal , 2010.
- [33] Kah P, Salminen A, Martikainen J , "The effect of the relative location of laser beam with arc in different hybrid welding processes " , MECHANIKA , 2010.
- [34] Kah P, Salminen A, Martikainen J , "The analysis of shielding gases in laser-arc hybrid welding processes" , Published in Proceedings IMechE Part B, Journal of Engineering Manufacture, Volume 225, 2011,Part B. ISSN: 0953-4054 (Print); 2041-2975 (Online).
- [35] ASM Handbook, Vol. 13A, 2003.
- [36] Operating Manual Q. Fog Cyclic Corrosion Tester.
- [37] Jones D A , "Pinciples and prevention of corrosion – 2<sup>nd</sup> edition" , 1996.
- [38] Beyer, E., Brenner, B. and Poprawe, R. (1996). Hybrid Laser Welding Techniques for Enhanced Welding Efficiency. ICALEO Proceedings, Section D, Detroit, USA.
- [39] <http://www.metals4u.co.uk/How-to-Mig-Weld.asp>
- [40] <http://www.iiviiinfrared.com/1-Micron-Optics-Materials/1micron-laser-overview.html>
- [41] <http://scientificlib.com/en/Physics/Laser/FreeElectronLaser.html>
- [42] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/design-part-4-093/>
- [43] [http://www.rp-photonics.com/fiber\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html)
- [44] [http://www.rp-photonics.com/fiber\\_coupled\\_diode\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/fiber_coupled_diode_lasers.html)
- [45] [http://www.rp-photonics.com/yag\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html)
- [46] <http://www.eagle-group.eu/en/laser-welding>
- [47] <http://marine.chemcoint.com/products/applications/ballast-tank-coatings.html>
- [48] <http://www.lemschout.net/psc/§cthickm.htm>
- [49] [http://www.generalshipping.gr/exp\\_detail.php?id=8003](http://www.generalshipping.gr/exp_detail.php?id=8003)
- [50] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/>
- [51] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metallurgical\\_microscope](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metallurgical_microscope)
- [52] <http://www.csm-instruments.com/Vickers-indentation-using-CSMs-Micro-Scratch-Tester>
- [53] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/hybrid-laser-arc-welding-detail.aspx>
- [54] [http://www.gim-international.com/issues/articles/id1666-Structured\\_Light\\_Scanners.html](http://www.gim-international.com/issues/articles/id1666-Structured_Light_Scanners.html)
- [55] [http://www.thefullwiki.org/Structured-light\\_3D\\_scanner](http://www.thefullwiki.org/Structured-light_3D_scanner)
- [56] <http://www.spatialvision.net/spatial-vision-inspection-features>

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

**ΜΑΡΤΙΟΣ 2014**

| ΔΕΥΤΕΡΑ   | ΤΡΙΤΗ  | ΤΕΤΑΡΤΗ   | ΠΕΜΠΤΗ   | ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ  | ΣΑΒΒΑΤΟ   | ΚΥΡΙΑΚΗ   |
|---|--|---|--|--|-----------|-----------|
|   |  |   |  |  | <b>1</b>  | <b>2</b>  |
| <b>3</b>  | <b>4</b>   | <b>5</b>  | <b>6 Έναρξη , Μπαίνουν τα Συγκ.:</b><br>IVB2,IB1,IIB1,IIIB1,IVB3,IB2,IIB2,VB1<br><b>Μ.Β.:</b><br>IIIA3,VC1,IIC3,IA3,IC3,IVA1,IC2,IIA2,VC2,IIC1,<br>IA1,IIA3,IVC1,VA1 | <b>7</b>   | <b>8</b>  | <b>9</b>  |
| <b>10</b>   | <b>11</b> Βγαίνουν :<br>IVB2,IIIA3,VC1<br>Μπαίνουν :<br>IIB4*,IA2*,IVC3* | <b>12</b>   | <b>13</b>  | <b>14</b>  | <b>15</b> | <b>16</b> |
| <b>17</b> Βγαίνουν :<br>IB1,IIC3,IA3<br>Μπαίνουν :<br>IIB3*,IIC1*,IIA1* | <b>18</b>  | <b>19</b>   | <b>20</b>  | <b>21</b> Βγαίνουν :<br>IIB1,IC3,IVA1<br>Μπαίνουν :<br>VB2*,IIC2*,VA2* | <b>22</b> | <b>23</b> |
| <b>24</b>   | <b>25</b>  | <b>26</b> Βγαίνουν :<br>IIIB1,IC2,IIA2<br>Μπαίνουν :<br>IIB2*,IIC2*,IVA2* | <b>27</b>  | <b>28</b>  | <b>29</b> | <b>30</b> |
| <b>31</b> Βγαίνουν :<br>IVB3,VC2,IIC1<br>Μπαίνουν :<br>IB3*,IC1*,IVC2*  |  |   |  |  |           |           |



**ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014**

| ΔΕΥΤΕΡΑ   | ΤΡΙΤΗ     | ΤΕΤΑΡΤΗ   | ΠΕΜΠΤΗ   | ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ | ΣΑΒΒΑΤΟ   | ΚΥΡΙΑΚΗ   |
|-----------|-----------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|
|           | <b>1</b>  | <b>2</b>  | <b>3</b>   | <b>4</b>  | <b>5</b>  | <b>6</b>  |
| <b>7</b>  | <b>8</b>  | <b>9</b>  | <b>10</b> Λήξη , Βγαίνουν τα Συγκ.:<br>IIB4*,IIB3*,VB2*,IIB2*,IB3*,IB2,IIB2,VB1<br>M.B.:<br>IA2*,IVC3*,IIC1*,IIA1*,IIC2*,VA2*,<br>IIC2*,IVA2*,IC1*,IVC2*,IA1,IIA3,IVC1,VA1 | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>13</b> |
| <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> | <b>17</b>  | <b>18</b> | <b>19</b> | <b>20</b> |
| <b>21</b> | <b>22</b> | <b>23</b> | <b>24</b>  | <b>25</b> | <b>26</b> | <b>27</b> |
| <b>28</b> | <b>29</b> | <b>30</b> |  |           |           |           |

**ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2014**

| ΔΕΥΤΕΡΑ | ΤΡΙΤΗ | ΤΕΤΑΡΤΗ | ΠΕΜΠΤΗ | ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ  | ΣΑΒΒΑΤΟ | ΚΥΡΙΑΚΗ |
|---------|-------|---------|--------|--|---------|---------|
|         |       |         |        | 1  | 2       | 3       |
| 4       | 5     | 6       | 7      | 8  | 9       | 10      |
| 11      | 12    | 13      | 14     | 15   | 16      | 17      |
| 18      | 19    | 20      | 21     | 22   | 23      | 24      |
| 25      | 26    | 27      | 28     | <b>29 Έναρξη , Μπαίνουν τα Συγκ.:</b><br>VIB1, VIB6, VIIB1, VIIB5, VIB3, VIB4, VIIB6,<br>VIIIIB3, IXB4, IXB1, XB2, VIIIIB1, IXB3, XB4<br><b>Μ.Β.:</b><br>VIC4, VIIA5, VIA5, VIIA4, VIC1, VIIC2, VIC5, VIIA6, VIC6, VIIC4,<br>VIA3, VIC2, VIIC1<br>VIIIA2, IXC4, IXA1, XA2, VIIIIC3, XC4, VIIIIC1, IXC2, VIIIA4, XA3,<br>VIIIA3, IXA2, XA1, XC3 | 30      | 31      |

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014

| ΔΕΥΤΕΡΑ   | ΤΡΙΤΗ | ΤΕΤΑΡΤΗ  | ΠΕΜΠΤΗ | ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ   | ΣΑΒΒΑΤΟ | ΚΥΡΙΑΚΗ |
|---|-------|--|--------|---|---------|---------|
| 1   | 2     | 3<br>Βγαίνουν: VIB1, VIC4, VIIA5, VIIIIB3, VIIIA2, IXC4<br>Μπαίνουν: VIIIB3*, VIA1*, VIIA2*<br>XB1*, IXA4*, XA4* | 4      | 5   | 6       | 7       |
| 8<br>Βγαίνουν: VIB6, VIA5, VIIA3, IXB4, IXA1, XA2<br>Μπαίνουν: VIB2*, VIA4*, VIIC3*, VIIIIB2*, VIIIC4*, IXC1*       | 9     | 10   | 11     | 12<br>Βγαίνουν: VIIIB1, VIC1, VIIC2, IXB1, VIIIC3, XC4<br>Μπαίνουν: VIB5*, VIA6*, VIIA1*, VIIIIB4*, IXC3*, XC2* | 13      | 14      |
| 15  | 16    | 17   | 18     | 19  | 20      | 21      |
| 22<br>Βγαίνουν: VIIIB5, VIC5, VIIA6, XB2, VIIIC1, IXC2<br>Μπαίνουν: VIIIB2*, VIC3*, VIIC5*, IXB2*, VIIIA1*, VIIIC1* | 23    | 24   | 25     | 26  | 27      | 28      |
| 29<br>Βγαίνουν: VIB3, VIC6, VIIC4, VIIIIB1, VIIIA4, XA3<br>Μπαίνουν: VIIIB4*, VIA2*, VIIC6*, XB3*, IXA3*, XC1*      | 30    |  |        |   |         |         |

ΟΤΚΩΒΡΙΟΣ 2014

| ΔΕΥΤΕΡΑ   | ΤΡΙΤΗ | ΤΕΤΑΡΤΗ | ΠΕΜΠΤΗ | ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ | ΣΑΒΒΑΤΟ | ΚΥΡΙΑΚΗ |
|---|-------|---------|--------|-----------|---------|---------|
|   |       | 1       | 2      | 3         | 4       | 5       |
| 6   | 7     | 8       | 9      | 10        | 11      | 12      |
| <b>13 Λήξη</b> , Βγαίνουν τα <b>Συγκ.:</b> <b>VIB3*,VIB2*,VIB5*,VIIB2*,VIIB4*,VIB4,VIIB6</b><br><b>XB1*,VIIB2*,VIIB4*,IXB2*,XB3*,IXB3,XB4</b><br><b>M.B.:</b><br><b>VIA1*,VIA2*,VIA4*,VIIC3*,VIA6*,VIA1*,VIC3*,VIIC5*,VIA2*,VIIC6*,VIA3,VIC2,VIIC1</b><br><b>IXA4*,XA4*,VIIC4*,IXC1*,IXC3*,XC2*,VIA1*,VIIC1*,IXA3*,XC1*,VIA3,IXA2,XA1,XC3</b> | 14    | 15      | 16     | 17        | 18      | 19      |
| 20  | 21    | 22      | 23     | 24        | 25      | 26      |
| 27  | 28    | 29      | 30     | 31        |         |         |

**Σημείωση :** Στους παραπάνω πίνακες όσα δοκίμια αναγράφονται με **μπλε** είναι δοκίμια με συγκόλληση. Επίσης , για όσα δοκίμια χρησιμοποιείται αστερίσκος (\*), πρόκειται για δοκίμια interval. Τέλος , για κάθε δοκίμιο που βγαίνει από το θάλαμο ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στη φόρμα της παραγράφου 4.7 .

|   |                |
|---|----------------|
| <b>FINCANTIERI</b><br>Cantieri Navali Italiani S.p.A. |                |
| WPQR N°<br>(WPQR n°)                                  | <b>HL04-11</b> |
| Data/Date   | 16-06-2011     |

(Welding Procedure Qualification Record)  
**REGISTRAZIONE DELLA QUALIFICA DI PROCEDIMENTO DI SALDATURA WPQR**

According to SHIPYAG (WP9 Work Package Report, issued by L.R. and R.I.Na. – May 2004)

|  |  |
|--|--|
| Procedimento di saldatura (Welding procedure): <b>Laser ibrido</b><br>(Hybrid laser) | Tipo (Type): <b>Automatico</b> (Fully mechanized)  |
| Impianto di saldatura (Welding plant)  | <b>STAZIONE DI SALDATURA ONE-SIDE FINCANTIERI</b><br><b>Generatore MAG: 603 CLOOS QUINTO</b><br><b>Laser: IPG YLR 10000 SP (Itterbio)</b> [Potenza max: 10 kW]<br>FINCANTIERI ONE-SIDE WELDING STATION<br>MAG power source: 603 CLOOS QUINTO<br>Laser: IPG YLR 10000 SP (Ytterbium Fiber Laser) [Max power: 10 kW] |

**PREPARAZIONE GIUNTO** (Joint preparation)

|  |  |   |
|--|--|---|
| Tipo di giunto (Joint design)                  | T.T (BW)   | <p style="text-align: center;"><b>POSIZIONE DI SALDATURA</b> (Welding position): <b>Piana (Flat) PA</b></p> |
| Campo spessore lamiera (Thickness plate range) | <b>16 + 20 mm</b>                                  |   |
| Cianfrino (Groove)                             | <b>ad Y (Y shaped)</b>                             |   |
| Preparazione lembi (Bevel preparation)         | <b>fresatura automatica</b><br>(automatic milling) |   |
| Angolo di apertura (Total opening angle)       | <b>8° ÷ 12°</b>                                    |   |
| Spalla (Root face)                             | <b>4 mm</b>  |   |
| Sostegno al rovescio (Backing)                 | <b>no/none</b>                                     |   |
| Ripresa al rovescio (Back gouging)             | <b>no/none</b>                                     |   |

**MATERIALE BASE** (Base metal)

|  |  |
|--|--|
| Designazione (Designation): <b>Acciaio alta resistenza</b> (High tensile steel)  | Grado (Grade): <b>AH 36</b>                  |
| Gruppo (Group): cr iso 15608: <b>1.2</b>   | Campo di validità (range): <b>A; B; AH36</b> |
| Carbonio equivalente (Carbon equivalent) $C_{EQ}$ : <b>0,40</b><br>see chemical composition certificates attached to WPQR: HL03-11 |  |

**MATERIALE D'APPORTO** (Filler metal)

|   |                                    |   |
|---|------------------------------------|---|
| Nome commerciale (Trade name): <b>FILCORD C</b>                         | Diametro (diameter): <b>1,2 mm</b> | Ditta (Company): <b>FRO</b>                                 |
| Classificazione (Classification): <b>EN ISO 14341-A: G 42 4 M G3Si1</b> | Omologazioni (Approvals)           | Lloyd's Register: <b>3S-3YS</b><br>R.I.Na: <b>SG42-52A3</b> |
| <b>AWS SFA 5.18: ER 70S-6</b>   |                                    |   |

**GAS DI PROTEZIONE** (Shielding gas)

|  |  |
|--|--|
| Tipo (Type): <b>Binario</b> (Binary)                               | Classificazione (Classification): <b>M20</b> |
| Composizione (Composition): <b>Ar (90%) - CO<sub>2</sub> (10%)</b> | Portata (Flow rate): <b>20 ÷ 25 l/min</b>    |
| Diametro ugello gas (gas nozzle diameter): <b>16 mm</b>            |  |



TRATTAMENTI TERMICI (Heat treatments)

|   |  |
|---|--|
| Preriscaldamento (Preheat): NO/NONE                                 | Temperatura di prova WPQR/WPQR test temperature: 20 °C |
| Trattamento termico dopo saldato (Postweld heat treatment): NO/NONE |  |

PARAMETRI MAG (MAG arc parameters)

|  |  |
|--|--|
| Corrente (Current): <b>corrente continua (DC)</b>            | Modalità/Polarità (Mode/Polarity): <b>pulsata (pulse)/inversa (EP)</b> |
| Ampere [range]: 260-265                                      | Volts [range]: 25  |
| Pulsazione (Pulse period) [range]: 1,65 ms                   | Frequenza (Pulse frequency) [range]: 240 Hz                            |
| Vel. filo (Wire feed speed) [range]: 7,15 m/min              | Vel. avanzamento (Travel speed) [range]: 80cm/min                      |
| Apporto termico (Heat input) [range]: $Q_{MAG} = 4,96$ kJ/cm |  |

POTENZA LASER E CARATTERISTICHE OTTICHE (Laser power and optical characteristics)

|   |  |
|---|--|
| Potenza laser (Laser power) [range]: 9,3 kW                       | Denominazione gruppo ottico (Optic group type): <b>BIMO-HP (HIGHYAG)</b> |
| Lunghezza d'onda (wavelength) [range]: $\lambda = 1025 + 1080$ nm | Lunghezza focale (Focal length): <b>250 mm</b>                           |
| Tipo di focalizzazione (Focusing type): <b>2,0</b>                | Fattore di collimazione (Collimation factor): <b>0,70</b>                |
| Posizione fuoco (Focus position): <b>- 2 mm</b>                   | Apporto termico (Heat input) [range]: $Q_L = 6,98$ kJ/cm                 |

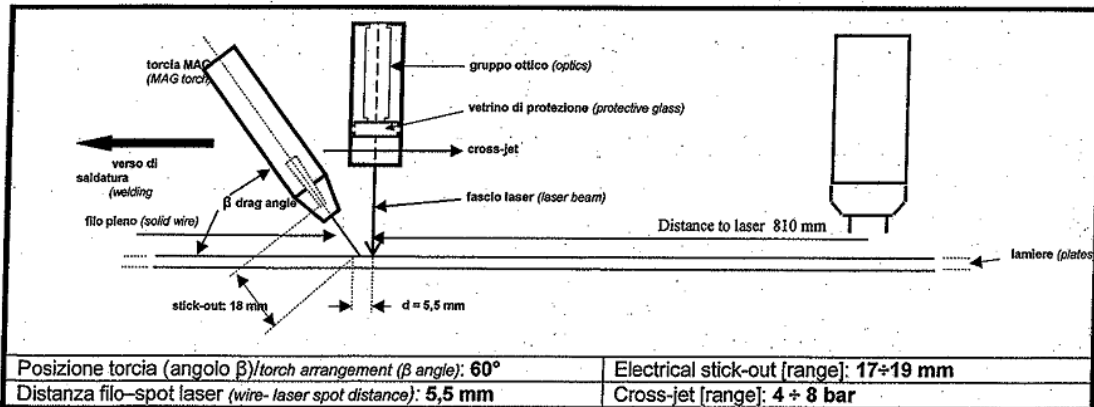
PARAMETRI TANDEM MAG master (tandem MAG arc parameters master)

|  |  |
|--|--|
| Corrente (Current): <b>corrente continua (DC)</b>            | Modalità/Polarità (Mode/Polarity): <b>pulsata (pulse)/inversa (EP)</b> |
| Ampere [range]: 270-280                                      | Volts [range]: 26-26,5   |
| Pulsazione (Pulse period) [range]: 1,9 ms                    | Frequenza (Pulse frequency) [range]: 220 Hz                            |
| Vel. filo (Wire feed speed) [range]: 10,6 m/min              | Vel. avanzamento (Travel speed) [range]: 80 cm/min                     |
| Apporto termico (Heat input) [range]: $Q_{MAG} = 5,56$ kJ/cm |  |

PARAMETRI TANDEM MAG slave (tandem MAG arc parameters slave)

|  |  |
|--|--|
| Corrente (Current): <b>corrente continua (DC)</b>            | Modalità/Polarità (Mode/Polarity): <b>pulsata (pulse)/inversa (EP)</b> |
| Ampere [range]: 225-230                                      | Volts [range]: 28  |
| Pulsazione (Pulse period) [range]: 1,9 ms                    | Frequenza (Pulse frequency) [range]: 220 Hz                            |
| Vel. filo (Wire feed speed) [range]: 7,5 m/min               | Vel. avanzamento (Travel speed) [range]: 80 cm/min                     |
| Apporto termico (Heat input) [range]: $Q_{MAG} = 4,83$ kJ/cm |  |

CONFIGURAZIONE TESTA SALDANTE (Welding head configuration)



TECNICA (Technique)

|  |
|--|
| Posizione in saldatura (position during welding): <b>il MAG (torcia a tirare) precede il laser (MAG (dragging torch) precedes laser)</b> |
| Passate strette o larghe (String or weave bead): <b>strette (string)</b>   |
| Passate singole o multiple (Multiple or single pass): <b>singole (single)</b>  |
| Oscillazione (Oscillation): <b>no</b>  |





**PROVE DISTRUTTIVE E NON DISTRUTTIVE**  
(DESTRUCTIVE AND NON DESTRUCTIVE TEST)

**PROVA DI TRAZIONE STATICA** (Static tensile test) see Metal Service report no: 11.456

| Campione (sample) | Posizione (Position) | Area (Area) mm <sup>2</sup> | Fm N   | Rm N/mm <sup>2</sup> | Posizione della frattura (Fracture position) |
|-------------------|----------------------|-----------------------------|--------|----------------------|--|
| 929               | Saldatura (Welding)  | 424                         | 224000 | 528                  | Materiale base (Base material)               |
| 929               | Saldatura (Welding)  | 419                         | 221000 | 527                  | Materiale base (Base material)               |

**PROVA DI PIEGA** (Bend test) see Metal Service report no: 11.456

| Campione (Sample) | Provino (Specimen)  | Angolo piega (Bend angle) | Risultato (Result)       |
|-------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|
| 929               | (1) laterale (Side) | 180°                      | Accettabile (Acceptable) |
| 929               | (2) laterale (Side) | 180°                      | Accettabile (Acceptable) |
| 929               | (3) laterale (Side) | 180°                      | Accettabile (Acceptable) |
| 929               | (4) laterale (Side) | 180°                      | Accettabile (Acceptable) |

**PROVA DI RESILIENZA** (Impact test) see Metal Service report no: 11.456

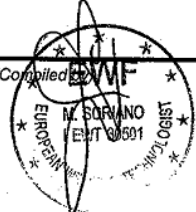
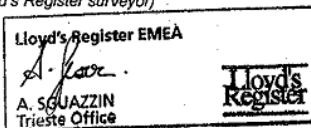
| Campione (Sample) | Posizione intaglio (Notch position) | Tipo (Type) | Dimensioni (Size) mm | Temperatura (Temperature) | Energia assorbita (Impact absorbed energy) J |     |     |
|-------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------|---------------------------|--|-----|-----|
| 929               | VHT+2                               | Charpy - V  | 5 x 10               | 0°                        | 194  | 181 | 243 |
| 929               | VHT                                 | Charpy - V  | 5 x 10               | 0°                        | 199  | 210 | 236 |
| 929               | VWT                                 | Charpy - V  | 5 x 10               | 0°                        | 123  | 96  | 99  |

**PROVA DI DUREZZA** (Hardness test) see Metal Service report no: 11.456

| Tipo (Type) | Posizione (Position)                            | Risultato (Result)       |
|-------------|---|--------------------------|
| Vickers 5   | Materiale base (Base material)                  | Accettabile (Acceptable) |
| Vickers 5   | Zona termicamente alterata (Heat affected zone) | Accettabile (Acceptable) |
| Vickers 5   | Zona di fusione (Fusion zone)                   | Accettabile (Acceptable) |

**PROVE NON DISTRUTTIVE** (Non destructive test)

|   |  |
|---|--|
| Esame visivo (Visual examination)             | Accettabile (Acceptable)                         |
| Macro (Macro)                                 | Accettabile (Acceptable) see report no: 11.456   |
| Esame radiografico (Radiographic examination) | Accettabile (Acceptable) see report no: 0102/001 |

|   |   |
|---|---|
| Compilato da (Compiled by)<br>   | Approvato da (Approved by)              |
| Ispettore Lloyd's Register<br>(Lloyd's Register surveyor)<br><br>A. SQUAZZIN<br>Trieste Office | Ispettore R.I.Na.<br>(R.I.Na. surveyor) |

**CERTIFICATO DI CONTROLLO 3.2 / INSPECTION CERTIFICATE 3.2 - EN 10204:2004**

**METINVEST®**  
Metinvest Tramel metal spa

Società per azioni con socio unico - soggetta a direzione e coordinamento di Metinvest B.V.  
STABILIMENTO: 33058 S. GIORGIO DI NOGARÒ (UD) VIA E. FERMI, 44  
TEL. 0431/629989 (RIC. AUT.) - FAX 0431/629985 (RIC. AUT.)  
SEDE LEGALE: 16121 GENOVA - VIA XII OTTOBRE, 3 - 6° PIANO  
Capitale sociale € 300.120.000,00 I.V. - R.E.A. Genova n. 437720  
C.F., P. Iva e Iscr. Reg. Imp. Genova n. 05956630965

(A) PROCESSO DI ELABORAZIONE / STEELMAKING PROCESS: E = ELECTRIC; BO = BASIC OXYGEN  
(B) STATO DI FORNITURA / DELIVERY CONDITION: AR = GREZZO DI LAMINAZIONE / AS ROLLED;  
N = LAMINAZIONE A TEMPERATURA CONTROLLATA / NORMALIZING ROLLING;  
R = RICOTTO / ANNEALED;  
N+R = NORMALIZZATO + RINVENUTO / NORMALIZED + ANNEALED  
(C) TRATTAMENTO TERMICO DEL CAMPIONE / HEAT TREATMENT OF SAMPLE:  
N = 910°C, 1,5 min/mm; ARIA CALMA / STILL AIR  
R = 650°C, 1,5 min/mm; ARIA CALMA / STILL AIR  
(D) Ceq1 = C + Ni/6; Ceq2 = C + Ni/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Nb + Cu)/15;  
Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/50 + Mo/15 + V/10 + B\*5  
(1) POSIZIONE / LOCATION: 1 = TESTA / TOP; 2 = FIANDE / BOTTOM  
(2) POSIZIONE / LOCATION: C = QUOTTA / 1/2 THICKNESS; P = FELLE / SURFACE; D = 1/4 SPESSORE / THICKNESS  
(3) DIREZIONE / DIRECTION: L = LONGITUDINALE / LONGITUDINAL; T = TRASVERSALE / TRANSVERSE  
(4) FORMA DEL PROVAIO / SHAPE OF TEST PIECE: P = PRISMATICO / PRISMATIC; C = CILINDRICO / CYLINDRICAL  
(5) ESITO PROVA DI PIEGA / RESULT: OK = CONFORME; NO = NOT CONFORME

41828 / 13/09/2013  
31305224 / MAIL  
DDT / del / date  
Pratica / File no. VEN1391007/7  
del / date 10/09/2013

**CLIENTE / CUSTOMER**  
**FINCANTIERI CANT. NAV.ITALIANI SPA**  
Via Genova, 1  
34121 TRIESTE  
TS ITALIA

606 Marcatura di prodotto / Marking of the product  
LAMIERA/ORDINE/N° INFORMAMENTO/DIMENSIONI/QUALITÀ/MARCHIO DEL PRODUTTORE  
PLATE/ORDER/INTERNAL N°/DIMENSIONS/STEEL GRADE/MANUFACTURER'S MARK

601/602/603  
Prodotto / Product Lamiera / Hot rolled plates  
Qualità / Steel grade AH36  
Normativa / Specification IACS

| B07   | B07           | B09/B11                    | B12              | B07              | B07             | B04             | C00                         | B05                 | C00            | B05 PWHT              | C00                          | B05 Q+T             | C00                          | B05 Q+T            |
|-------|---------------|----------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|----------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|
| ITEM  | LAMIERA PLATE | N° INFORM. INTERNAL NUMBER | DIMENSIONI [mm]  | PESO TEORICO [t] | TEORICAL WEIGHT | LOTTO BATCH NO. | STATO FORNITURA LAMIERA (B) | TRATT. CAMPIONE (C) | HEAT TREATMENT | TEMPERATURA INIZIO °C | VELOCITÀ RAFFREDDAMENTO °C/h | TEMPERATURA FINE °C | VELOCITÀ RAFFREDDAMENTO °C/h | PERMANENZA (Q) Min |
| 1     | ITP0490602A   | 1031307                    | 12.00X2500X12500 | 2,94             | 375416          | BO              | AR                          | [W2040]             |                |                       |                              |                     |                              |                    |
| 2     | ITP0490601A   | 1031304                    | 18.00X2500X12500 | 4,42             | 375416          | BO              | AR                          | W2040               |                |                       |                              |                     |                              |                    |
| Total |               | 2                          |                  | 7,36             |                 |                 |                             |                     |                |                       |                              |                     |                              |                    |

**C71/C92 COMPOSIZIONE CHIMICA DI COLATA / HEAT CHEMICAL ANALYSIS**

| B07                   | C71  | C72  | C73  | C74   | C75   | C76   | C77   | C78   | C79  | C80   | C81   | C82   | C83   | C84   | C85    | C86    | C87    | C88    | C89   | C90   | C91   |
|-----------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| COLATA HEAT           | C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cu    | Ni    | Cr    | Mo   | Al    | V     | Nb    | Ti    | Sn    | Ca     | N      | B      | H      | Ceq1  | Ceq2  | Pcm   |
|                       | %    | %    | %    | %     | %     | %     | %     | %     | %    | %     | %     | %     | %     | %     | %      | %      | %      | %      | % (D) | % (D) | % (D) |
| AH36 Min 0.00 - 50.00 |      |      | 0,90 |       |       |       |       |       |      | 0,020 | 0,050 | 0,020 |       |       |        |        |        |        |       |       |       |
| AH36 Max 0.00 - 50.00 | 0,18 | 1,60 | 0,50 | 0,035 | 0,035 | 0,350 | 0,400 | 0,200 | 0,08 |       | 0,100 | 0,050 | 0,020 |       |        |        |        |        |       |       |       |
| ITP049                | 0,15 | 1,48 | 0,23 | 0,016 | 0,003 | 0,030 | 0,020 | 0,040 | 0,00 | 0,032 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0090 | 0,0000 | 0,0002 | 0,40  | 0,41  | 0,24  |


| C00                    | PROVA DI TRAZIONE TENSILE TEST  |                        |                           |                                  |                  |                     |                  |                     |                  |                     | PROVA DI RESILIENZA IMPACT TEST - CHARPY V-NOTCH TEST |                     |                  |                     | PROVA DI PIEGA BEND TEST |                     |                  | PROVA DI DUREZZA HARDNESS TEST |                  |                     | PROVA DI STRIZIONE Z% TEST |                     |                  |                     |                  |                     |
|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|---|---------------------|------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
|                        | C01                             | C01                    | C02                       | C03                              | C11              | C12                 | C13              | C14                 | C10              | C41                 | C02   | C03                 | C01              | C42                 | C43                      | C02                 | C51              | C52                            | C50              | C01                 | C30                        | C31                 | C32              | C53                 | C54              |                     |
| CAMPIONE SAMPLE        | SPESORE LAMIERA PLATE THICKNESS | POSIZIONE LOCATION (1) | DIREZIONE ORIENTATION (2) | TEMPERATURA TEST TEMPERATURE (3) | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa]                                      | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa]         | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa]            | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa]           | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] | RETELLA Rm [Mpa] | RETELLA Rp0.2 [Mpa] |
| AH36 Min 0.00 - 100.00 |                                 |                        |                           | 20                               | 355              | 490                 | 0,00             | 21,0                |                  |                     |   |                     |                  |                     |                          |                     |                  |                                |                  |                     |                            |                     |                  |                     |                  |                     |
| AH36 Max 0.00 - 100.00 |                                 |                        |                           | 20                               | 0                | 620                 | 0,00             | 0,0                 |                  |                     |   |                     |                  |                     |                          |                     |                  |                                |                  |                     |                            |                     |                  |                     |                  |                     |
| AH36 Min 0.00 - 50.00  |                                 |                        |                           | 20                               | 443              | 568                 | 0,78             | 26,6                |                  |                     |   |                     |                  |                     |                          |                     |                  |                                |                  |                     |                            |                     |                  |                     |                  |                     |
| W2040                  | 18,00                           | 2                      | P                         | T                                | 20               | 443                 | 568              | 0,78                | 26,6             |                     |   |                     |                  |                     |                          |                     |                  |                                |                  |                     |                            |                     |                  |                     |                  |                     |

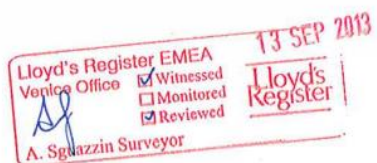
UNI EN ISO 6892-1:2009 / UNI EN ISO 148-1:2011

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

| Z01  |  |   |  |   |                       |
|------|--|---|--|---|-----------------------|
| ITEM | TOLLERANZA DI SPESSORE<br>TOLERANCE ON THICKNESS | TOLLERANZE DI LARGHEZZA<br>TOLERANCE ON WIDTH | TOLLERANZE DI LUNGHEZZA<br>TOLERANCE ON LENGTH | CONDIZIONI SUPERFICIALI<br>SURFACE FINISH | PLANARITÀ<br>FLATNESS |
| 1    | EN 10029 CL.B                                    | -0+100 MM                                     | -0+200 MM                                      | EN 10163/2 CL B2                          | EN 10029 CL. N        |
| 2    | EN 10029 CL.B                                    | -0+100 MM                                     | -0+200 MM                                      | EN 10163/2 CL B2                          | EN 10029 CL. N        |

CERTIFICHIAMO che le lamiere elencate sono conformi alla prescrizione dell'ordine, che i controlli della marcatura, dell'aspetto superficiale e dimensionale hanno dato esito positivo.  
WE CERTIFY that the above mentioned plates are consistent with the order prescriptions: marking, inspection and measurement without objection.

| Z06  |   |  |
|--|---|--|
| Z07  | Z03 ENTE COLLAUDO / INSPECTION BODY                             | Z02  |
| We hereby certify that the material has been made by an approved process and satisfactorily tested in accordance with the Rules of Lloyd's Register. | TIMBRO DELL'ISPETTORE<br>STAMP OF THE INSPECTION REPRESENTATIVE | METINVEST TRAMETAL S.p.A.<br>F. Andrian<br>Lab. Test Resp.  |







Especificación de Procedimiento de Soldadura según EN ISO 15609-1:2005 (WPS)

WPS Nº: AI.MOSAIC-001

Revisión: 0

Fecha: 01/2014

Hoja: 1 de 1

EN ISO 15609-1:2005 Welding Procedure Specification (WPS)

|                                     |                         |                                 |                                |                                     |                  |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Empresa<br>Company name             | Technology Centre AIMEN |                                 | Realizado por<br>Originated by | Aurora López Mariño                 |                  |
| Proceso de soldo<br>Welding process | 136 (FAW)               | Tipo de proceso<br>Process type | Totally mechanized             | WPQR soporte<br>Supporting WPQR     | AI.MOSAIC.QR-001 |
|                                     |                         |                                 |                                | Revisión - Fecha<br>Revision - Date | 0 - 01/2014      |

Diseño de unión / Joint design

Secuencia de soldo / Welding sequence



|  |   |  |               |
|--|---|--|---------------|
| Tipo de unión<br>Joint type  | BW (BUTT WELDING) AND FW (FILLET WELDING) | Pre calentamiento / Preheat                                      |               |
| Método de preparación y limpieza<br>Preparation and cleaning method    | GRINDING AND BRUSHED                      | Temperatura pre calentamiento min.<br>Preheat temperature, min.  | ≥ 5 °C        |
| Respaldo<br>Backing  | WITH CERAMIC BACKING                      | Temperatura entre pasadas máx.<br>Interpass temperature, max.    | ≤ 150 °C      |
| Resanado<br>Back gouging   | WITH AND WITHOUT BACK GOUGING             | Temperatura de mantenimiento<br>Maintenance temperature          | NO            |
| Pasadas múltiples / simples (por lado)<br>Multi/single pass (per side) | MULTIPLE PASS                             | Sistema de calentamiento<br>Heat system                          | FLAME         |
| Posición<br>Position   | D POSITION                                | Sistema de control de temperaturas<br>Temperature control system | THERMAL CHALK |

Metales base / Base metals

Tratamiento térmico postsoldo / PWHT

|  |   |  |     |
|--|---|--|-----|
| Grupo (Especificación tipo o grado)<br>Group (Specification type or grade) | GRUPO 1.2 (ISO/TR 15608:2006 IN) Carbon steel R <sub>yk</sub> ≤ 355 N/mm <sup>2</sup> with Carbon steel R <sub>yk</sub> ≤ 460 N/mm <sup>2</sup> | Temperatura<br>Temperature                                 | N/A |
| Espesor (mm)<br>Thickness (mm)   | 9 – 36  | Tiempo<br>Time   | -   |
| Diámetro exterior (mm)<br>External diameter (mm)                           | -   | Velocidad de subida de temperatura<br>Up temperature speed | -   |

Materiales de aportación / Filler materials

|   |                         |  |           |
|---|-------------------------|--|-----------|
| Marca<br>Brand name                           | FLUXOFIL 14HD           | Temperatura para velocidad libre<br>Temperature for free speed | -         |
| Clasificación<br>Classification               | EN 758: T 46 2 P C 1 H5 | Velocidad de bajada de temperatura<br>Down temperature speed   | -         |
| Requisitos de secado<br>Dried requirements    | NOT REQUIRED            | Recta u ondulante<br>Stringer or wave bead                     | WAVE BEAD |
| Flux (Clasificación)<br>Flux (Classification) | -                       |  |           |

Otra información / Other information

Gas / Shielding, trailing or backing gas

|  |   |  |                                    |
|--|---|--|------------------------------------|
| Composición<br>Composition   | 100% CO <sub>2</sub>                      | Electrodo simple o múltiple<br>Single or multiple electrodes                   | SINGLE ELECTRODE                   |
| Clasificación / Tipo<br>Classification / Type                            | UNE-EN ISO 14175:2009-C1 / HIGHLY OXIDANT | Tamaño y tipo electrodo tungsteno<br>Tungsten electrode size and type          | N/A                                |
| Caudal (litr/min)<br>Flow rate (litr/min)                                | 15 ltr/min                                | Modo de transferencia para GMAW<br>Mode of metal transfer for GMAW             | SHORT-CIRCUIT // GLOBULAR TRANSFER |
| Protección, arrastre, y/o respaldo<br>Shielding, trailing and/or backing | SHIELDING                                 | Distancia boquilla contacto a pieza (mm)<br>Contact tube to work distance (mm) | 20                                 |
| Diámetro de la boquilla (mm)<br>Gas cup size (mm)                        | 15,5 mm                                   | Marfileado<br>Peening  | NO                                 |

Parámetros de soldo / Welding parameters

| Pasada<br>Pass                      | Proceso<br>Process | Tamaño metal aportación<br>Filler metal size (mm) | Corriente<br>Current |                  |                                     | Velocidad alimentación<br>Wire feed speed (m/min) | Velocidad avance<br>Travel speed (cm/min) | Aporte térmico<br>Heat input (kJ/cm) |
|-------------------------------------|--------------------|---|----------------------|------------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
|                                     |                    |   | Amperios<br>Amps     | Voltios<br>Volts | Tipo y polaridad<br>Type & polarity |   |   |                                      |
| 1 <sup>ª</sup> RUN (ROOT RUN)       | 136                | 1,2   | 175-270              | 18,5-29          | DC (+)                              | -   | 19,4-28                                   | 8-13,4                               |
| 2 <sup>ª</sup> / 3 <sup>ª</sup> RUN | 136                | 1,2   | 215-337              | 23,5-36          | DC (+)                              | -   | 26-37,5                                   | 9,3-15,5                             |
| REST OF RUN                         | 136                | 1,2   | 215-330              | 25,2-35          | DC (+)                              | -   | 30-38                                     | 8,7-14,6                             |

Fabricante / Manufacturer

Inspección / Surveying


|                    |               |   |                    |                    |               |                               |                    |
|--------------------|---------------|---|--------------------|--------------------|---------------|-------------------------------|--------------------|
| Empresa<br>Company | Fecha<br>Date | Responsable de soldadura<br>Welding Manager | Firma<br>Signature | Empresa<br>Company | Fecha<br>Date | Inspección<br>Inspector       | Firma<br>Signature |
| aimen              | 01/2014       | Isabel Villar Crespo<br>IWE-ES-614          |                    | Lloyd's Register   | 01/2014       | Lloyd's Register<br>Inspector |                    |



Especificación de Procedimiento de Soldo (WPS) según EN ISO 15609-1:2005 con la colaboración de AIMEN  
EN ISO 15609-1:2005 Welding Procedure Specification (WPS) with AIMEN collaboration

|   |   |                           |
|---|---|---------------------------|
|  | Registro de Cualificación de Procedimiento de Soldeo (WPQR)       | WPQR Nº: AI.MOSAIC.QR-001 |
|   | según EN ISO 15614-1:2005   | Revisión 0                |
|   | EN ISO 15614-1:2005 Welding Procedure Qualification Record (WPQR) | Fecha: 01/2014            |
|   |   | Hoja: 1 de 3              |

**Cualificación del procedimiento de soldeo – Certificado del ensayo**  
**Welding procedure qualification – Test certificate**




|   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| Fabricante<br>Manufacturer                      | Technology Centre AIMEN                        | Examinador<br>Examiner                 | Victor Solano   |
| Dirección<br>Address                            | C/ Relva, 27 A-Torneiros                       | Organismo examinador<br>Examining body |  |
| Código/Norma<br>Code/Testing standard           | Lloyd's Register Rules/UNE-EN ISO 15614-1:2005 | Nº de referencia<br>Reference Nº       | 107405-14   |
| Coordinador de soldadura<br>Welding coordinator | Isabel Villar Crespo<br>IWE-ES-614             | Fecha del soldeo<br>Date of welding    | 28/01/2014  |

**Rango de cualificación**  
**Range of qualification**

|  |  |
|--|--|
| Proceso(s) de soldeo<br>Welding process(es)  | 136 (FAW)  |
| Tipo de unión y de soldadura<br>Type of joint and weld                               | BW (BUTT WELDING) AND FW (FILLET WELDING) // WITH AND WITHOUT BACK GOUGING   |
| Grupo(s) o subgrupo(s) del material base<br>Parent material group(s) and subgroup(s) | GRUPO 1.2 (ISO/TR 15608:2006 in)<br>Carbon steel $R_{eH} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ with Carbon steel $R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ |
| Espesor del material base (mm)<br>Parent material thickness (mm)                     | BW: 9-36<br>FW: 9-36   |
| Espesor del material de soldadura (mm)<br>Weld metal thickness (mm)                  | $\leq 36$  |
| Espesor de garganta (mm)<br>Throat thickness (mm)                                    | 9-36 (a=1)   |
| Pasada simple/múltiple<br>Single run/Multi run                                       | MULTIPLE PASS  |
| Diametro exterior del tubo (mm)<br>Outside pipe diameter (mm)                        | *  |
| Designación del material de aportación<br>Filler material designation                | EN 758: T 46 2 P C 1 H5  |
| Marca del material de aportación<br>Filler material make                             | FLUXOFIL 14HD, without restriction for wires with the same designation and nominal chemical composition                              |
| Tamaño del material de aportación<br>Filler material size                            | Without restriction as long as the electric parameters are in the limits of the HI qualified   |
| Designación del fundente<br>Designation of flux                                      | N/A  |
| Designación del gas de protección<br>Designation of shielding gas                    | UNE-EN ISO 14175:2009-C1 / HIGHLY OXIDANT  |
| Designación del gas de resguardo<br>Designation of backing gas                       | N/A  |
| Tipo de corriente de soldeo y polaridad<br>Type of welding current and polarity      | DC (+)   |
| Modo de transferencia del metal<br>Mode of metal transfer                            | SHORT-CIRCUIT TRANSFER // GLOBULAR TRANSFER  |
| Aporte térmico<br>Heat input   | 8,0-15,5 kJ/cm EN 1011-1 (HI calculated with efficiency ratio $K=0.8$ , according to EN 1011-1)                                      |
| Posiciones de soldeo<br>Welding position   | D POSITION   |
| Temperatura precalentamiento<br>Preheat temperature                                  | $\geq 5 \text{ }^\circ\text{C}$  |
| Temperatura entre pesadas<br>Interpass temperature                                   | $\leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$  |
| Post-calentamiento<br>Post-heating   | N/A  |
| Tratamiento térmico post soldeo<br>Post welding heat treatment                       | N/A  |
| Recta u oscilante<br>Stringer or wave bead   | WAVE BEAD  |
| Electrodo simple o múltiple<br>Single or multiple electrodes                         | SINGLE ELECTRODE   |
| Distancia boquilla contacto a pieza (mm)<br>Contact tube to work distance (mm)       | 15-20  |

Nosotros, los firmantes, certificamos que las soldaduras de ensayo han sido preparadas, soldadas y ensayadas satisfactoriamente de acuerdo con los requisitos del código/norma de ensayo EN ISO 15614-1:2005.

We, the undersigned, certify that test welds prepared, welded, and tested satisfactorily in accordance with the requirements of the code/testing standard EN ISO 15614-1:2005.

| Fabricante / Manufacturer   |               |   |   | Examinador / Examiner                  |               |                                   |   |
|---|---------------|---|---|--|---------------|-----------------------------------|---|
| Empresa<br>Company  | Fecha<br>Date | Coordinador de soldadura<br>Welding coordinator | Firma<br>Signature  | Organismo examinador<br>Examining body | Fecha<br>Date | Persona examinadora<br>Examiner   | Firma<br>Signature  |
|  | 28/01/2014    | Isabel Villar Crespo<br>IWE-ES-614              |  | Lloyd's Register                       | 01/2014       | Victor Solano<br>Lloyd's Register |  |



Registro de Cualificación de Procedimiento de Soldeo (WPQR) según EN ISO 15614-1:2005  
 con la colaboración de AIMEN  
 EN ISO 15614-1:2005 Welding Procedure Approval Record (WPQR) with AIMEN collaboration





Registro de Cualificación de Procedimiento de Soldeo (WPQR)  
según EN ISO 15614-1:2005  
EN ISO 15614-1:2005 Welding Procedure Qualification Record (WPQR)

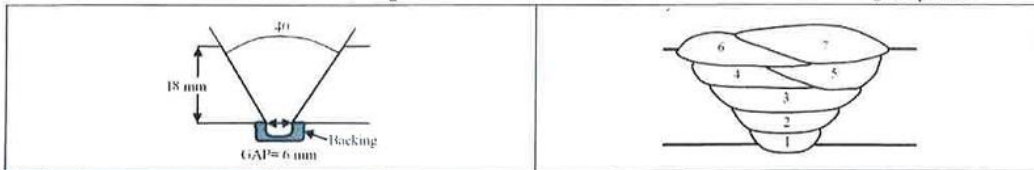
WPQR Nº: AI.MOSAIC-QR-001  
Revisión: 0  
Fecha: 01/2014  
Hoja: 2 de 3

Registro del ensayo de la soldadura / Record of weld test

|  |                                 |                                 |                                   |                                 |               |
|--|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| Lugar<br>Location                        | O Porriño                       |                                 | Examinador<br>Examiner            | Victor Solano                   |               |
| Fabricante<br>Manufacturer               | Technology Centre AIMEN         |                                 | Org. examinador<br>Examining body | Lloyd's Register                |               |
| Coordinador sold.<br>Welding coordinator | Isabel Villar Crespo IWE-ES 614 |                                 | Nombre soldador<br>Welder name    | Aurora López Mariño             |               |
| Proceso de soldeo<br>Welding process     | 136 (FCAW)                      | Tipo de proceso<br>Process type | Totally mechanized                | WPS soportados<br>Supported WPS | AI.MOSAIC-001 |
|  |                                 |                                 |                                   | Fecha de prueba<br>Test date    | 28/01/2014    |

Diseño de unión / Joint design

Secuencia de soldeo / Welding sequence



|  |                            |  |               |
|--|----------------------------|--|---------------|
| Tipo de unión<br>Joint type  | BW (BUTT WELDING)          | Pre calentamiento / Preheat                                      |               |
| Método de preparación y limpieza<br>Preparation and cleaning method    | GRINDING AND BRUSHED       | Temperatura pre calentamiento mín.<br>Preheat temperature, min.  | ≥ 5 °C        |
| Respaldo (Material de respaldo)<br>Backing (Backing material)          | CERAMIC BACKING (CBS-2706) | Temperatura entre pesadas máx.<br>Interpass temperature, max.    | ≤ 250 °C      |
| Resanado (Método de resanado)<br>Back gouging (Back gouging method)    | WITHOUT BACK GOUGING       | Temperatura de mantenimiento<br>Maintenance temperature          | N/A           |
| Pasadas múltiples / simples (por lado)<br>Multi/single pass (per side) | MULTIPLE PASS              | Sistema de calentamiento<br>Heat system                          | FLAME         |
| Posición<br>Position   | D POSITION                 | Sistema de control de temperaturas<br>Temperature control system | THERMAL CHALK |

Metales base / Base metals

Tratamiento térmico postsoldo / PWHT

|   |   |  |     |
|---|---|--|-----|
| Especificación tipo o grado (Nº colada)<br>Spec. type or grade (Heat No.) | AH36 (1TL510)<br>Carbon steel $R_{m} \leq 355 \text{ N/mm}^2$ | Temperatura<br>Temperature                                   | N/A |
| Espesor (mm)<br>Thickness (mm)  | 18  | Tiempo<br>Time   | N/A |
| Diámetro exterior (mm)<br>External diameter (mm)                          | N/A   | Velocidad de subida de temperatura<br>Up temperature speed   | N/A |
|   |   | Velocidad de bajada de temperatura<br>Down temperature speed | N/A |

Materiales de aportación / Filler materials

Otra información / Other information

|   |                         |  |  |
|---|-------------------------|--|--|
| Marca (Nº lote)<br>Brand name (lot No.)           | FLUXOFIL 14HD           | Temperatura para velocidad libre<br>Temperature for free speed | N/A  |
| Clasificación<br>Classification                   | EN 758: T 46 2 P C 1 H5 | Recta u oscilante (oscilación máx.)<br>Stringer or wave bead   | WAVE BEAD<br>Root run: Amplitude: 0,5 mm/Frequency: 1,5 Hz/Timer: 0 s<br>2 <sup>nd</sup> / 3 <sup>rd</sup> run: Amplitude: 2 mm/Frequency: 3 Hz/Timer: 0 s |
| Flux marca (Nº lote)<br>Flux brand name (lot No.) | N/A                     |  |  |
| Flux clasificación<br>Flux classification         | N/A                     |  |  |

Gas / Shielding, trailing or backing gas

|  |   |  |                                    |
|--|---|--|------------------------------------|
| Composición (Marca)<br>Composition (Brand name)                          | 100% CO <sub>2</sub>                      | Electrodo simple o múltiple<br>Single or multiple electrodes                   | SINGLE ELECTRODE                   |
| Clasificación / Tipo<br>Classification / Type                            | UNE-EN ISO 14175:2009-C1 / HIGHLY OXIDANT | Tamaño y tipo electrodo tungsteno<br>Tungsten electrode size and type          | N/A                                |
| Caudal (ltr/min)<br>Flow rate (ltr/min)                                  | 15 ltr/min                                | Modo de transferencia para GMAW<br>Mode of metal transfer for GMAW             | SHORT-CIRCUIT // GLOBULAR TRANSFER |
| Protección, arrastra, y/o respaldo<br>Shielding, trailing and/or backing | SHIELDING                                 | Distancia boquilla contacto a pieza (mm)<br>Contact tube to work distance (mm) | 20                                 |
| Diámetro de la boquilla (mm)<br>Gas cup size (mm)                        | 15,5 mm                                   | Martillado<br>Peening  | NO                                 |

Parámetros de soldeo / Welding parameters

| Pasada<br>Pass                        | Proceso<br>Process | Tamaño metal aportación<br>Filler metal size (mm) | Corriente<br>Current |                  |                                     | Velocidad alimentación<br>Wire feed speed (m/min) | Velocidad avance<br>Travel speed (cm/min) | Aporte térmico<br>Heat input (kJ/cm) |
|---------------------------------------|--------------------|---|----------------------|------------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
|                                       |                    |   | Amperios<br>Amps     | Voltios<br>Volts | Tipo y polaridad<br>Type & polarity |   |   |                                      |
| 1 <sup>st</sup> (root run)            | 136                | Ø 1,2   | 230                  | 24,3             | DC (+)                              | 11,8  | 25  | 13,4 (10,7)                          |
| 2 <sup>nd</sup> / 3 <sup>rd</sup> run | 136                | Ø 1,2   | 275                  | 32               | DC (+)                              | 14,8  | 34  | 15,5 (12,4)                          |
| Rest of run                           | 136                | Ø 1,2   | 275                  | 30               | DC (+)                              | 14,8  | 34  | 14,5 (11,6)                          |



Registro de Cualificación de Procedimiento de Soldeo (WPQR) según EN ISO 15614-1:2005  
con la colaboración de AIMEN  
EN ISO 15614-1:2005 Welding Procedure Approval Record (WPQR) with AIMEN collaboration



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΤΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ



Registro de Cualificación de Procedimiento de Soldeo (WPQR)  
según EN ISO 15614-1:2005  
EN ISO 15614-1:2005 Welding Procedure Qualification Record (WPQR)

WPQR N°: AI.MOSAIC.QR-001  
Revisión 0  
Fecha: 01/2014  
Hoja: 3 de 3

Inspecciones y ensayos / Inspections and tests

|   | Normas Norms          | Resultado Results | Informe Nº Record No. | Fecha Date | Realizado por Conducted by | Observaciones Remarks |
|---|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------|----------------------------|-----------------------|
| Inspección visual Visual inspection                 | UNE-EN ISO 17637:2011 | Accepted          | 107405.14.4.0         | 03/02/2014 | Aarón Carrera              | -                     |
| Examen con part. magnéticas Magnetic particles test | UNE-EN ISO 17638:2010 | Accepted          | 107405.14.5.0         | 03/02/2014 | Aarón Carrera              | -                     |
| Examen radiográfico Radiographic test               | UNE-EN 1435:2006      | Accepted          | 107405.14.6.0         | 03/02/2014 | Aarón Carrera              | -                     |
| Examen macrográfico Macrographic examination        | UNE-EN ISO 17639:2013 | Accepted          | 107405.14.7.0         | 19/02/2014 | -                          | -                     |

| Ensayo de tracción / Tension test |                   | Informe Nº Record No.               | 107405.14.7.0                       | Fecha Date | 18/02/2014 | Realizado por Conducted by      |   |                            |                       |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|------------|---------------------------------|---|----------------------------|-----------------------|
| Nº No.                            | Tipo Type         | Re R <sub>e</sub> N/mm <sup>2</sup> | Rm R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup> | A %        | Z %        | Sección Section mm <sup>2</sup> | Localización de la rotura Fracture localization | Temperatura Temperature °C | Observaciones Remarks |
| Requisitos Requirements           |                   |                                     |                                     |            |            |                                 |   |                            |                       |
| 1                                 | Cross weld sample | 355                                 | 490                                 | 21         | -          | 454,29                          | Metal base                                      | 15                         | -                     |
| 2                                 | Cross weld sample | -                                   | 519                                 | -          | -          | 454,64                          | Metal base                                      | 15                         | -                     |

| Ensayo de doblado / Bend test |            | Informe Nº Record No.        | 107405.14.7.0       | Fecha Date              | 18/02/2014       | Realizado por Conducted by |                       |
|-------------------------------|------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|
| Nº No.                        | Tipo Type  | Angulo de doblado Bend angle | Ø mandril Mandrel Ø | Alargamiento Elongation | Resultado Result | Temperatura Temperature    | Observaciones Remarks |
| 1                             | Side bends | 180°                         | 4 x thickness       | 20.5                    | Without cracking | 15°                        | -                     |
| 2                             | Side bends | 180°                         | 4 x thickness       | 23.5                    | Without cracking | 15°                        | -                     |
| 3                             | Side bends | 180°                         | 4 x thickness       | 21.0                    | Without cracking | 15°                        | -                     |
| 4                             | Side bends | 180°                         | 4 x thickness       | 23.0                    | Without cracking | 15°                        | -                     |

| Ensayo de impacto / Impact test   |                         | Informe Nº Record No. | 107405.14.7.0 | Fecha Date | 18/02/2014    | Realizado por Conducted by |                           |                       |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|------------|---------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Situación entalla Notch situation | Temperatura Temperature | Valores Values        |               |            | Media Average | Requisitos Requirements    | Tipo / Tamaño Type / Size | Observaciones Remarks |
| VWT 0/0 (Weld bead)               | 0°                      | 89 J                  | 87 J          | 96 J       | 91,3 J        | 34 J                       | 10x10                     | -                     |
| VHT (Fusion line)                 | 0°                      | 96 J                  | 83 J          | 86 J       | 88,3 J        | 34 J                       | 10x10                     | -                     |
| VHT 2/0 (FL + 2 mm)               | 0°                      | 66 J                  | 99 J          | 70 J       | 78,3 J        | 34 J                       | 10x10                     | -                     |

| Ensayo de dureza / Hardness test |                         | Informe Nº Record No.   | 107405.14.7.0 | Fecha Date | 18/02/2014                      | Realizado por Conducted by |                       |                          |                       |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Situación Situation              | Metal base Base metal   | ZAT TAZ                 |               |            | Metal de soldadura Filler metal | ZAT TAZ                    | Metal base Base metal | Tipo / Carga Type / Load | Observaciones Remarks |
| Line I (face line)               | 154 156 160 221 254 277 | 216 182 190 276 274 260 | 156 150 161   | HV10       | -                               |                            |                       |                          |                       |
| Line II (root line)              | 158 171 161 181 187 177 | 208 214 201 176 175 171 | 162 164 152   | HV10       | -                               |                            |                       |                          |                       |

Nosotros, los firmantes, certificamos que las soldaduras de ensayo han sido preparadas, soldadas y ensayadas satisfactoriamente de acuerdo con los requisitos del código/norma de ensayo EN ISO 15614-1:2005.  
We, the undersigned, certify that test welds prepared, welded, and tested satisfactorily in accordance with the requirements of the code/testing standard EN ISO 15614-1:2005.

| Fabricante / Manufacturer |            |  |                 | Examinador / Examiner               |            |                              |                 |
|---------------------------|------------|--|-----------------|-------------------------------------|------------|------------------------------|-----------------|
| Empresa Company           | Fecha Date | Coordinador de soldadura Welding coordinator | Firma Signature | Organismo examinador Examining body | Fecha Date | Persona examinadora Examiner | Firma Signature |
| aimen                     | 28/01/2014 | Isabel Villar Crespo IWE-ES-614              |                 | Lloyds Register                     | 04/2014    | Vicente Solano Initials VS   |                 |



Registro de Cualificación de Procedimiento de Soldeo (WPQR) según EN ISO 15614-1:2005  
con la colaboración de AIMEN  
EN ISO 15614-1:2005 Welding Procedure Approval Record (WPQR) with AIMEN collaboration



**Certificado de Ensayo de Cualificación de Operador de Soldeo según EN 14732:2013**  
EN 14732:2013 Welding Operator's Qualification Test Certificate

WPO N°: ALM.AL.MOSAIC-001  
Revisión: 0  
Fecha: 01/2014  
Hoja: 1 de 1

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| Nombre del operador / Welding operator name                                   | Aurora López Mariño  | Fecha de prueba / Test date                         | The 28 <sup>th</sup> of January of 2014 |
| Número de DNI / ID Number   | 33994076-F   | Nº de WPS / WPS No.                                 | AL.MOSAIC-001                           |
| Fecha nacimiento / Birth date   | June 21 <sup>st</sup> , 1982   | Examinador / Examiner                               | Victor Solano                           |
| Identificación / Identification   | ALM  | Organismo Examinador / Examiner Body                | Lloyds Register                         |
| Empresa / Employer  | <b>aimen</b>   | Evaluación conocimientos / Job knowledge            | YES                                     |
| <b>Variables / Variables</b>  | <b>Valores de la prueba / Test values</b>                            | <b>Rango de cualificación / Qualification range</b> |   |
| Proceso de soldeo / Welding process   | 136 (FCAW)   | 13 (Gas-shielded metal arc welding)                 |   |
| Unidad de soldeo / Welding unit   | Robot PANASONIC VR-006-GII   |   |   |
| Equipo de soldeo / Welding equipment  | Welding Torch ROBO VTS 500TS<br>Welding Machine PANASONIC YD-350 GE2 | Similar Equipment                                   |   |
| Detalles de acuerdo con el apartado 4.2.3 / Details according to part 4.2.3   |  |   |   |
| Control Visual/control visual remoto / Visual Control / Visual Remote Control | Visual Control   | With visual Control                                 |   |
| Control automático de longitud de arco / Automatic control of arc length      | YES  | With automatic control of arc length                |   |
| Seguimiento automático de junta / Auto Tracking joint                         | NO   | With and without sensor                             |   |
| Posición de soldeo / Welding position   | PA   | PA  |   |
| Pasadas múltiples / simples (por lado) / Multi/single pass (per side)         | Multiple Pass  | Single or multiple pass                             |   |
| Respaldo / Backing  | YES  | With backing  |   |
| Inserto Consumible / Consumable Insert  | NO   | With and without insert                             |   |

Información adicional en la especificación de procedimiento de soldeo / Additional information in welding procedure specification

| La cualificación se basa en: / Qualification is based on:  |     |
|--|-----|
| Ensayos de procedimiento de soldeo según el apartado 4.1 / Welding procedure tests according to part 4.1               | YES |
| Ensayos de soldeo anteriores a la producción según el apartado 4.1 / Preproduction welding tests according to part 4.1 | NO  |
| Ensayo de muestras de producción según el apartado 4.1 / Production probes tests according to part 4.1                 | NO  |
| Ensayo de funcionamiento según el apartado 4.1 / Service tests according to part 4.1                                   | NO  |

Inspecciones y ensayos / Inspections and tests

|  | Resultado / Results | Observaciones / Remarks | Informe N° / Record No. | Fecha / Date |
|--|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
| Inspección visual / Visual testing   | Accepted            | -                       | 107405.14.4.0           | 03/02/2014   |
| Líquidos penetrantes o partículas magnéticas / Dye penetrant test or magnetic particles test | Accepted            | -                       | 107405.14.5.0           | 03/02/2014   |
| Examen radiográfico o ultrasonidos / Radiographic or ultrasonic test                         | Accepted            | -                       | 107405.14.6.0           | 03/02/2014   |
| Ensayo de doblado / Bend test  | Accepted            | -                       | 107405.14.7.0           | 18/02/2014   |
| Examen macroscópico / Macroscopic examination  | Accepted            | -                       | 107405.14.7.0           | 19/02/2014   |
| Examen de microdurezas / Microhardness examination   | Accepted            | -                       | 107405.14.7.0           | 18/02/2014   |
| Ensayos de tracción / Tensile tests  | Accepted            | -                       | 107405.14.7.0           | 18/02/2014   |
| Ensayos de impacto / Impact tests  | Accepted            | -                       | 107405.14.7.0           | 18/02/2014   |

Validez y renovaciones / Validity & renewals

|   | Fabricante / Manufacturer |                   | Examinador / Examiner |                   |
|---|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Nombre y apellidos / Empresa / Name & surname / Company   | Isabel Villar Crespo      | <b>aimen</b>      | Victor Solano         | Lloyds Register   |
|   | Fecha / Date              | Firma / Signature | Fecha / Date          | Firma / Signature |
| According to chapter 5: Prolongation of qualification every six months by the company or the welding coordinator. Prolongation of qualification every three years by an examiner or Examiner Body<br><br>Según capítulo 5: Renovación de la cualificación por la empresa o coordinador de soldadura para los seis meses siguientes. Renovación de la cualificación por la persona u organismo examinador para los tres años siguientes. | 01/2014-06/2014           |                   | 01/2014-01/2017       |                   |
|   | 06/2014-01/2015           |                   |                       |                   |
|   | 01/2015-06/2015           |                   |                       |                   |
|   | 06/2015-01/2016           |                   |                       |                   |
|   | 01/2016-06/2016           |                   |                       |                   |
|   | 06/2016-01/2017           |                   |                       |                   |
|   | 01/2017-06/2017           |                   | 01/2017-01/2020       |                   |
|   | 06/2017-01/2018           |                   |                       |                   |
|   | 01/2018-06/2018           |                   |                       |                   |
|   | 06/2018-01/2019           |                   |                       |                   |
| 01/2019-06/2019   |                           |                   |                       |                   |
| 06/2019-01/2020   |                           |                   |                       |                   |



**Certificado de Ensayo de Cualificación del Operador de Soldeo según EN 14732:2013 con la colaboración de AIMEN**  
EN 14732:2013 Welding Operator's Qualification Test Certificate with AIMEN collaboration  
Καταρτισμένο σύμφωνα με τον EN 14732:2013 με τη βοήθεια της AIMEN, πιστοποιημένο από το Lloyd's Register.





Registro Conocimiento Apropiado del Funcionamiento de la Unidad de Soldeo según EN 14732:2013

Revisión: 0  
Fecha: 28/01/2014  
Hoja: 1 de 1

**A.1 Generalidades**

|                                      |                     |                                       |                 |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------|
| Nombre del soldador<br>Welder's name | Aurora López Mariño | Fecha de prueba<br>Test date          | 28/01/2014      |
| Número de DNI<br>ID Number           | 33994076-F          | Examinador<br>Examiner                | Victor Solano   |
| Datos de nacimiento<br>Birth data    | 21/06/1982          | Organismo Examinador<br>Examiner Body | Lloyds Register |
| Firma<br>Signature                   |                     | Nº de WPS<br>WPS No.                  | AI.MOSAIC-001   |
| Empresa<br>Company                   | <b>aimen</b>        |                                       |                 |

**A.2 Secuencias/procedimientos de soldeo en el proceso relevante**

|  |    |                                     |    |                          |      |               |  |
|--|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|---------------|--|
| Reconocimiento de los requisitos de soldado e influencia de los parámetros de soldeo | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |
|--|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|---------------|--|

**A.3 Preparación de la unión y representación de soldadura en el proceso relevante**

|  |    |                                     |    |                          |      |               |  |
|--|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|---------------|--|
| Conformidad de la preparación de la unión con el WPS | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |
| Limpieza de las caras de fusión                      | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |

**A.4 Imperfecciones de soldadura en el proceso relevante**

|   |    |                                     |    |                          |      |               |  |
|---|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|---------------|--|
| Identificación de las imperfecciones de soldadura | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |
| Causas  | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |
| Prevención y acción correctiva                    | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |

**A.5 Cualificación del operador de soldeo o ajustador de soldadura**

|   |    |                                     |    |                          |      |               |  |
|---|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|---------------|--|
| Conocimientos sobre el rango de cualificación | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones |  |
|---|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|---------------|--|

**A.6 Proceso de operación**

|   |    |                                     |    |                          |      |                                     |               |
|---|----|-------------------------------------|----|--------------------------|------|-------------------------------------|---------------|
| Conocimientos de programación   | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones                       |               |
| Conocimientos de los sistemas de control y señales dadas por el sistema | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones                       |               |
| Sistema de movimiento   | Si | <input type="checkbox"/>            | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | <input checked="" type="checkbox"/> | Observaciones |
| Equipo auxiliar   | Si | <input type="checkbox"/>            | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | <input checked="" type="checkbox"/> | Observaciones |
| Utillajes e instalaciones y puesta a punto                              | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones                       |               |
| Parámetros y ajustes dados en los procedimientos                        | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones                       |               |
| Reglamentación de seguridad y prevención                                | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones                       |               |
| Procedimientos de Arranque y parada                                     | Si | <input checked="" type="checkbox"/> | No | <input type="checkbox"/> | N.A. | Observaciones                       |               |

| Fabricante / Manufacturer |               |   |                    | Examinador / Examiner                  |               |                                 |                    |
|---------------------------|---------------|---|--------------------|--|---------------|---------------------------------|--------------------|
| Empresa<br>Company        | Fecha<br>Date | Coordinador de soldadura<br>Welding coordinator | Firma<br>Signature | Organismo examinador<br>Examining body | Fecha<br>Date | Persona examinadora<br>Examiner | Firma<br>Signature |
| <b>aimen</b>              | 28/01/2014    | Isabel Villar Crespo<br>IWE-ES-614              |                    | Lloyds Register                        | 28/01/2014    | Victor Solano                   |                    |



Registro Conocimiento Apropiado del Funcionamiento de la Unidad de Soldeo según EN 14732:2013

• FCAW

Πίνακας 1 : Μεταβολή μικροσκληρότητας στην περιοχή 1.

| Περιοχή                  | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Μέταλλο Βάσης            | 172,7                             | -10,5           |
|                          | 183,6                             | -10,15          |
|                          | 180,4                             | -9,8            |
|                          | 172,6                             | -9,45           |
|                          | 175,4                             | -9,1            |
|                          | 182,1                             | -8,75           |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 183,7                             | -8,4            |
|                          | 183,2                             | -8,05           |
|                          | 177                               | -7,7            |
|                          | 185                               | -7,35           |
|                          | 183,1                             | -7              |
|                          | 188,8                             | -6,65           |
| Ζώνη Τήξης               | 190,5                             | -6,3            |
|                          | 191,8                             | -5,95           |
|                          | 202,6                             | -5,6            |
|                          | 194                               | -5,25           |
|                          | 194,7                             | -4,9            |
|                          | 182,9                             | -4,55           |
|                          | 192,3                             | -4,2            |
|                          | 183                               | -3,85           |
|                          | 183,6                             | -3,5            |
|                          | 183,6                             | -3,15           |
|                          | 185,5                             | -2,8            |
|                          | 185,6                             | -2,45           |
|                          | 178,6                             | -2,1            |
|                          | 173,4                             | -1,75           |
|                          | 186,3                             | -1,4            |
|                          | 180,2                             | -1,05           |
|                          | 191,1                             | -0,7            |
|                          | 185                               | -0,35           |
|                          | 175                               | 0               |
|                          | 180,6                             | 0,35            |
|                          | 191,5                             | 0,7             |
|                          | 179,8                             | 1,05            |
|                          | 176,7                             | 1,4             |
|                          | 187,6                             | 1,75            |
|                          | 180,7                             | 2,1             |
|                          | 186,2                             | 2,45            |
| 177,8                    | 2,8                               |                 |
| 181,7                    | 3,15                              |                 |
| 180,6                    | 3,5                               |                 |
| 184,5                    | 3,85                              |                 |
| 182,9                    | 4,2                               |                 |

|                                 |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|
|                                 | 185,4 | 4,55  |
|                                 | 198,8 | 4,9   |
|                                 | 178,1 | 5,25  |
|                                 | 182   | 5,6   |
| <b>Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη</b> | 174,6 | 5,95  |
|                                 | 195,4 | 6,3   |
|                                 | 179,2 | 6,65  |
|                                 | 181,4 | 7     |
|                                 | 172,3 | 7,35  |
|                                 | 180,6 | 7,7   |
|                                 | 179,9 | 8,05  |
| <b>Μέταλλο Βάσης</b>            | 171,1 | 8,4   |
|                                 | 170   | 8,75  |
|                                 | 180,6 | 9,1   |
|                                 | 187,1 | 9,45  |
|                                 | 179,1 | 9,8   |
|                                 | 177,3 | 10,15 |
|                                 | 176   | 10,5  |

Πίνακας 2 : Μεταβολή μικροσκληρότητας στην περιοχή 2.

| Περιοχή                         | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| <b>Μέταλλο Βάσης</b>            | 173,2                             | -10,15          |
|                                 | 180,9                             | -9,8            |
|                                 | 174,4                             | -9,45           |
|                                 | 167,8                             | -9,1            |
|                                 | 177,9                             | -8,75           |
|                                 | 167,9                             | -8,4            |
|                                 | 180,4                             | -8,05           |
| <b>Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη</b> | 190                               | -7,7            |
|                                 | 177,1                             | -7,35           |
|                                 | 178,7                             | -7              |
|                                 | 180,6                             | -6,65           |
|                                 | 187,5                             | -6,3            |
|                                 | 178,8                             | -5,95           |
|                                 | 181,3                             | -5,6            |
|                                 | 178,2                             | -5,25           |
| <b>Ζώνη Τήξης</b>               | 185,3                             | -4,9            |
|                                 | 187,8                             | -4,55           |
|                                 | 193,1                             | -4,2            |
|                                 | 180,7                             | -3,85           |
|                                 | 190,7                             | -3,5            |
|                                 | 197,5                             | -3,15           |
|                                 | 205,1                             | -2,8            |
|                                 | 209                               | -2,45           |
|                                 | 206                               | -2,1            |
|                                 | 225,6                             | -1,75           |
| 222,1                           | -1,4                              |                 |
| 206,4                           | -1,05                             |                 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

|                                 |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|
|                                 | 229,6 | -0,7  |
|                                 | 230,9 | -0,35 |
|                                 | 208,2 | 0     |
|                                 | 213,6 | 0,35  |
|                                 | 228,4 | 0,7   |
|                                 | 233,6 | 1,05  |
|                                 | 232,4 | 1,4   |
|                                 | 224,8 | 1,75  |
|                                 | 232,1 | 2,1   |
|                                 | 219,5 | 2,45  |
|                                 | 205,5 | 2,8   |
|                                 | 204,8 | 3,15  |
|                                 | 201,2 | 3,5   |
|                                 | 195,6 | 3,85  |
|                                 | 196   | 4,2   |
|                                 | 189,6 | 4,55  |
| <b>Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη</b> | 174,7 | 4,9   |
|                                 | 180,1 | 5,25  |
|                                 | 172,3 | 5,6   |
|                                 | 178,3 | 5,95  |
|                                 | 178,7 | 6,3   |
|                                 | 179,4 | 6,65  |
|                                 | 170,8 | 7     |
|                                 | 173   | 7,35  |
| <b>Μέταλλο Βάσης</b>            | 178,7 | 7,7   |
|                                 | 163,6 | 8,05  |
|                                 | 165,3 | 8,4   |
|                                 | 173   | 8,75  |
|                                 | 163,5 | 9,1   |
|                                 | 169,9 | 9,45  |
|                                 | 165,3 | 9,8   |



Πίνακας 3 : Μεταβολή μικροσκληρότητας στην περιοχή 3.

| Περιοχή                  | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Μέταλλο Βάσης            | 173,6                             | -9,45           |
|                          | 171,3                             | -9,1            |
|                          | 170,2                             | -8,75           |
|                          | 164,2                             | -8,4            |
|                          | 172,8                             | -8,05           |
|                          | 184,9                             | -7,7            |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 182                               | -7,35           |
|                          | 181                               | -7              |
|                          | 186,1                             | -6,65           |
|                          | 181,6                             | -6,3            |
|                          | 185,3                             | -5,95           |
|                          | 187,5                             | -5,6            |
|                          | 183,6                             | -5,25           |
|                          | 187                               | -4,9            |
|                          | 192,3                             | -4,55           |
|                          | 199,4                             | -4,2            |
| Ζώνη Τήξης               | 193,5                             | -3,15           |
|                          | 188,1                             | -2,45           |
|                          | 184,3                             | -2,1            |
|                          | 187                               | -1,75           |
|                          | 185,7                             | -1,4            |
|                          | 193                               | -1,05           |
|                          | 182,5                             | -0,7            |
|                          | 189                               | -0,35           |
|                          | 185,2                             | 0               |
|                          | 191,6                             | 0,35            |
|                          | 194,2                             | 0,7             |
|                          | 191,8                             | 1,05            |
|                          | 193,7                             | 1,4             |
|                          | 184,3                             | 1,75            |
|                          | 195,6                             | 2,1             |
|                          | 191,4                             | 2,45            |
| 198,4                    | 3,85                              |                 |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 184,5                             | 4,55            |
|                          | 185,1                             | 4,9             |
|                          | 188,1                             | 5,25            |
|                          | 191,4                             | 5,6             |
| Μέταλλο Βάσης            | 182,8                             | 5,95            |
|                          | 171                               | 6,3             |
|                          | 167,8                             | 6,65            |
|                          | 174,5                             | 7               |
|                          | 175,2                             | 7,35            |
|                          | 183,2                             | 7,7             |
|                          | 185,1                             | 8,05            |
|                          | 169,4                             | 8,4             |
|                          | 168,9                             | 8,75            |

Πίνακας 4 : Μεταβολή μικροσκληρότητας στην περιοχή 4.

| Περιοχή                  | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Μέταλλο Βάσης            | 172,5                             | -8,75           |
|                          | 165,6                             | -8,4            |
|                          | 170,4                             | -8,05           |
|                          | 173,2                             | -7,7            |
|                          | 170,1                             | -7,35           |
|                          | 182                               | -7              |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 181,9                             | -6,65           |
|                          | 186,3                             | -6,3            |
|                          | 186,2                             | -5,95           |
|                          | 187,3                             | -5,6            |
|                          | 187,1                             | -5,25           |
|                          | 193                               | -4,9            |
| Ζώνη Τήξης               | 199,6                             | -4,55           |
|                          | 191,1                             | -4,2            |
|                          | 189,6                             | -3,85           |
|                          | 198,7                             | -3,5            |
|                          | 210,8                             | -3,15           |
|                          | 230,6                             | -2,8            |
|                          | 223                               | -2,45           |
|                          | 220,1                             | -2,1            |
|                          | 226,2                             | -1,75           |
|                          | 235,6                             | -1,4            |
|                          | 221,9                             | -1,05           |
|                          | 236,8                             | -0,7            |
|                          | 218,1                             | -0,35           |
|                          | 215,2                             | 0               |
|                          | 216,1                             | 0,35            |
|                          | 216,2                             | 0,7             |
|                          | 211,3                             | 1,05            |
|                          | 219,3                             | 1,4             |
|                          | 230,6                             | 1,75            |
|                          | 211,1                             | 2,1             |
|                          | 215,1                             | 2,45            |
|                          | 218                               | 2,8             |
|                          | 221,6                             | 3,15            |
|                          | 229,3                             | 3,5             |
| 207,4                    | 3,85                              |                 |
| 201,7                    | 4,2                               |                 |
| 194,3                    | 4,55                              |                 |
| 194,4                    | 4,9                               |                 |
| 194                      | 5,25                              |                 |
| 193,9                    | 5,6                               |                 |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 181,9                             | 5,95            |
|                          | 174,4                             | 6,3             |
|                          | 181,3                             | 6,65            |
|                          | 191,7                             | 7               |

|               |       |       |
|---------------|-------|-------|
|               | 179,3 | 7,35  |
|               | 182,6 | 7,7   |
| Μέταλλο Βάσης | 168,9 | 8,05  |
|               | 183,1 | 8,4   |
|               | 178,4 | 8,75  |
|               | 181,6 | 9,1   |
|               | 177,6 | 9,45  |
|               | 182,4 | 9,8   |
|               | 193,4 | 10,15 |
|               | 177,8 | 10,5  |
|               | 179,8 | 10,85 |

Πίνακας 5 : Μεταβολή μικροσκληρότητας στην περιοχή 5.

| Περιοχή                  | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Μέταλλο Βάσης            | 171,2                             | -9,8            |
|                          | 173,5                             | -9,45           |
|                          | 171,1                             | -9,1            |
|                          | 175,5                             | -8,75           |
|                          | 182,1                             | -8,4            |
|                          | 185,7                             | -8,05           |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 190                               | -7,7            |
|                          | 195,8                             | -7,35           |
|                          | 183,1                             | -7              |
|                          | 192                               | -6,65           |
|                          | 187,7                             | -6,3            |
|                          | 188,5                             | -5,95           |
| Ζώνη Τήξης               | 195,6                             | -5,6            |
|                          | 190,2                             | -5,25           |
|                          | 192,8                             | -4,9            |
|                          | 196,1                             | -4,55           |
|                          | 196,7                             | -4,2            |
|                          | 188,2                             | -3,85           |
|                          | 198,2                             | -3,5            |
|                          | 186,4                             | -3,15           |
|                          | 196,3                             | -2,8            |
|                          | 192,3                             | -2,45           |
|                          | 196,1                             | -2,1            |
|                          | 193,1                             | -1,75           |
|                          | 191,9                             | -1,4            |
|                          | 196,7                             | -1,05           |
|                          | 191,9                             | -0,7            |
|                          | 192,2                             | -0,35           |
|                          | 180,4                             | 0               |
|                          | 189,3                             | 0,35            |
| 194,1                    | 0,7                               |                 |
| 200,2                    | 1,05                              |                 |
| 193                      | 1,4                               |                 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

|                          |       |      |
|--------------------------|-------|------|
|                          | 185   | 1,75 |
|                          | 184,4 | 2,1  |
|                          | 192,8 | 2,45 |
|                          | 193,9 | 2,8  |
|                          | 190,2 | 3,15 |
|                          | 187,7 | 3,5  |
|                          | 193,3 | 3,85 |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 195,1 | 4,2  |
|                          | 180,5 | 4,55 |
|                          | 190,9 | 4,9  |
|                          | 194,9 | 5,25 |
|                          | 184,8 | 5,95 |
|                          | 197,9 | 6,3  |
| Μέταλλο Βάσης            | 178,7 | 6,65 |
|                          | 174,1 | 7    |
|                          | 187,4 | 7,35 |
|                          | 179,5 | 7,7  |
|                          | 166,8 | 8,05 |
|                          | 182,7 | 8,4  |
|                          | 178,1 | 8,75 |

Πίνακας 6 : Μεταβολή μικροσκληρότητας στην περιοχή 6.

| Περιοχή | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|---------|-----------------------------------|-----------------|
| Ραφή    | 220,9                             | -3,85           |
|         | 221,2                             | -3,5            |
|         | 205,7                             | -2,45           |
|         | 208                               | -2,1            |
|         | 215,7                             | -1,75           |
|         | 211,1                             | -1,4            |
|         | 217,6                             | -1,05           |
|         | 211,8                             | -0,7            |
|         | 213,4                             | -0,35           |
|         | 209,8                             | 0               |
|         | 216,6                             | 0,35            |
|         | 216,1                             | 0,7             |
|         | 221,9                             | 1,05            |
|         | 217,1                             | 1,4             |
|         | 216,4                             | 1,75            |
|         | 216,1                             | 2,1             |
|         | 215,3                             | 2,45            |
|         | 208,3                             | 2,8             |
|         | 207,3                             | 3,15            |
|         | 215,1                             | 3,5             |
| 212,6   | 3,85                              |                 |

• Hybrid Laser-MAG+Tandem Welding

Πίνακας 7 : Μεταβολή της σκληρότητας στην περιοχή του τόξου.

| Περιοχή                 | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Μέταλλο Βάσης           | 180,1                             | -5,75           |
|                         | 196,3                             | -5,50           |
| Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη | 199,7                             | -5,25           |
|                         | 204,7                             | -5,00           |
|                         | 223,3                             | -4,75           |
|                         | 213,8                             | -4,50           |
|                         | 248,9                             | -4,25           |
|                         | 271,2                             | -4,00           |
|                         | 289,2                             | -3,75           |
|                         | 305,4                             | -3,50           |
|                         | 313                               | -3,25           |
|                         | 345,6                             | -3,00           |
|                         | 335,2                             | -2,75           |
|                         | 357,6                             | -2,50           |
|                         | Ζώνη Τήξης                        | 253,9           |
| 231,2                   |                                   | -2,00           |
| 241,9                   |                                   | -1,75           |
| 241,8                   |                                   | -1,50           |
| 235,7                   |                                   | -1,25           |
| 248,5                   |                                   | -1,00           |
| 245,7                   |                                   | -0,75           |
| 236,2                   |                                   | -0,50           |
| 230,7                   |                                   | -0,25           |
| 244,3                   |                                   | 0,00            |
| 239                     |                                   | 0,25            |
| 240,7                   |                                   | 0,50            |
| 236,7                   |                                   | 0,75            |
| 241,2                   |                                   | 1,00            |
| 233,9                   |                                   | 1,25            |
| 238,6                   |                                   | 1,50            |
| 241,8                   |                                   | 1,75            |
| 231,1                   |                                   | 2,00            |
| 240,9                   |                                   | 1,25            |
| 253                     |                                   | 1,50            |
| 232,9                   | 1,75                              |                 |
| 239,5                   | 2,00                              |                 |
| 240,3                   | 2,25                              |                 |
| Θερμικά Επηρασμένη Ζώνη | 354,5                             | 2,50            |
|                         | 342                               | 2,75            |
|                         | 367                               | 3,00            |
|                         | 330,5                             | 3,25            |
|                         | 294,4                             | 3,50            |
|                         | 278,3                             | 3,75            |
| 263,1                   | 4,00                              |                 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

|                      |       |      |
|----------------------|-------|------|
|                      | 226,8 | 4,25 |
|                      | 216,9 | 4,50 |
|                      | 214,4 | 4,75 |
|                      | 211,5 | 5,00 |
|                      | 209,6 | 5,25 |
| <b>Μέταλλο Βάσης</b> | 173,6 | 5,50 |
|                      | 176,4 | 5,75 |

Πίνακας 8 : Μεταβολή της σκληρότητας στην περιοχή του laser.

| Περιοχή                         | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| <b>Μέταλλο Βάσης</b>            | 175,2                             | -4,50           |
|                                 | 178,8                             | -4,25           |
|                                 | 171,9                             | -4,00           |
|                                 | 172,9                             | -3,75           |
|                                 | 177,9                             | -3,50           |
|                                 | 180,2                             | -3,25           |
|                                 | 186,3                             | -3,00           |
|                                 | 191,2                             | -2,75           |
|                                 | 183,2                             | -2,50           |
|                                 | 185,8                             | -2,25           |
| <b>Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη</b> | 177,2                             | -2,00           |
|                                 | 188,8                             | -1,75           |
|                                 | 191,4                             | -1,50           |
|                                 | 218,6                             | -1,25           |
|                                 | 238,4                             | -1,00           |
|                                 | 280,6                             | -0,75           |
| <b>Ζώνη Τήξης</b>               | 305,5                             | -0,50           |
|                                 | 264,7                             | -0,25           |
|                                 | 264,5                             | 0,00            |
|                                 | 277,7                             | 0,25            |
|                                 | 258,2                             | 0,50            |
|                                 | 273,9                             | 0,75            |
| <b>Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη</b> | 277,2                             | 1,00            |
|                                 | 338,5                             | 1,25            |
|                                 | 268,5                             | 1,50            |
|                                 | 231                               | 1,75            |
|                                 | 203,9                             | 2,00            |
|                                 | 205,4                             | 1,25            |
| <b>Μέταλλο Βάσης</b>            | 192,6                             | 1,50            |
|                                 | 185,3                             | 1,75            |
|                                 | 181,7                             | 2,00            |
|                                 | 185,2                             | 2,25            |
|                                 | 181,9                             | 2,50            |
|                                 | 187,3                             | 2,75            |
|                                 | 185,2                             | 3,00            |
|                                 | 179,8                             | 3,25            |
| 177,8                           | 3,50                              |                 |

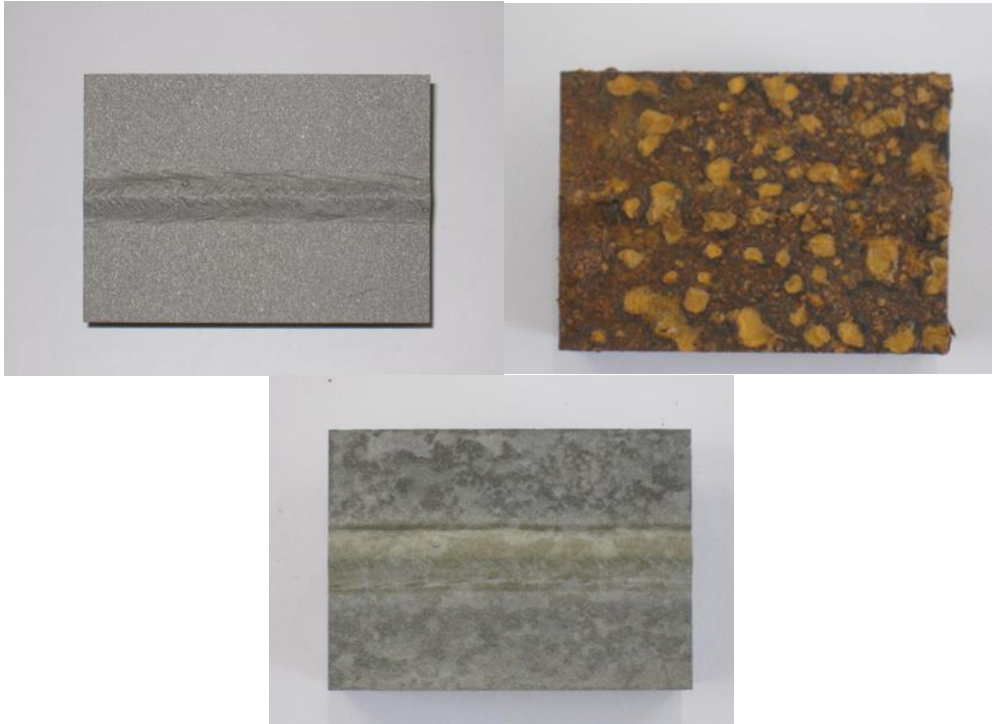


Πίνακας 9 : Μεταβολή της σκληρότητας στην περιοχή μετάβασης laser-τόξου.

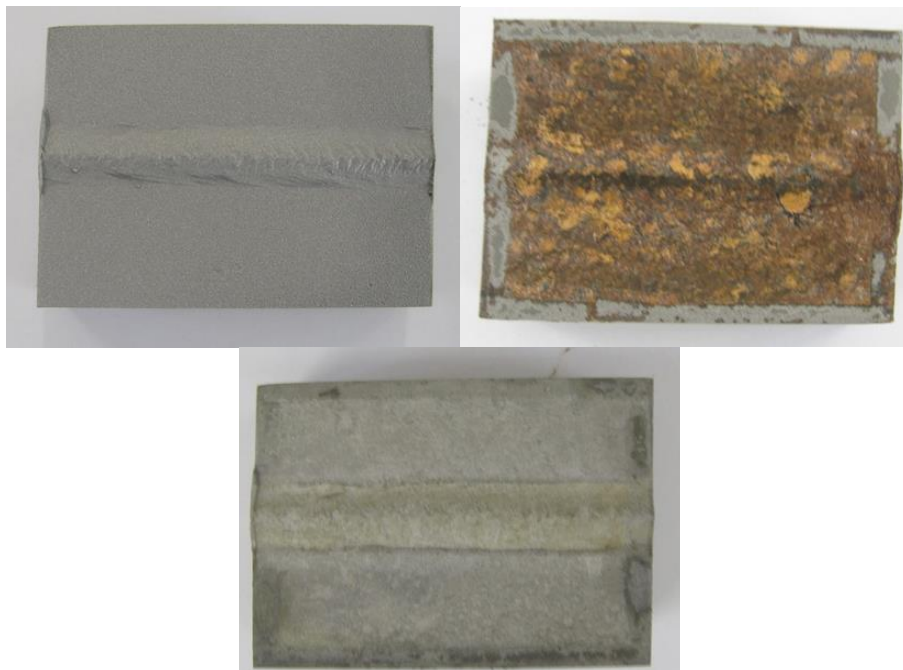
| Περιοχή                  | Μικροσκληρότητα HV <sub>300</sub> | Απόσταση x (mm) |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Μέταλλο Βάσης            | 193,7                             | -4,75           |
|                          | 185,6                             | -4,50           |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 207                               | -4,25           |
|                          | 204                               | -4,00           |
|                          | 212,6                             | -3,75           |
|                          | 215,1                             | -3,50           |
|                          | 247,8                             | -3,25           |
|                          | 253,4                             | -3,00           |
|                          | 259                               | -2,75           |
| Ζώνη Τήξης               | 244,5                             | -2,50           |
|                          | 220,7                             | -2,25           |
|                          | 222                               | -2,00           |
|                          | 223                               | -1,75           |
|                          | 238,2                             | -1,50           |
|                          | 245,4                             | -1,25           |
|                          | 251,7                             | -1,00           |
|                          | 247,9                             | -0,75           |
|                          | 244,3                             | -0,50           |
|                          | 239,9                             | -0,25           |
|                          | 244,3                             | 0,00            |
|                          | 260,6                             | 0,25            |
|                          | 254,4                             | 0,50            |
|                          | 242                               | 0,75            |
|                          | 255,2                             | 1,00            |
| 250,3                    | 1,25                              |                 |
| Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη | 221,1                             | 1,50            |
|                          | 217,2                             | 1,75            |
|                          | 230,1                             | 2,00            |
|                          | 221,3                             | 2,25            |
|                          | 216,8                             | 2,50            |
|                          | 218,9                             | 2,75            |
| Μέταλλο Βάσης            | 192                               | 3,00            |
|                          | 198,2                             | 3,25            |
|                          | 186                               | 3,50            |

**ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ Μ.Β. ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50x70mm**

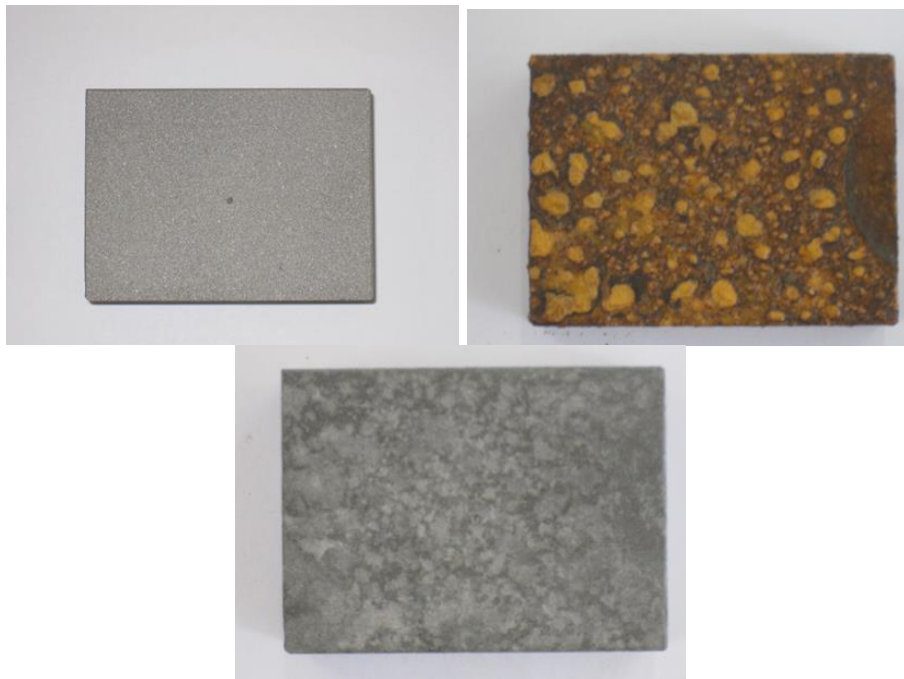
**IVB2 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



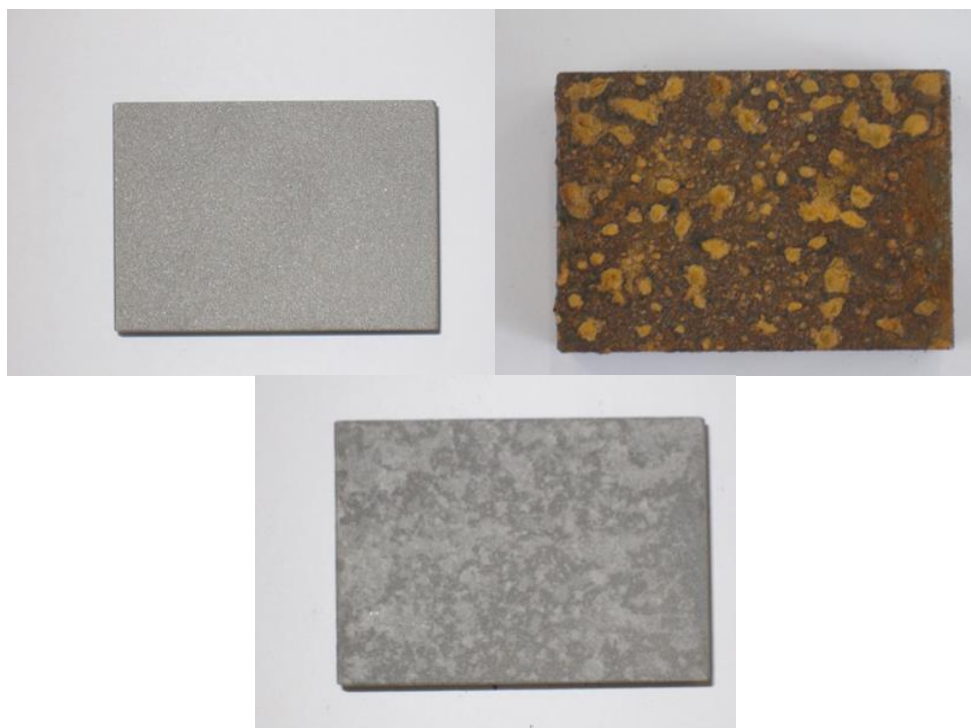
**IB3 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



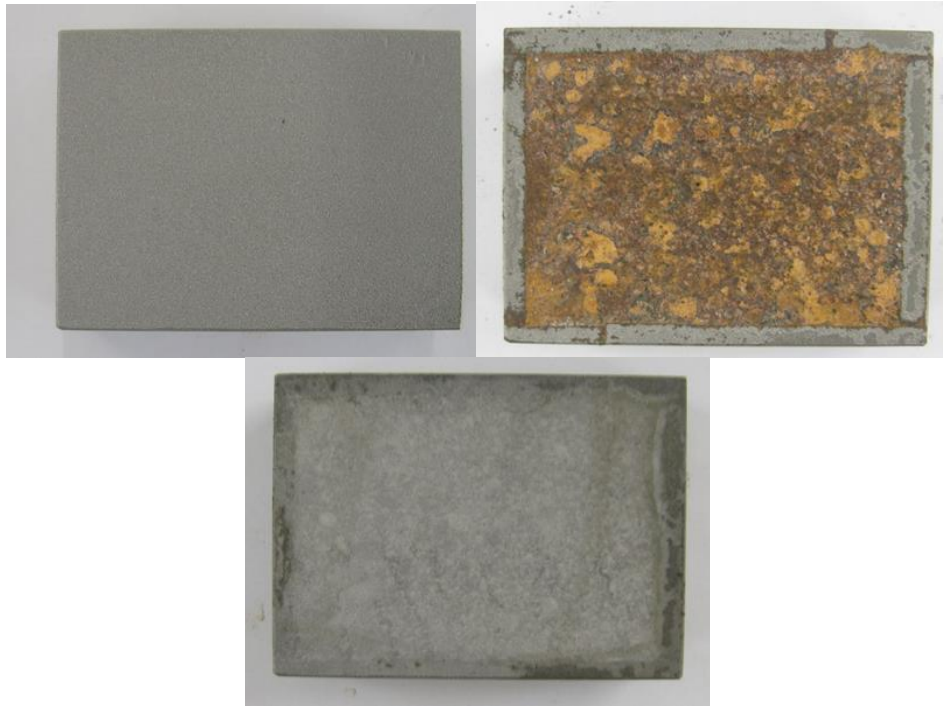
**IIIΑ3 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



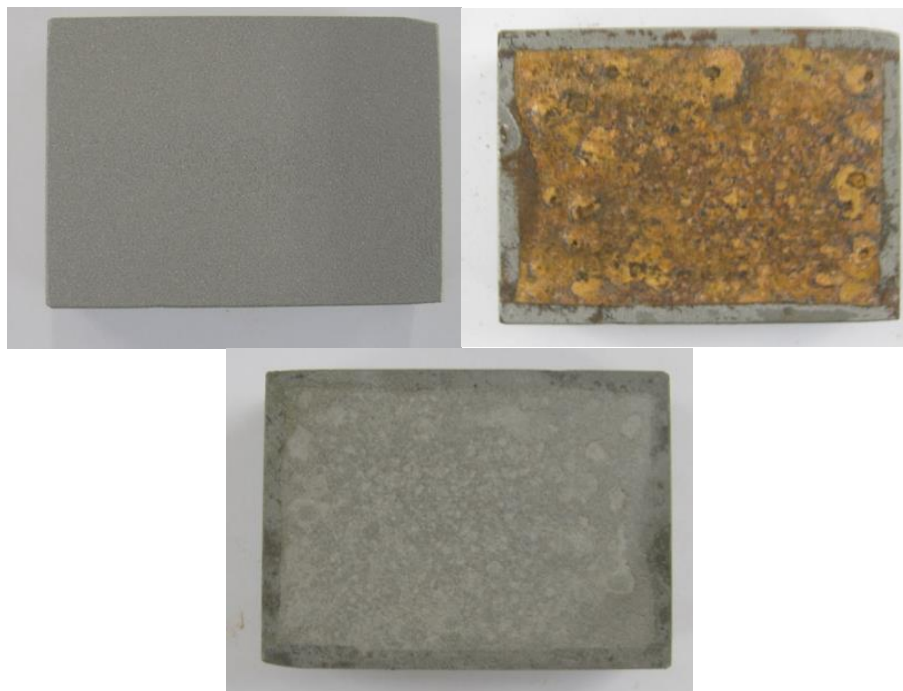
**VC1 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IC1 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



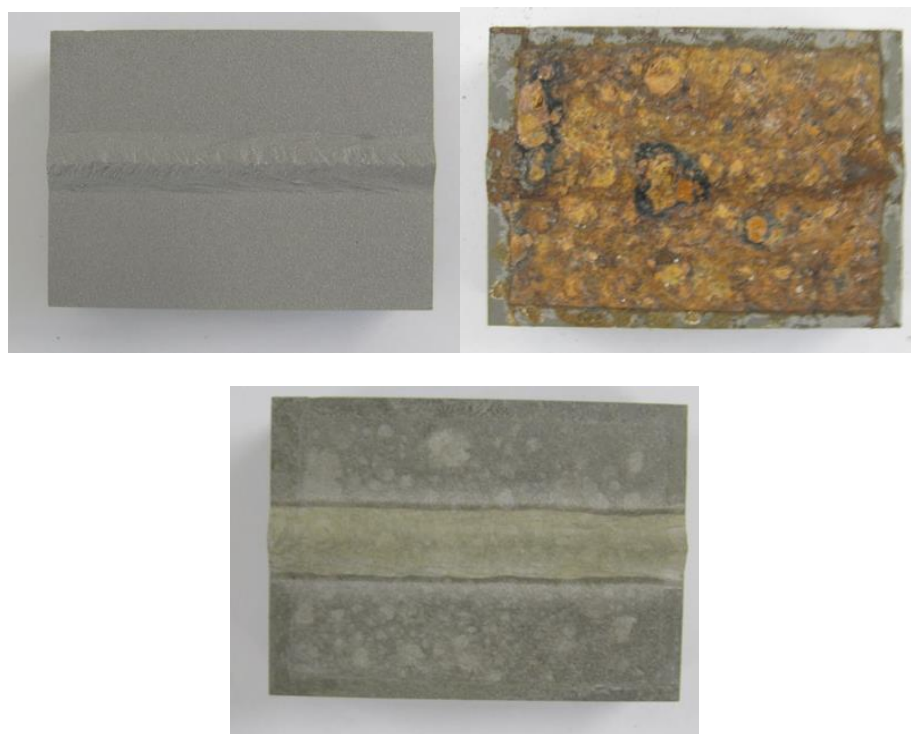
**IVC2 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IB1 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

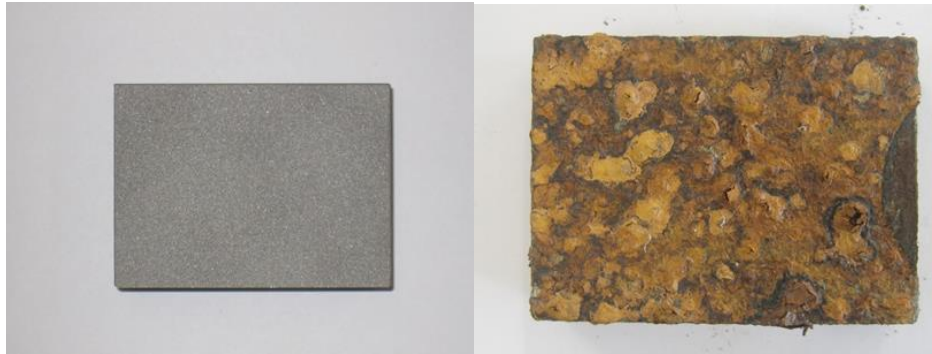


**IIB2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**





**ΙΑ2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

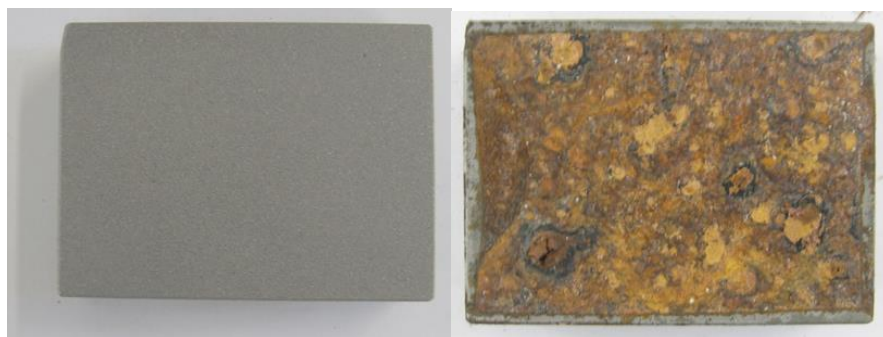


**ΙΙC3 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

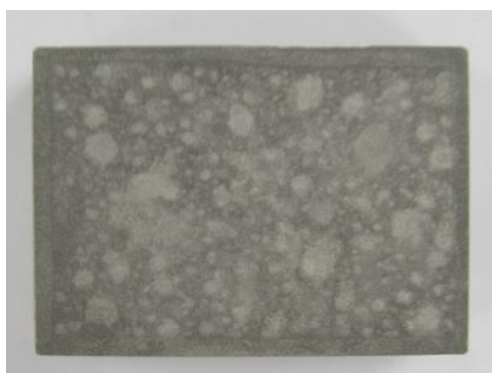




**ΙΙC2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΙVΑ2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΙΙΒ1 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VB2 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IC3 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



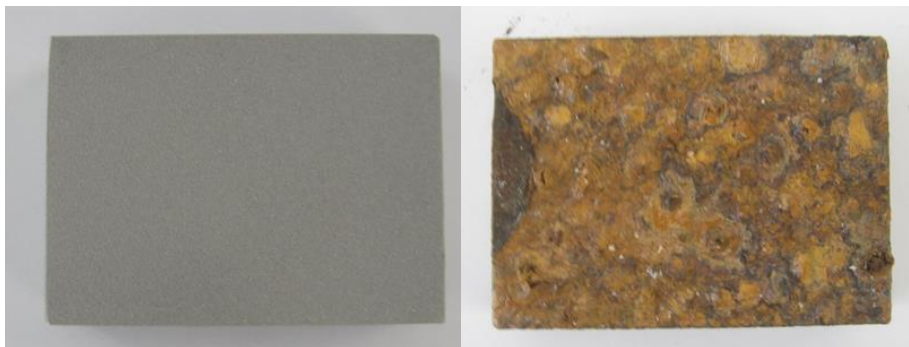
**IVA1 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



**III C2 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VA2 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**





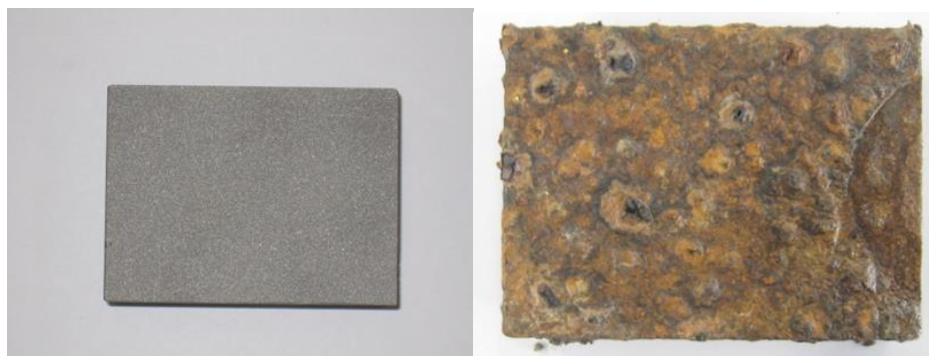
**ΙΙΒ1 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



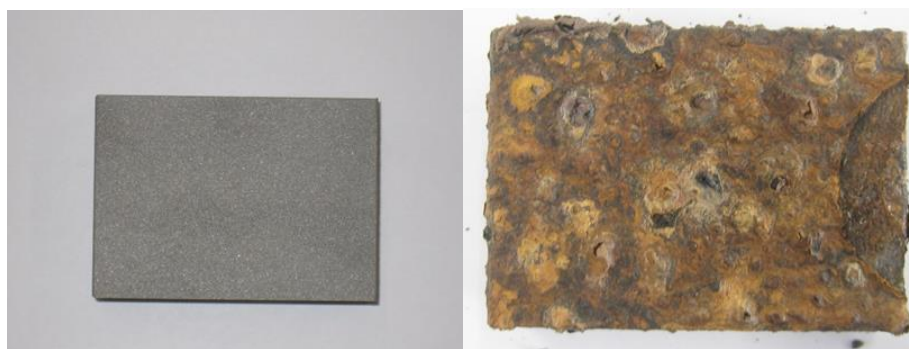
**ΙΙΒ3 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IC2 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**

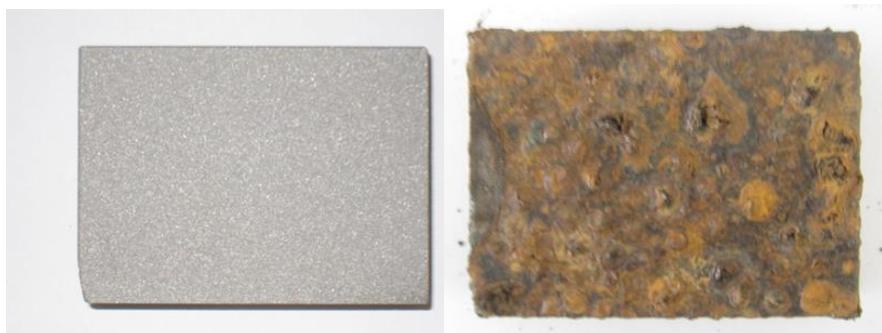


**IIA2 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**

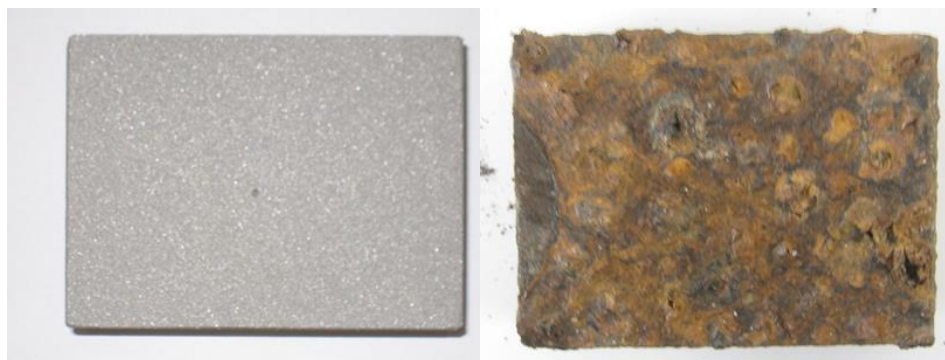




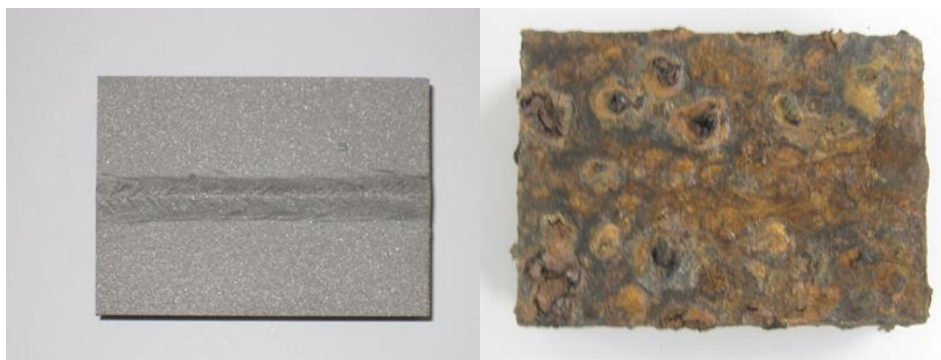
**IIA1 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



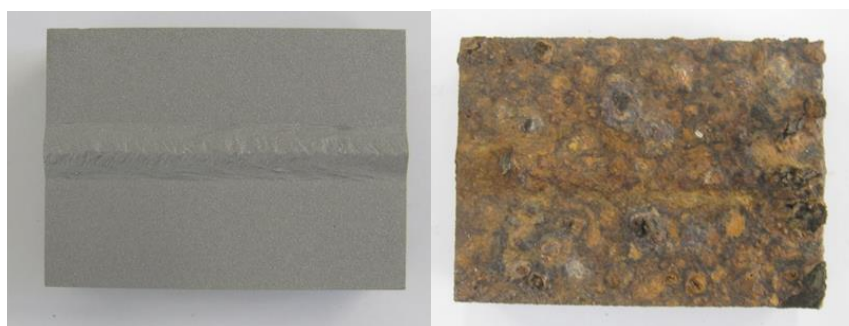
**IIIC1 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



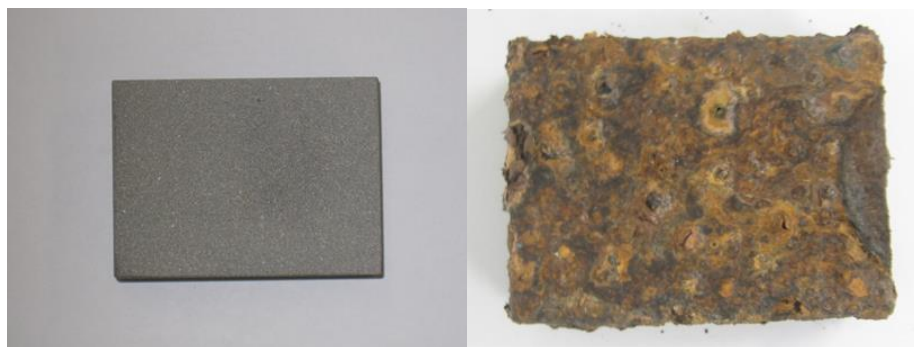
**IVB3 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



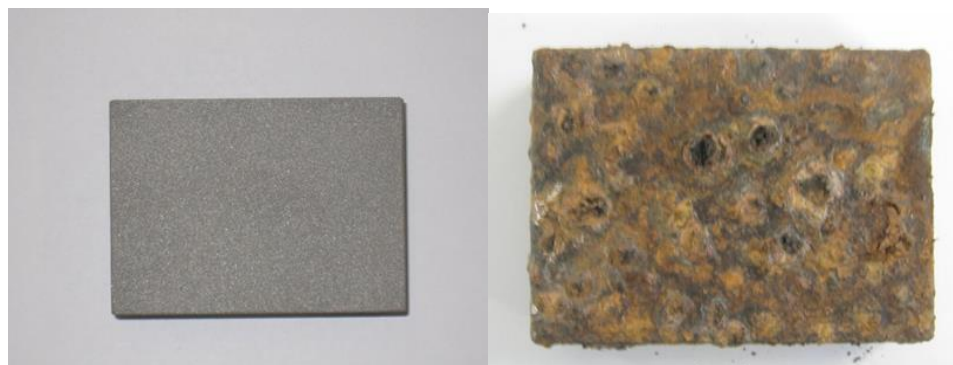
**IIB4 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IIC1 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



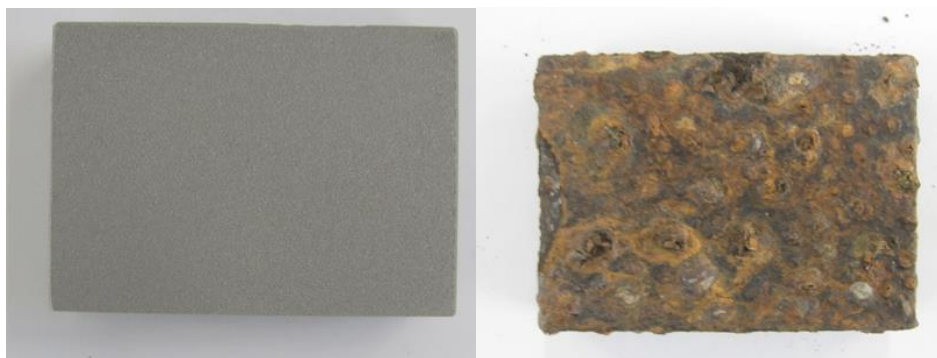
**VC2 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΙΑ3 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**

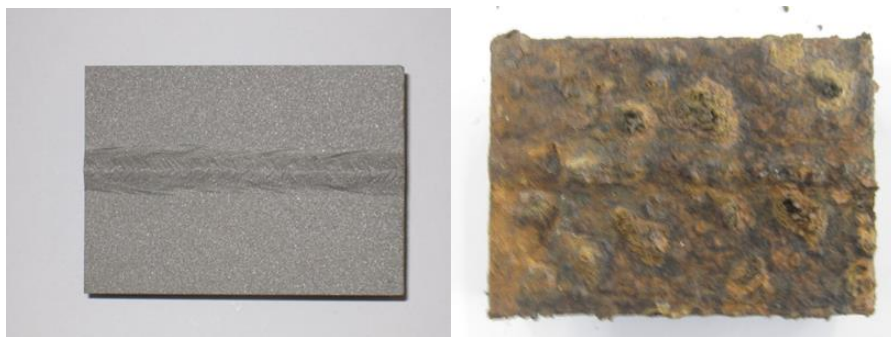


**IVC3 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**

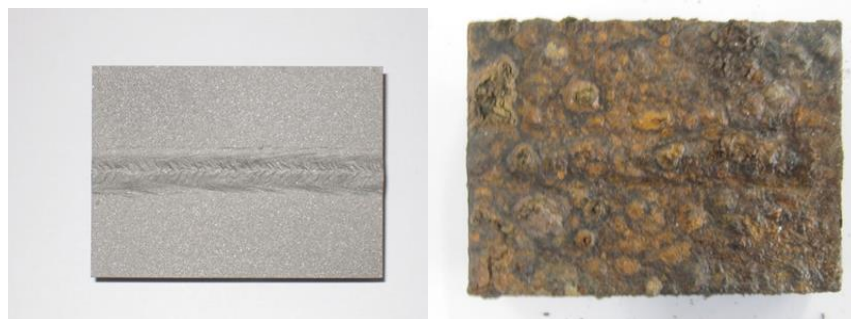




**IB2 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



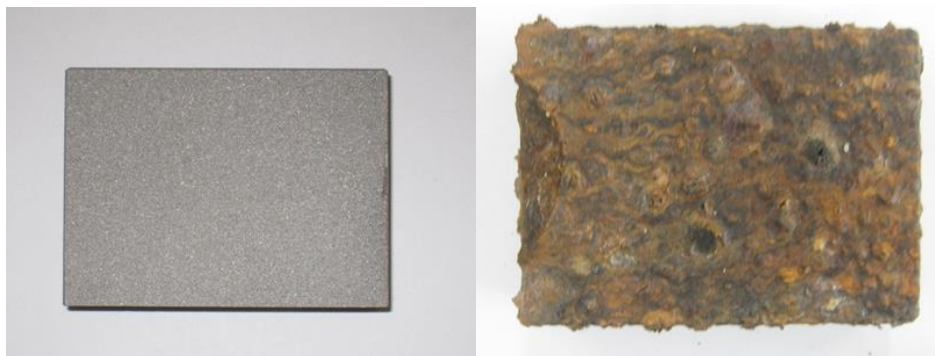
**VB1 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**III B2 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IA1 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**

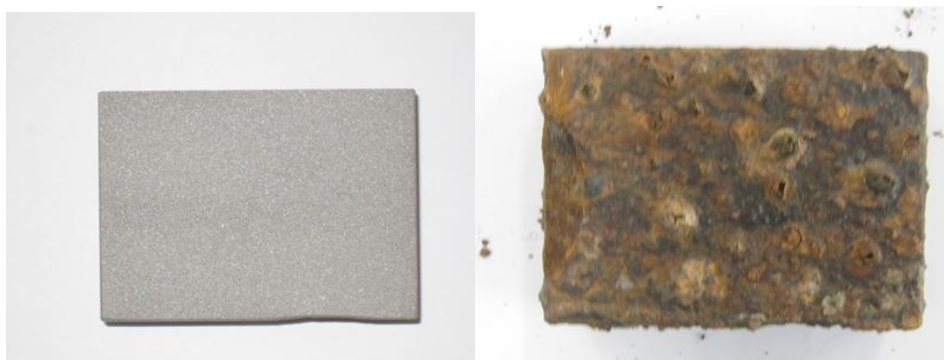




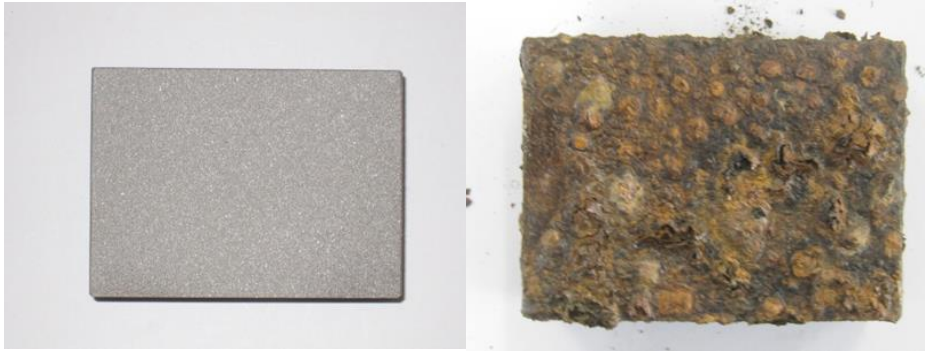
**IIA3 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IVC1 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**

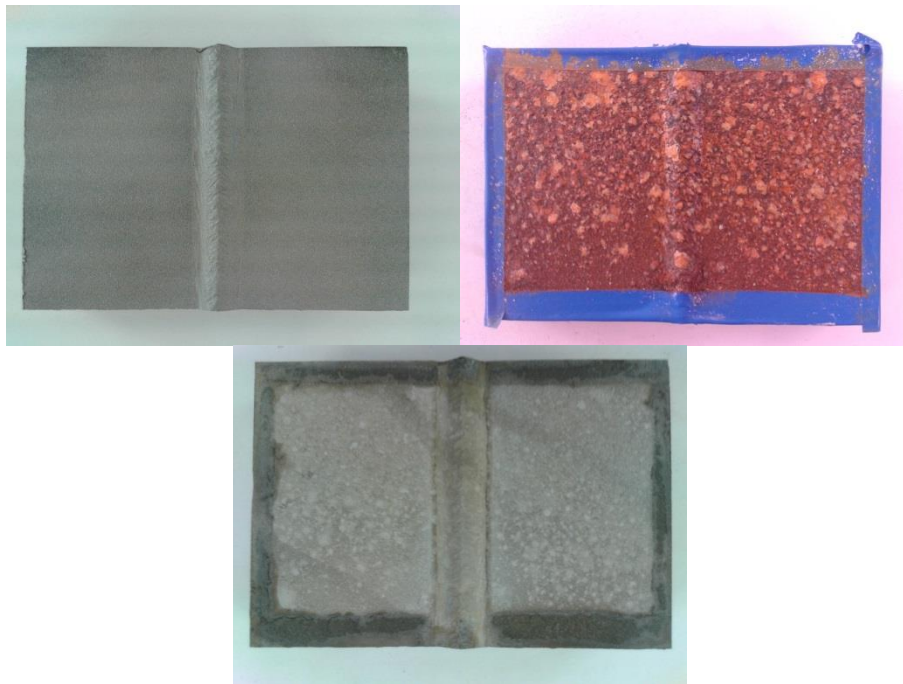


**VA1 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**

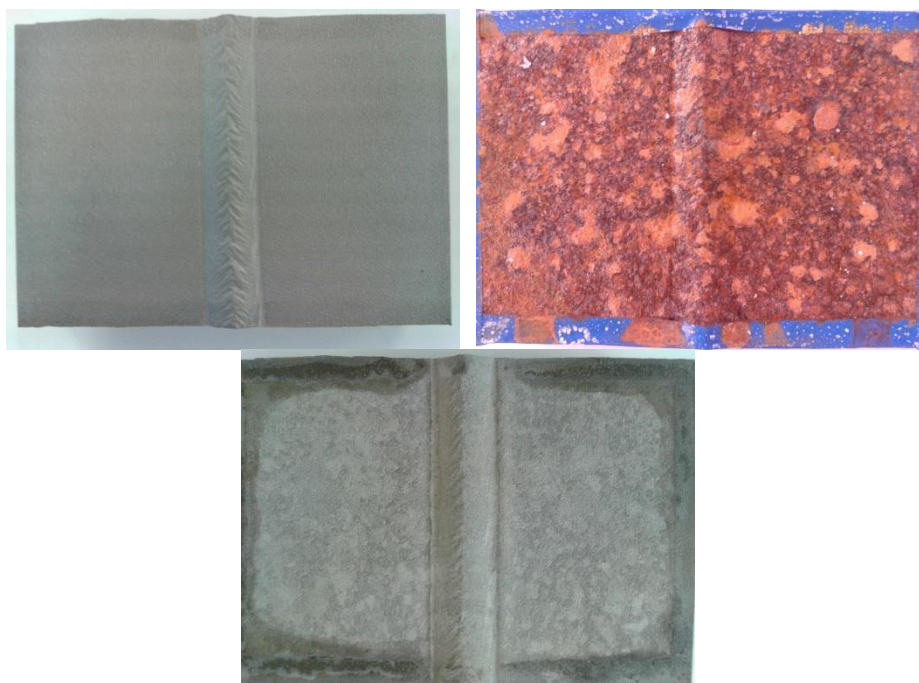


**ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ Μ.Β. ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 100x70mm**

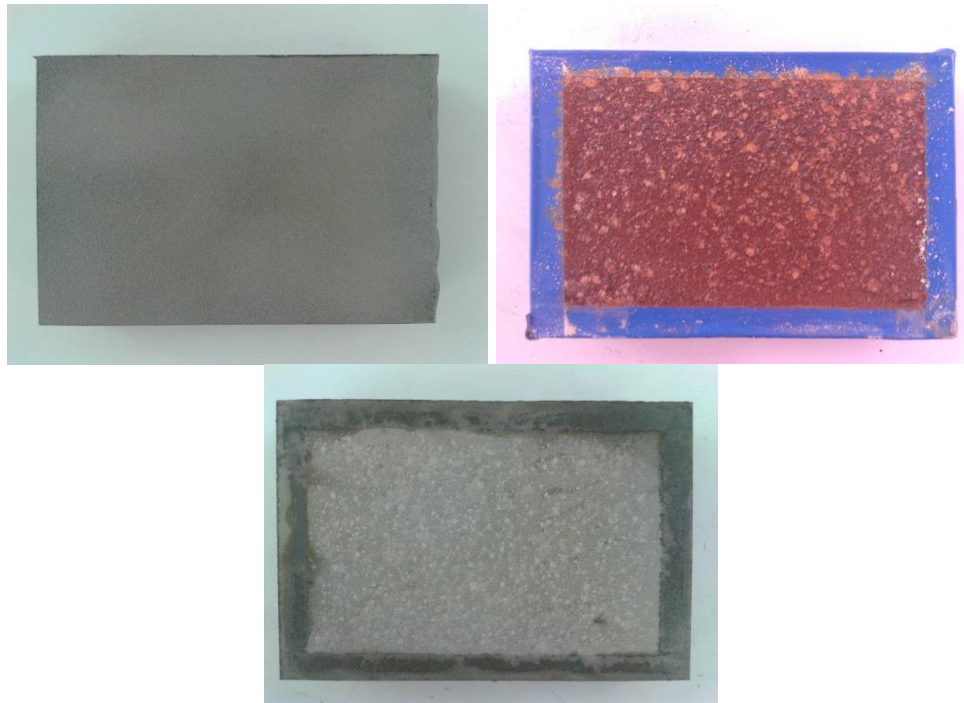
**VIB1 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



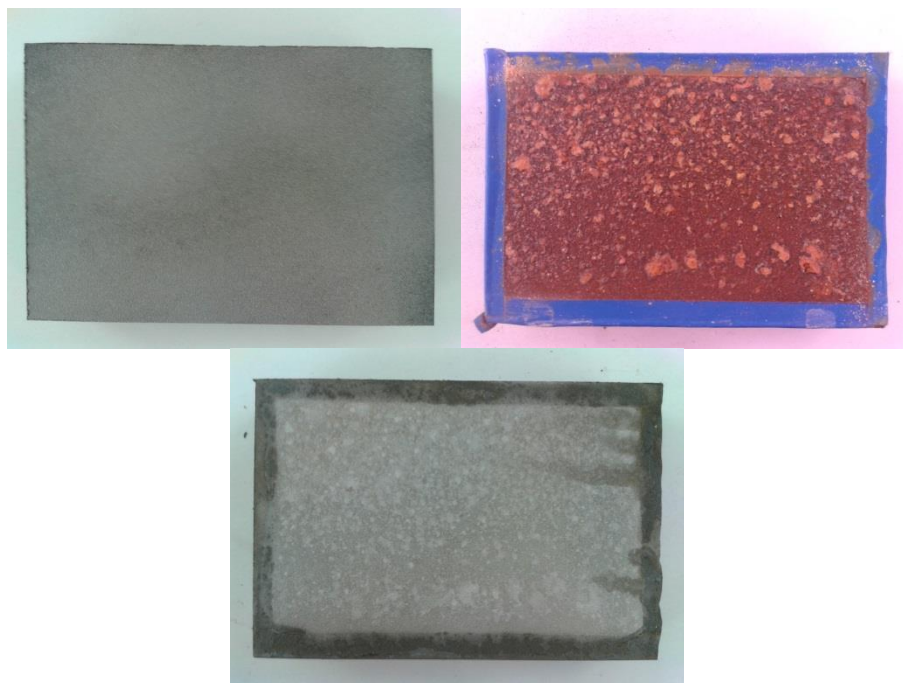
**VIB4 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIC4 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**

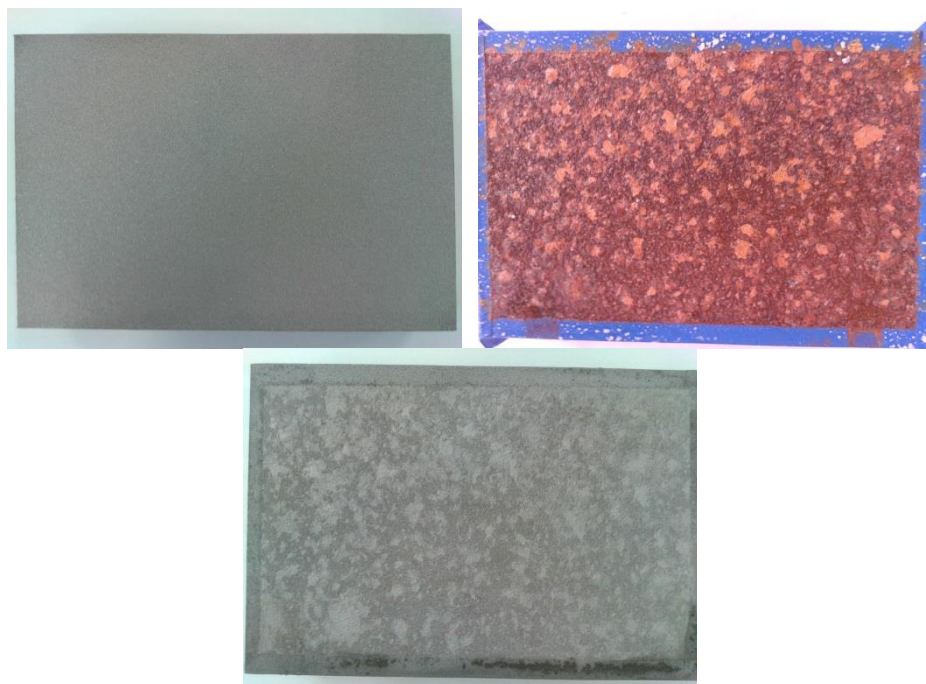


**VIIA5 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**

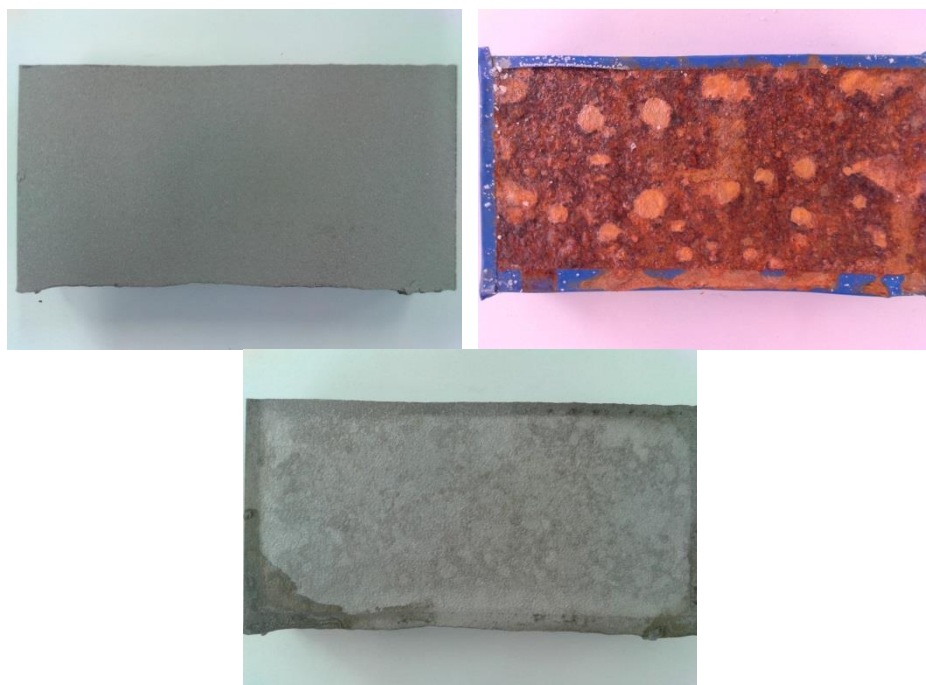




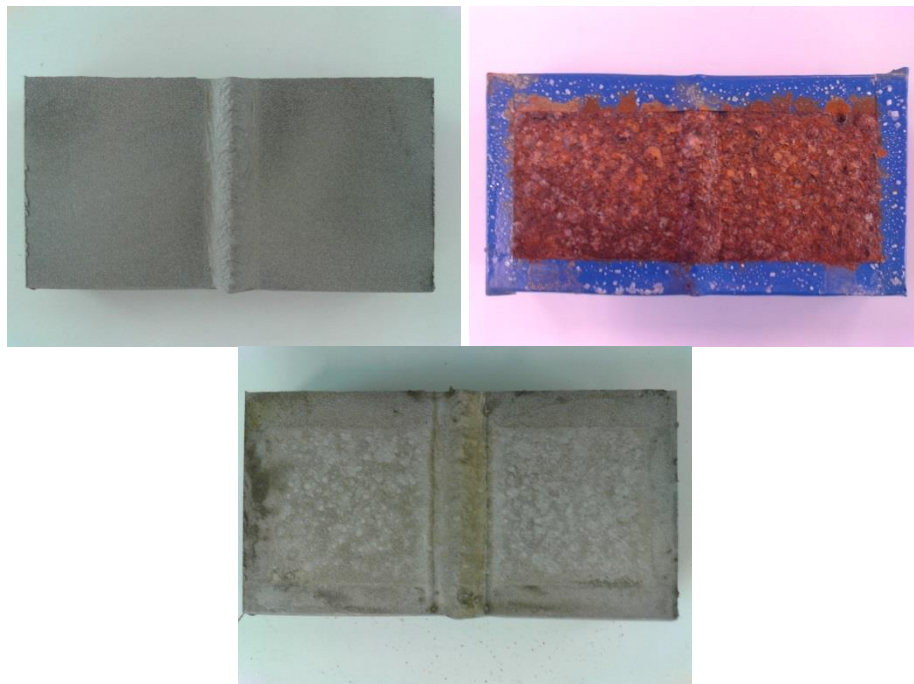
**VIA2 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



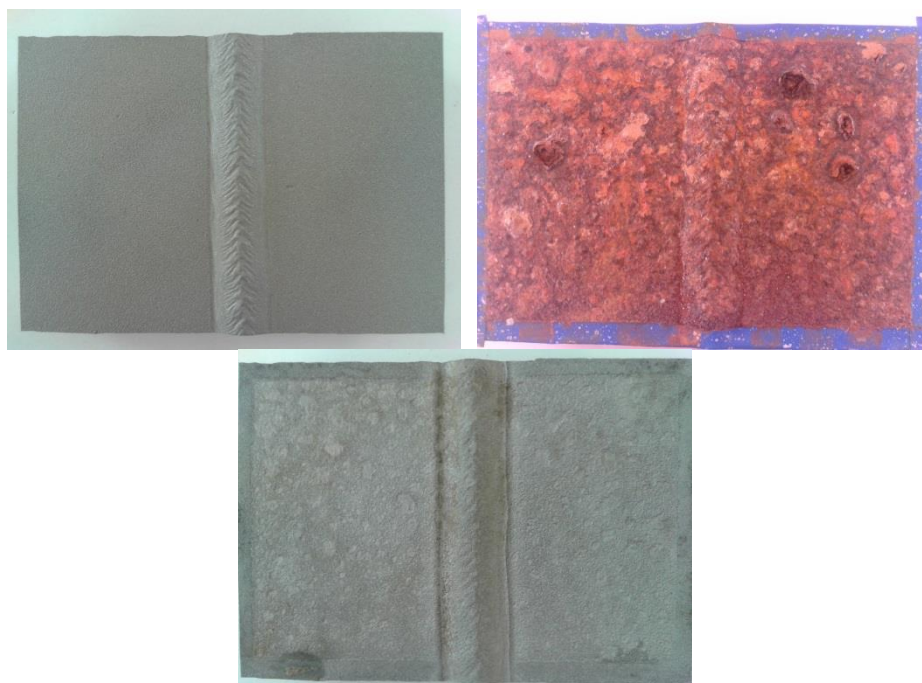
**VIIC6 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIB6 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

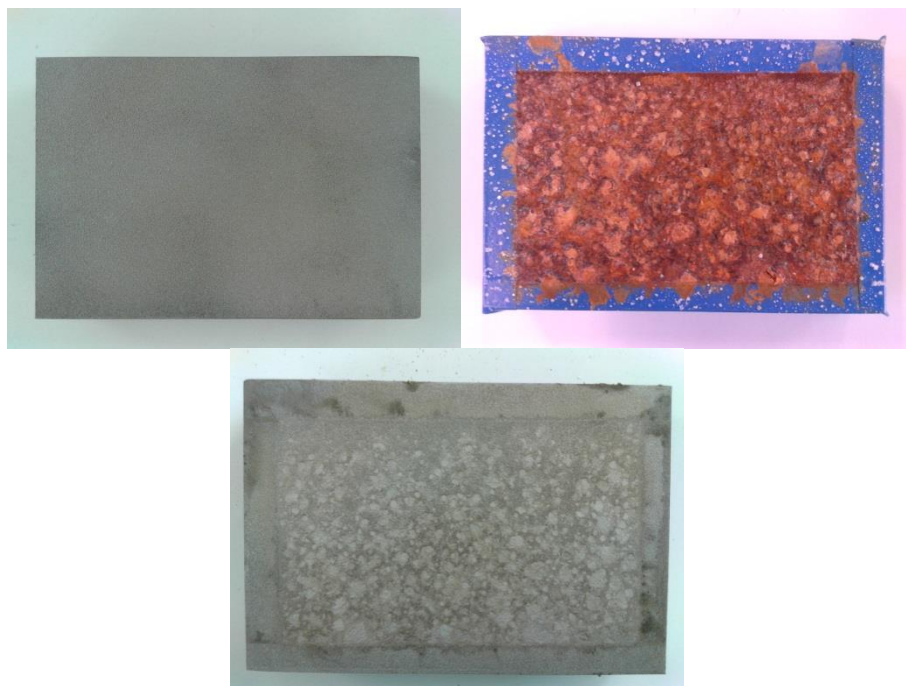


**VIB2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

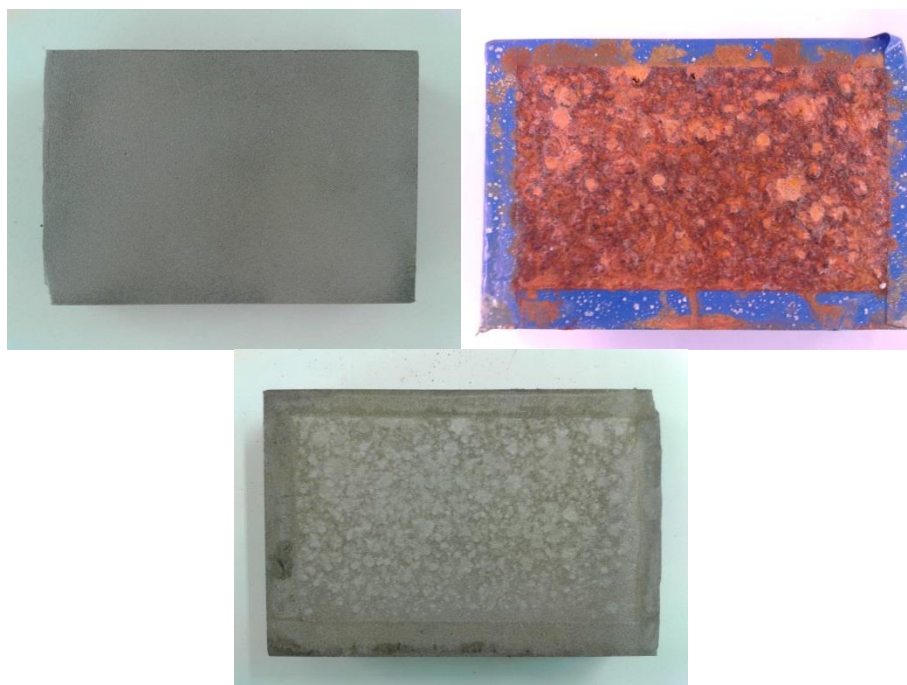




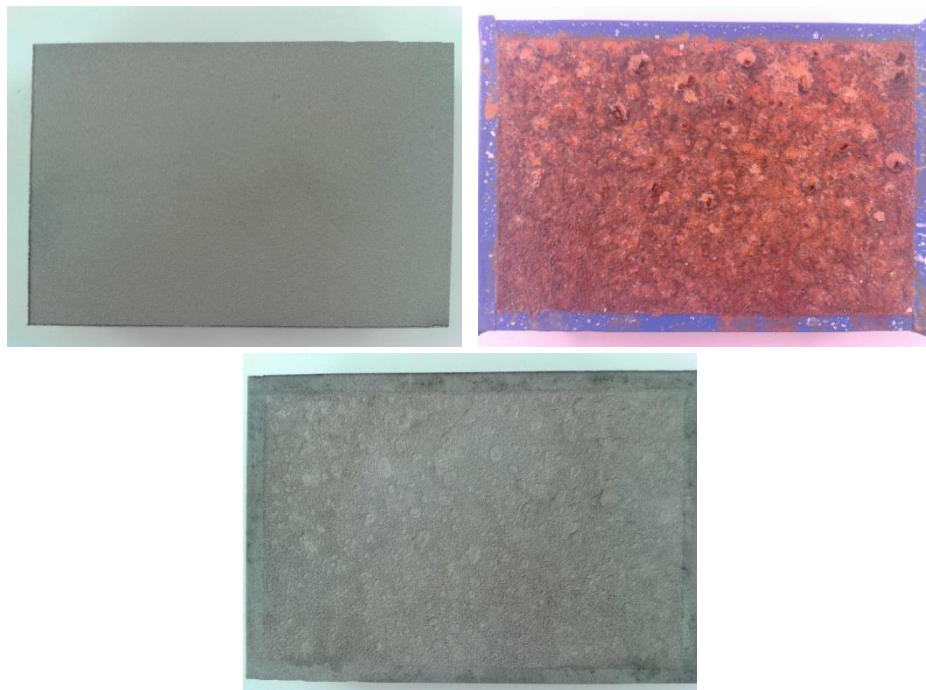
**VIA5 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



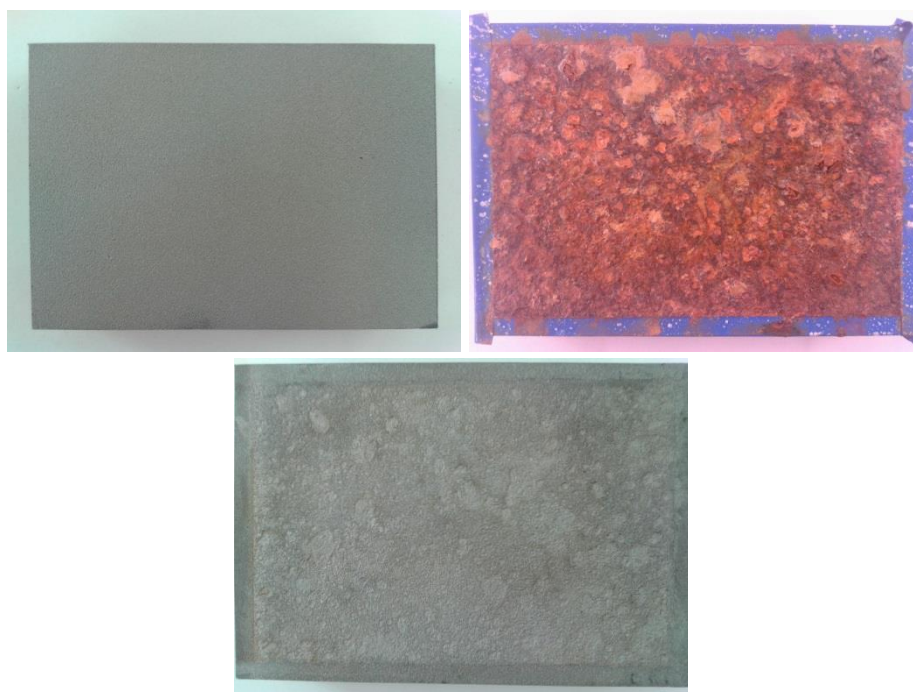
**VIIA4 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



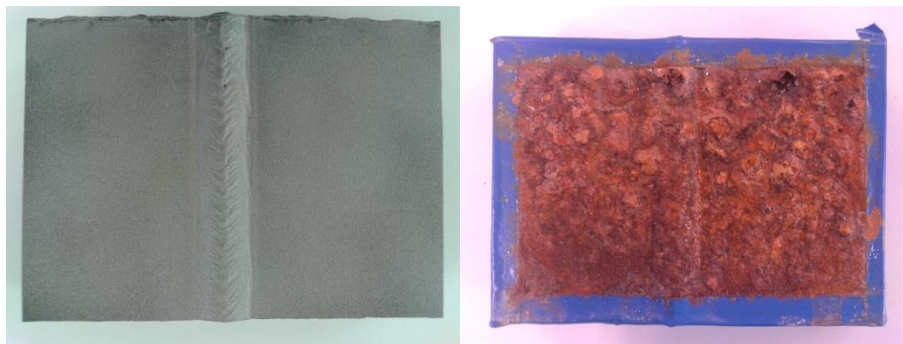
**VIC3 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



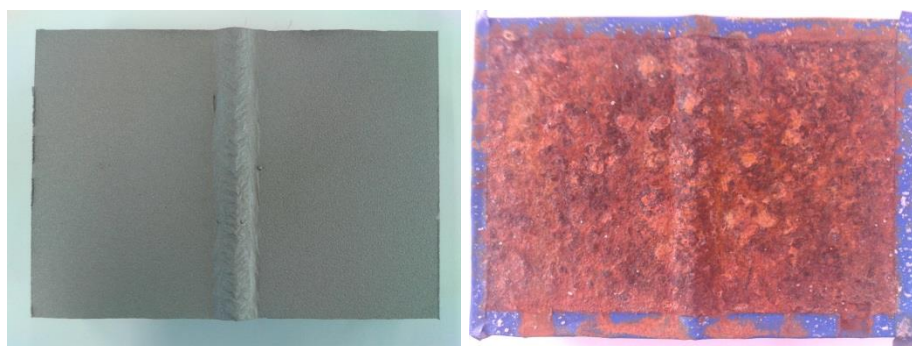
**VIIC5 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIIB1 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**

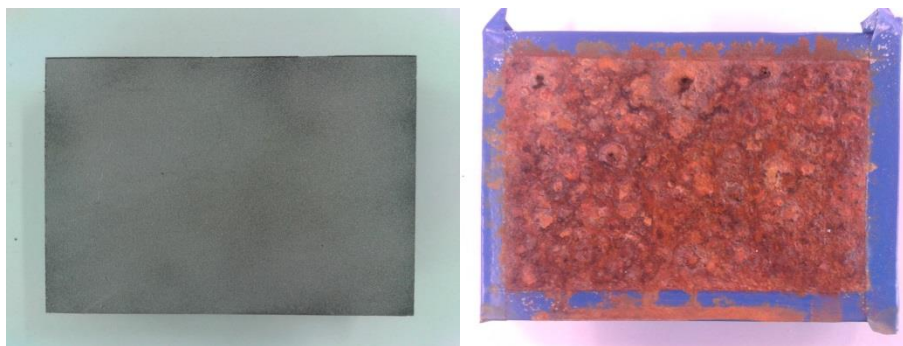


**VIB5 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**

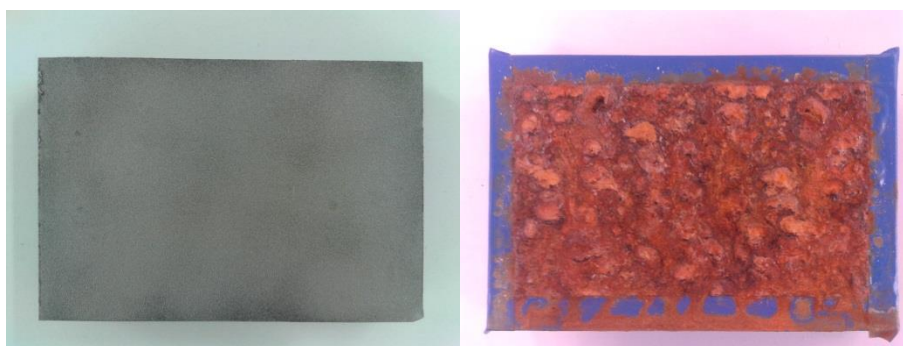




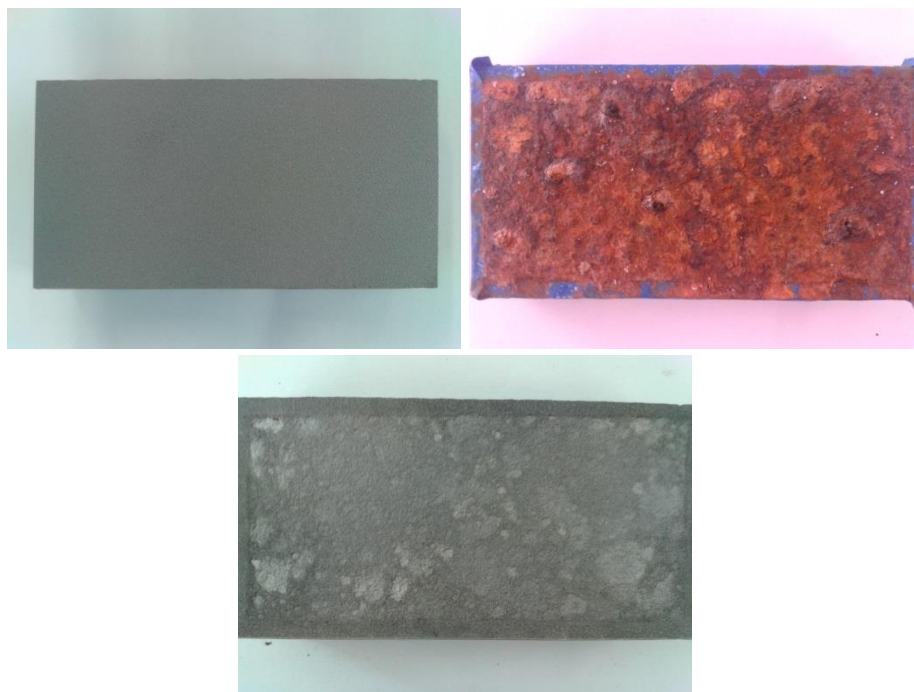
**VIC1 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



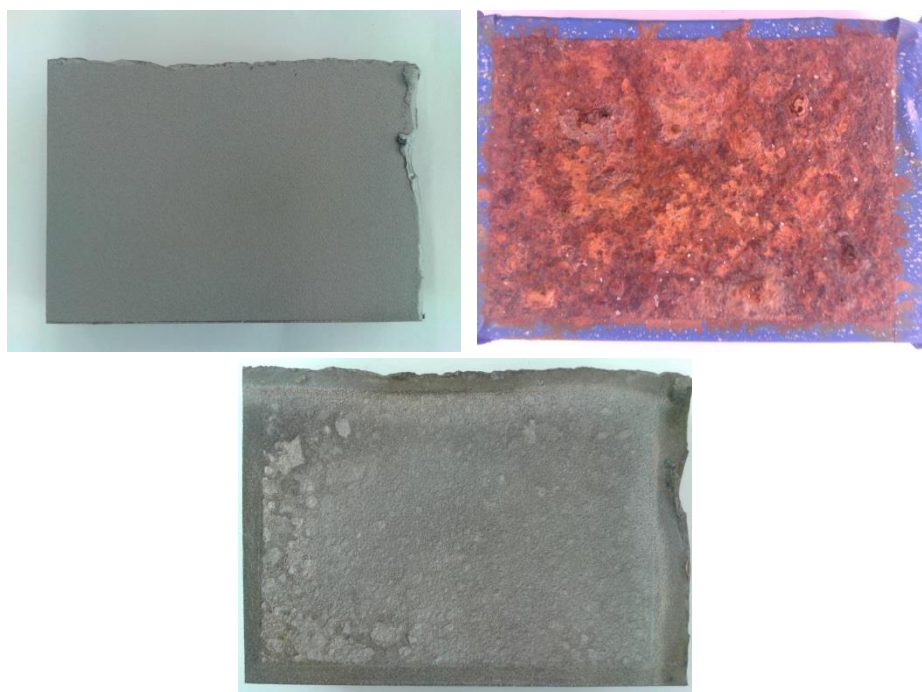
**VIIC2 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIA6 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**

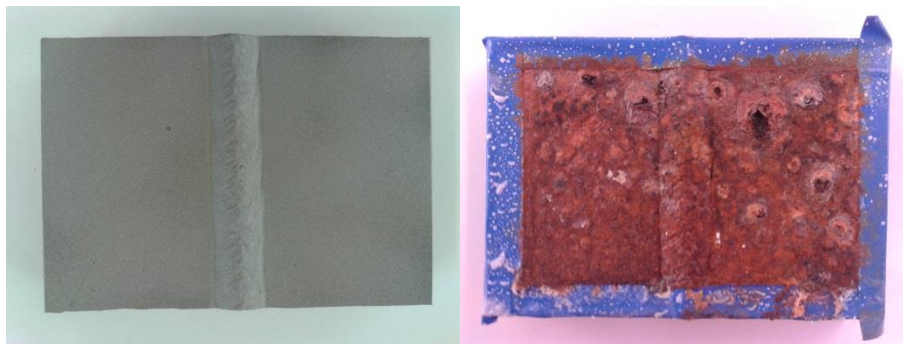


**VIIA1 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**

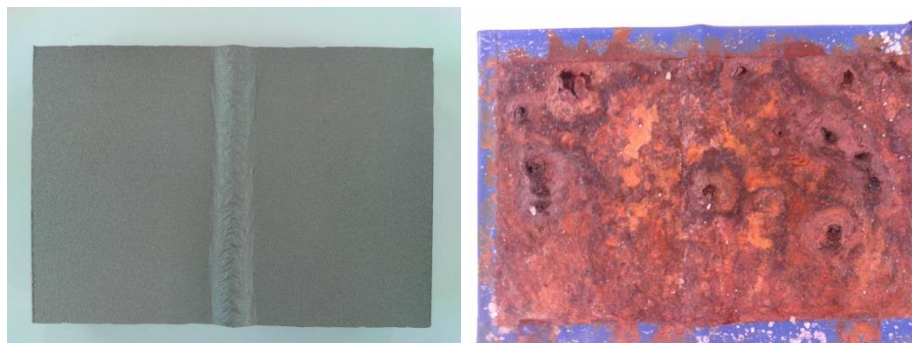




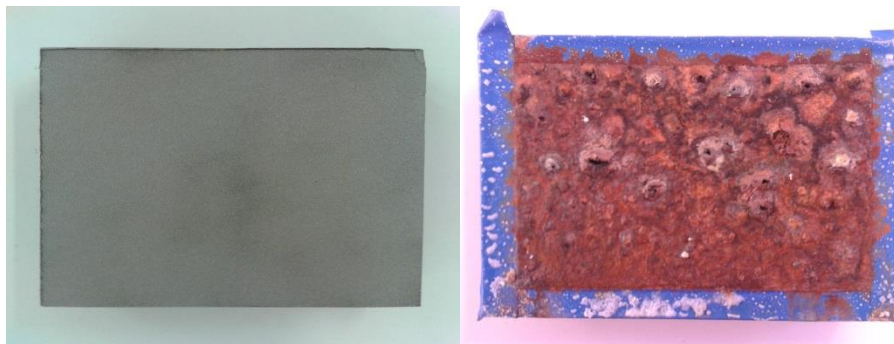
**VIB5 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



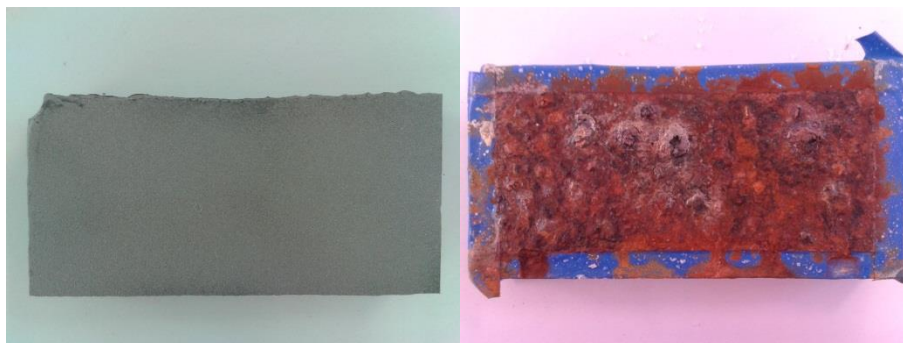
**VIB2 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



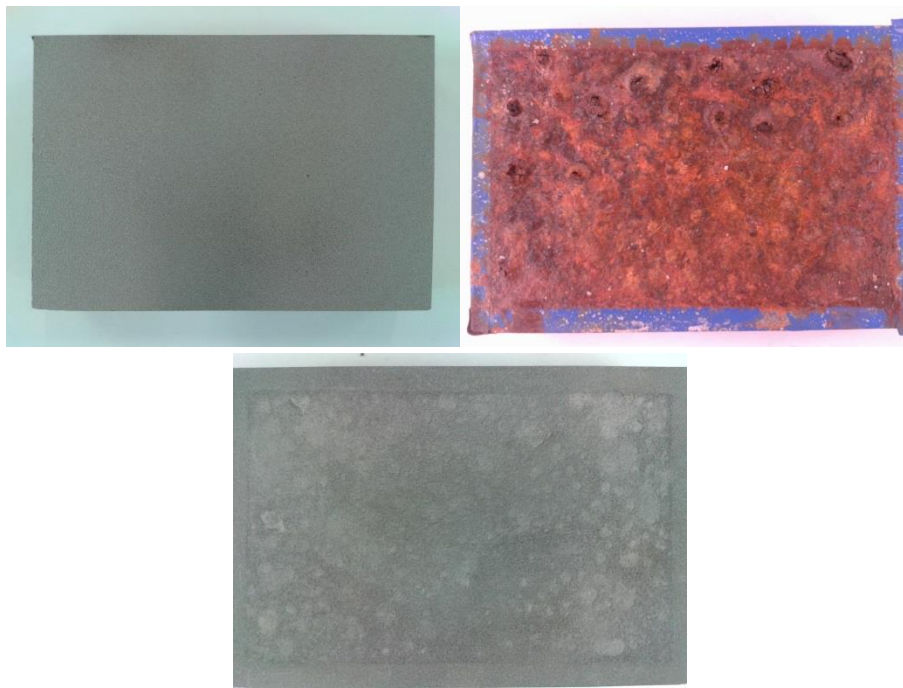
**VIC5 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



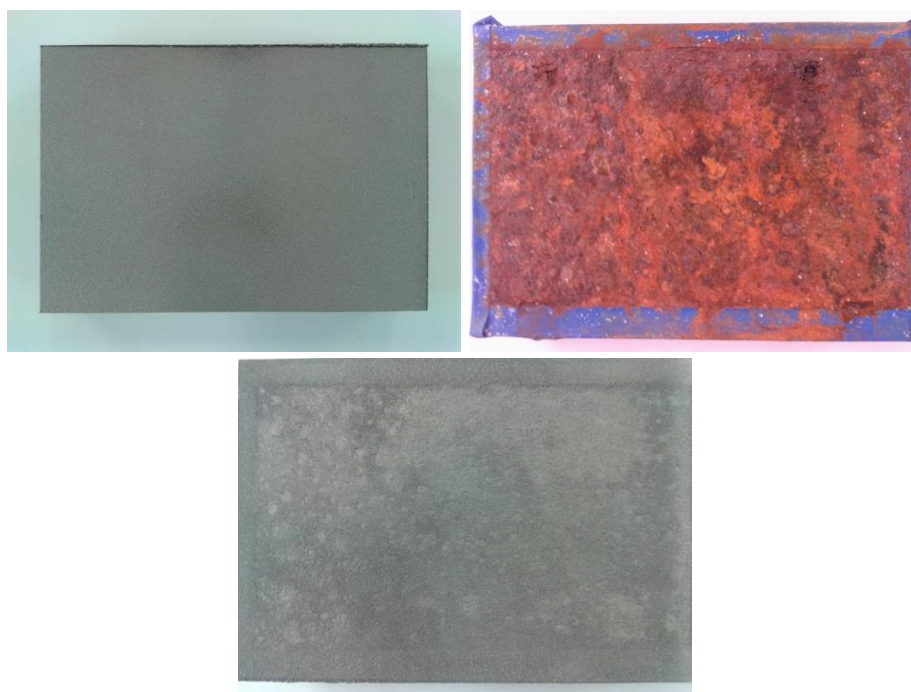
**VIIA6 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIA4 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**

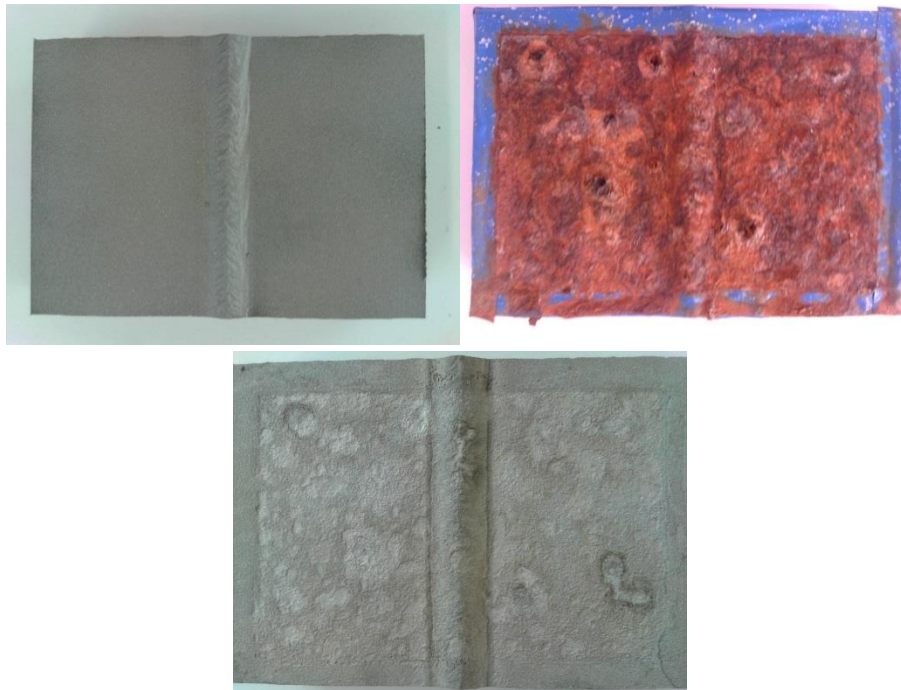


**VIIC3 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**

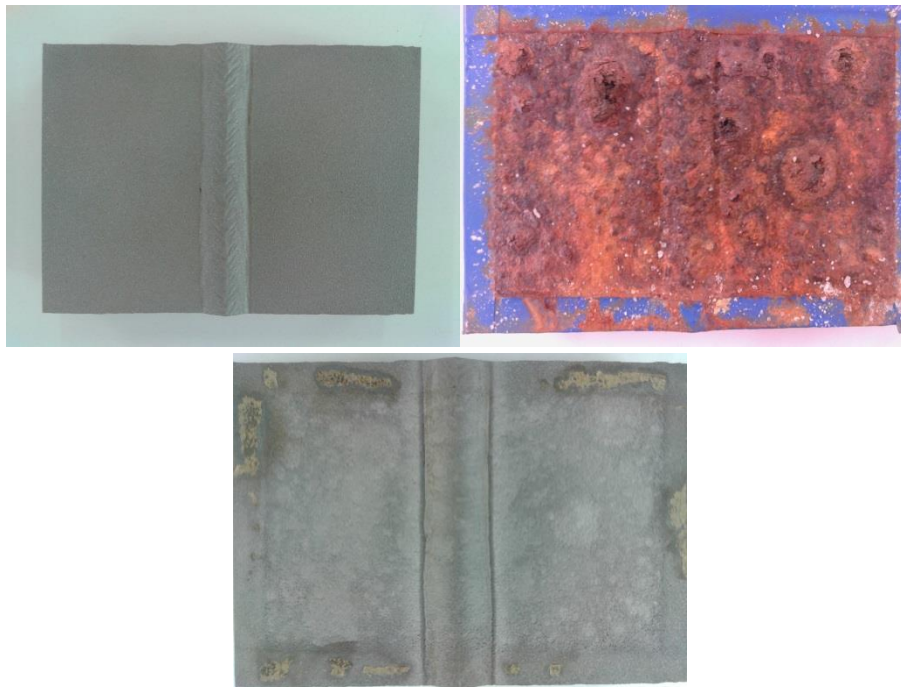




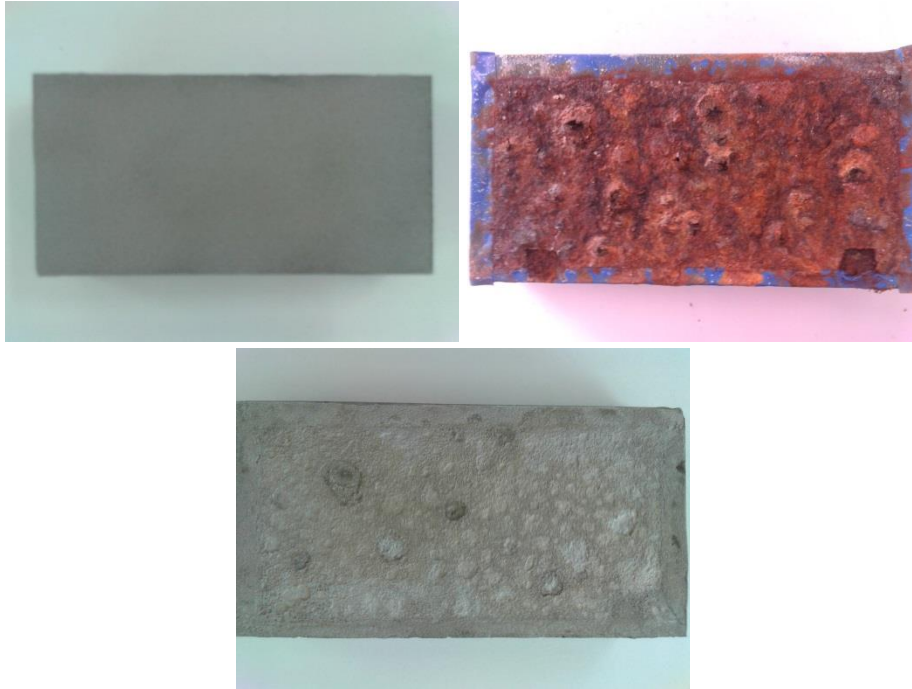
**VIB3 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



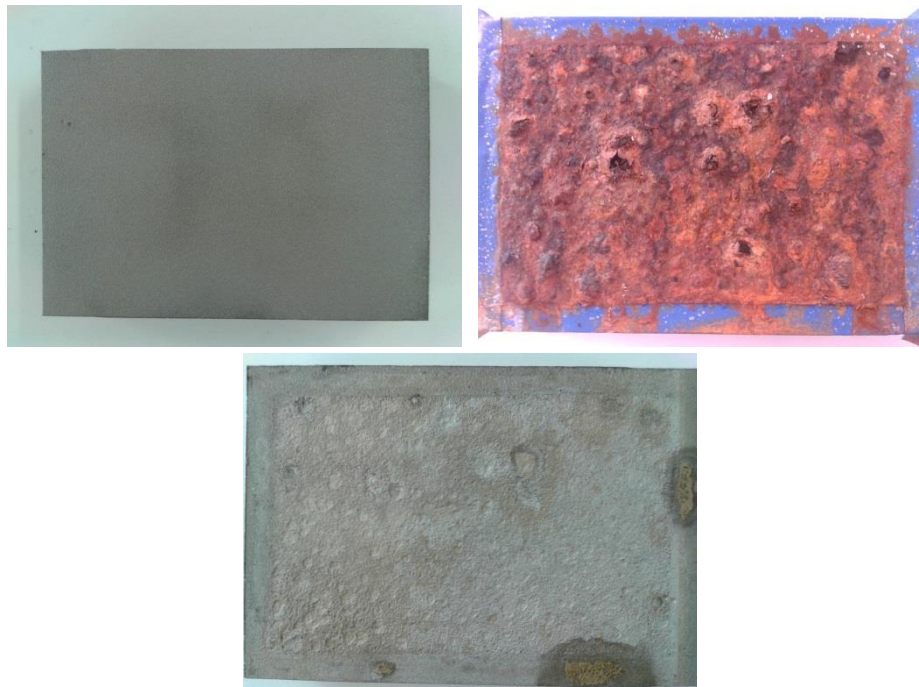
**VIIIB3 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIC6 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**

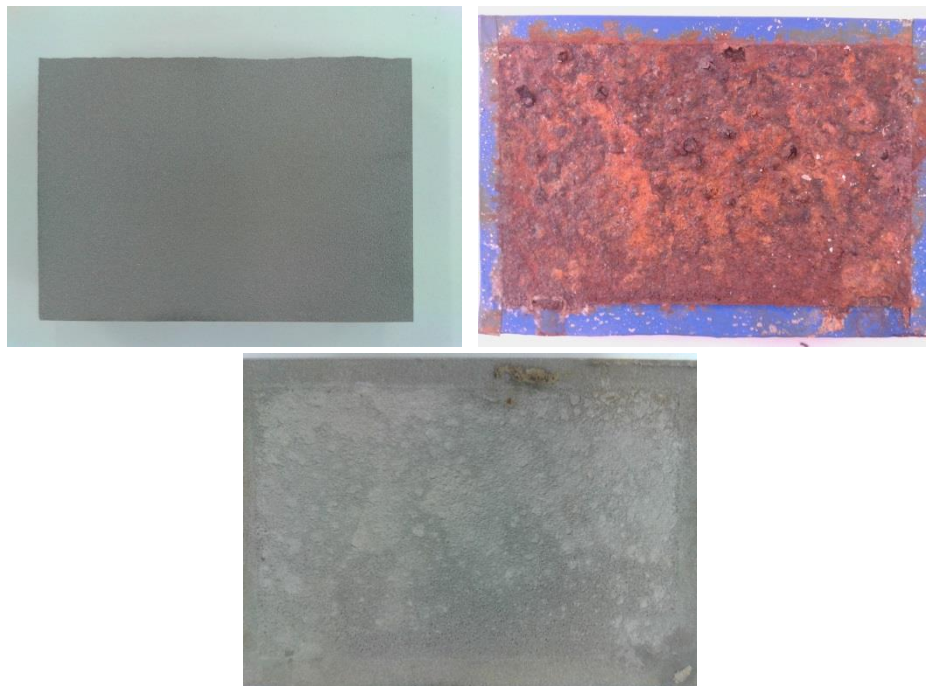


**VIIC4 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**

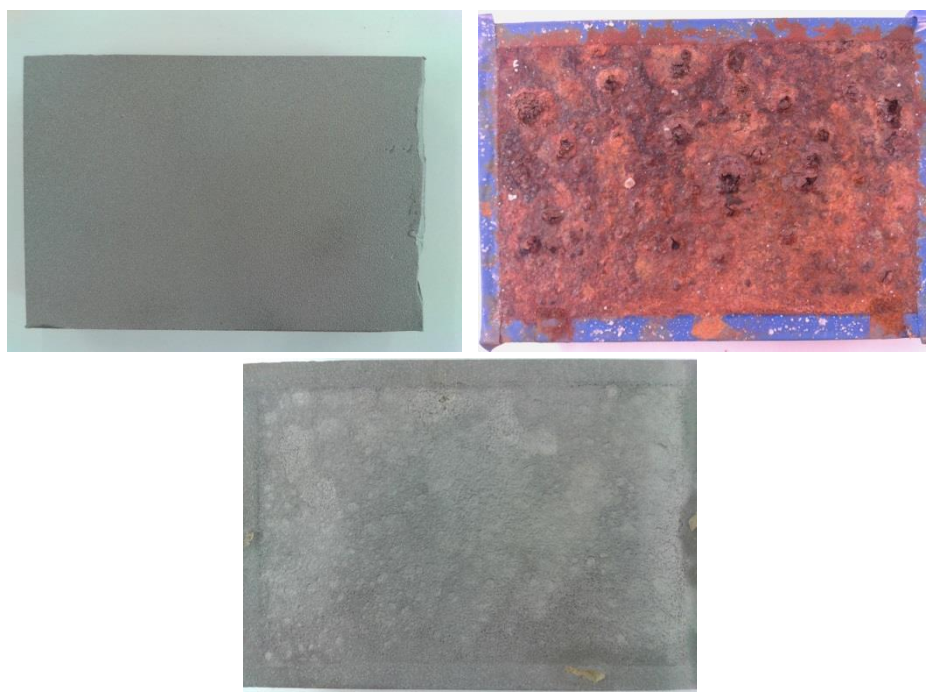




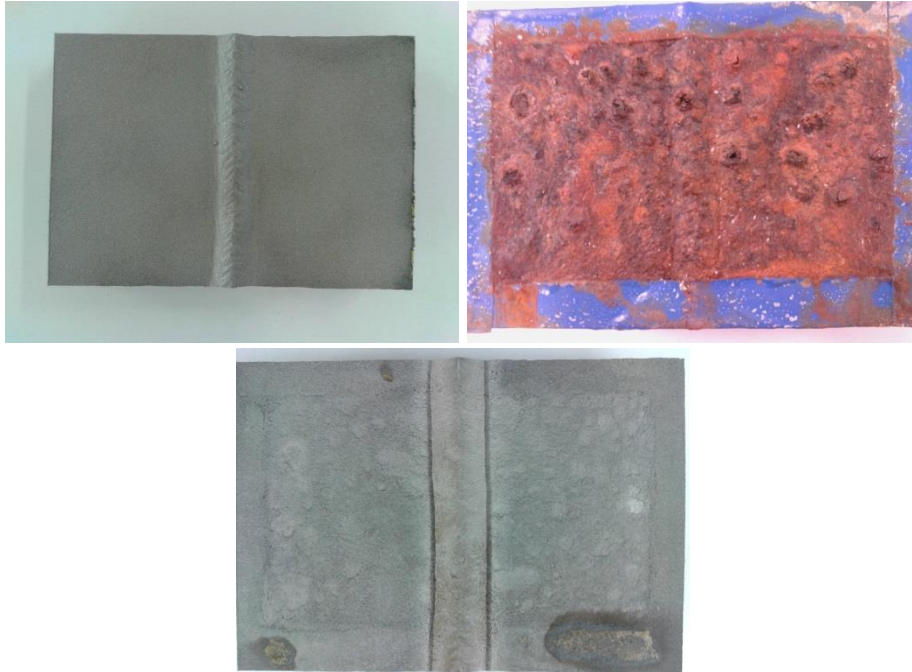
**VIA1 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



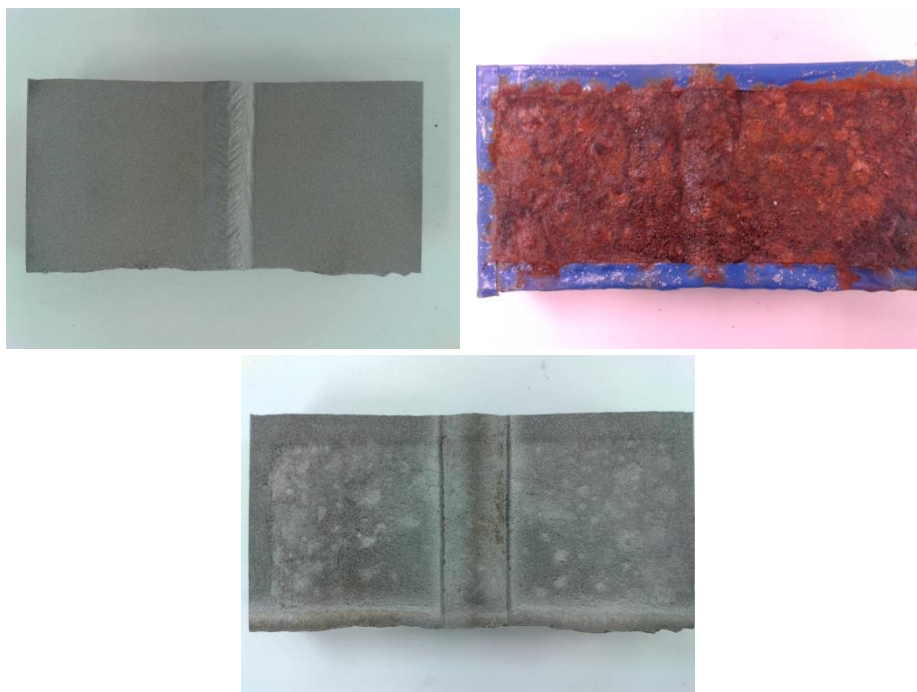
**VIIA2 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



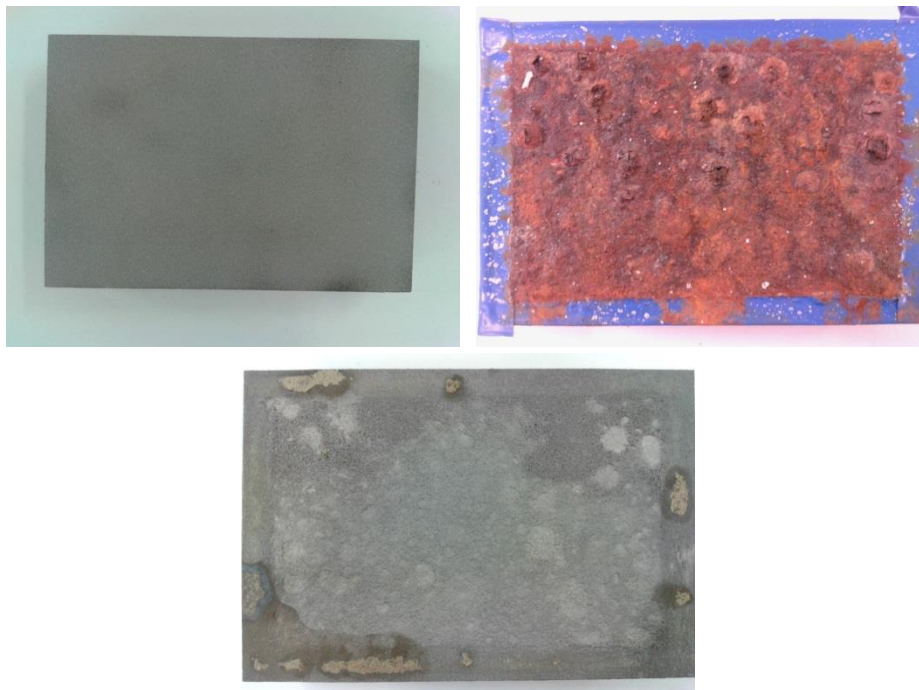
**VIB4 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



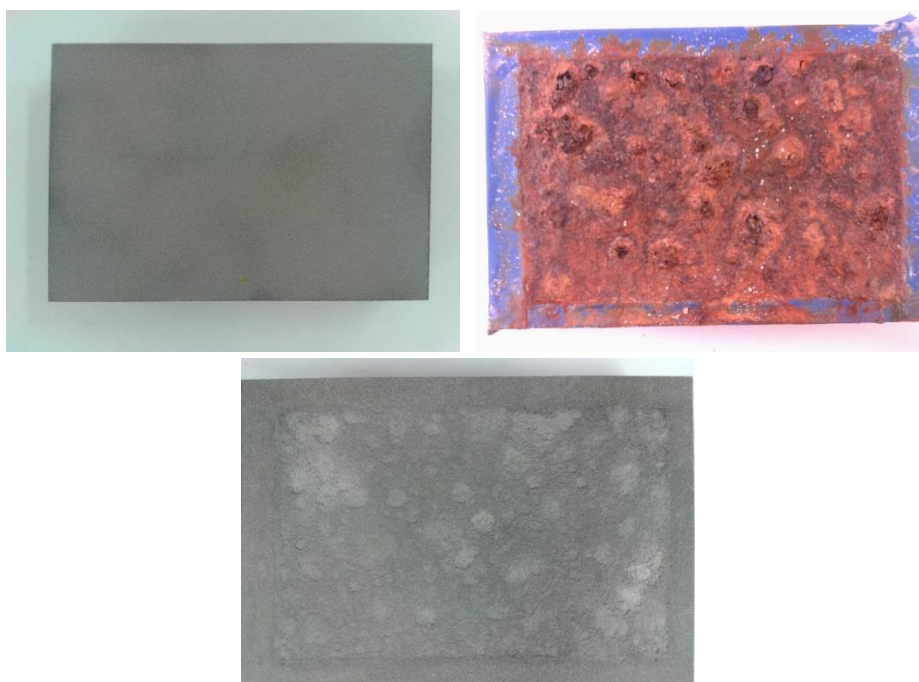
**VIB6 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



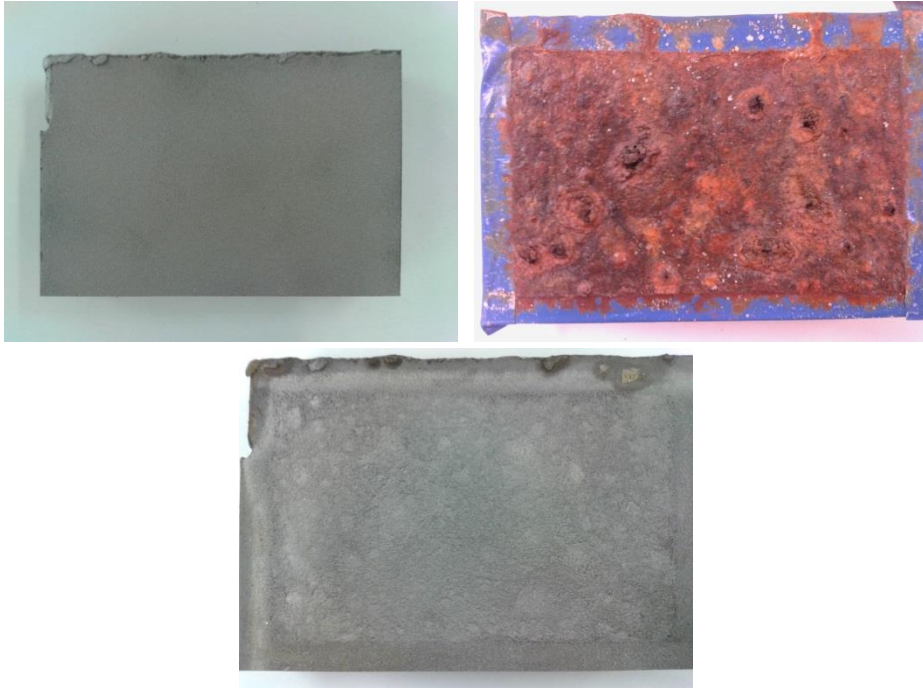
**VIA3 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIC2 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



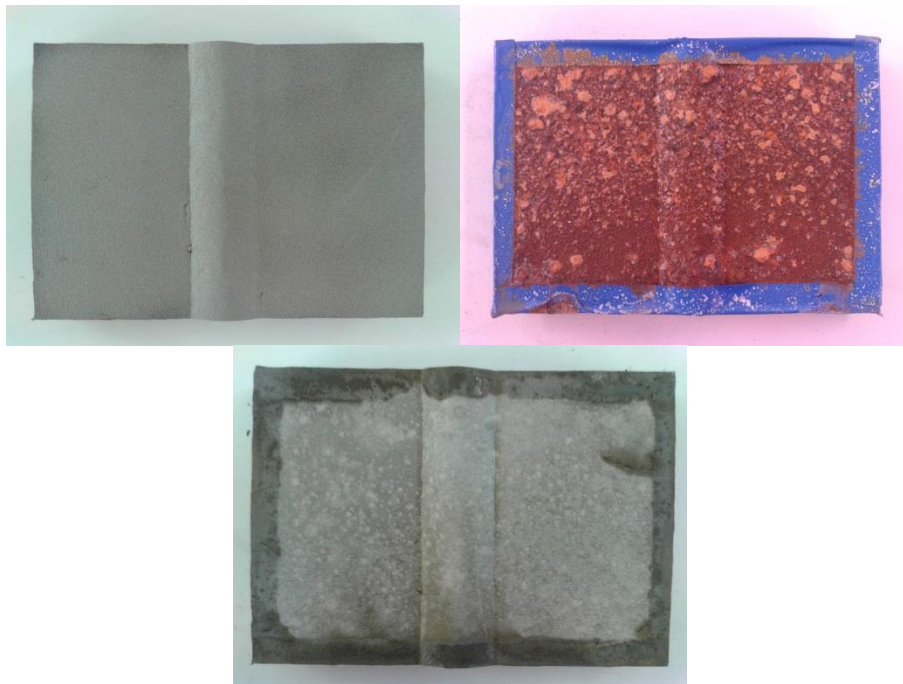
**VIIC1 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



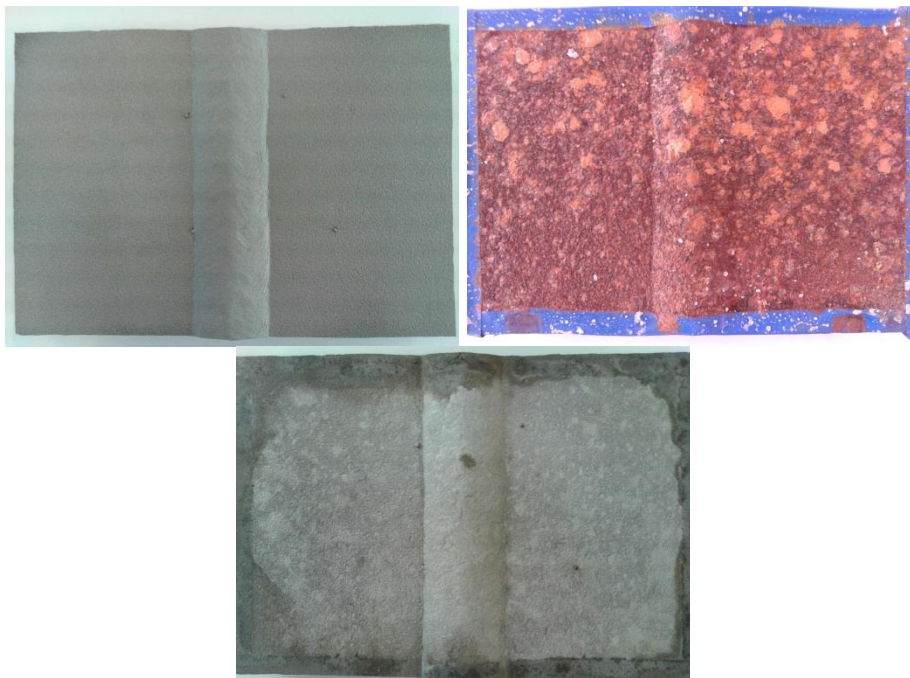


**ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΞΟΥ (FCAW) ΚΑΙ Μ.Β.**

**VIII B3 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**

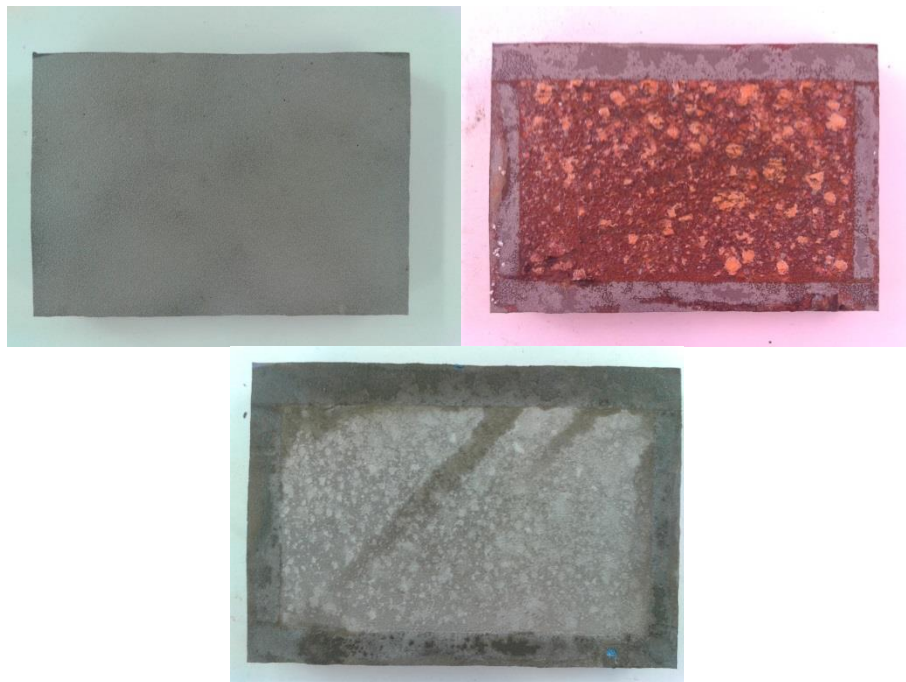


**XB3 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**

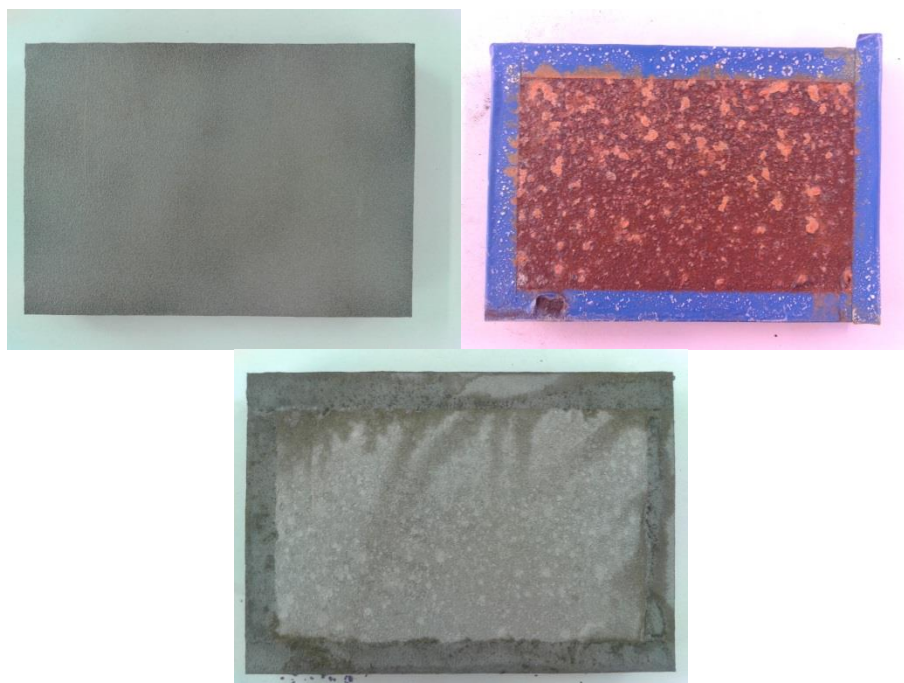




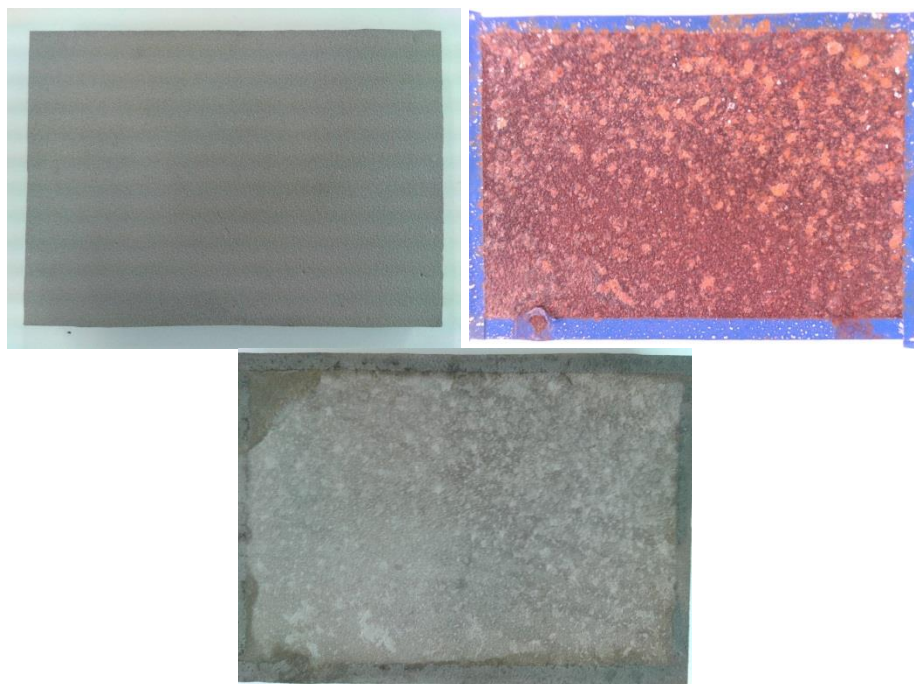
**VIII A2 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



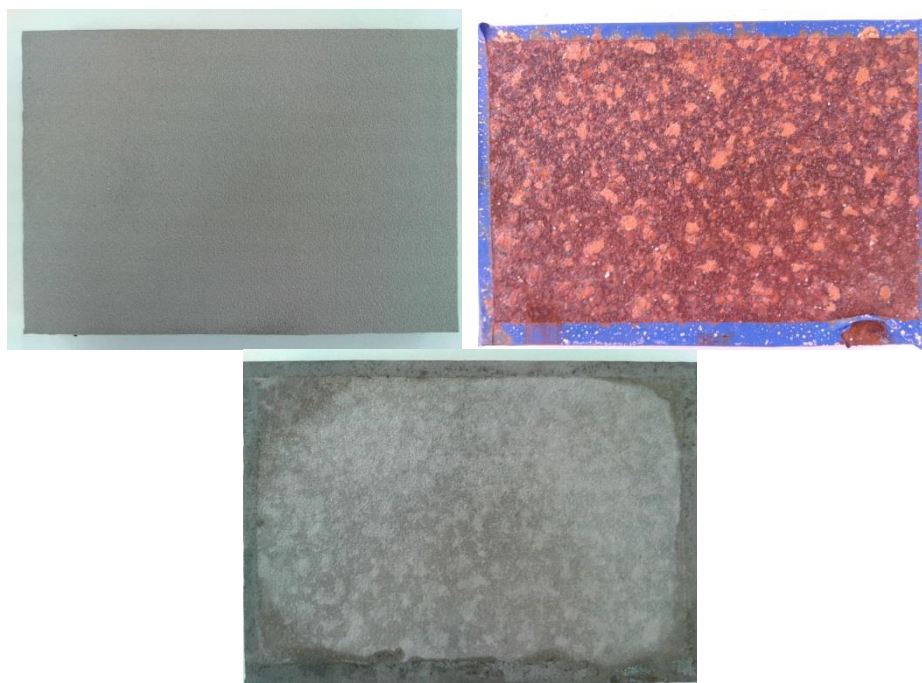
**IX C4 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



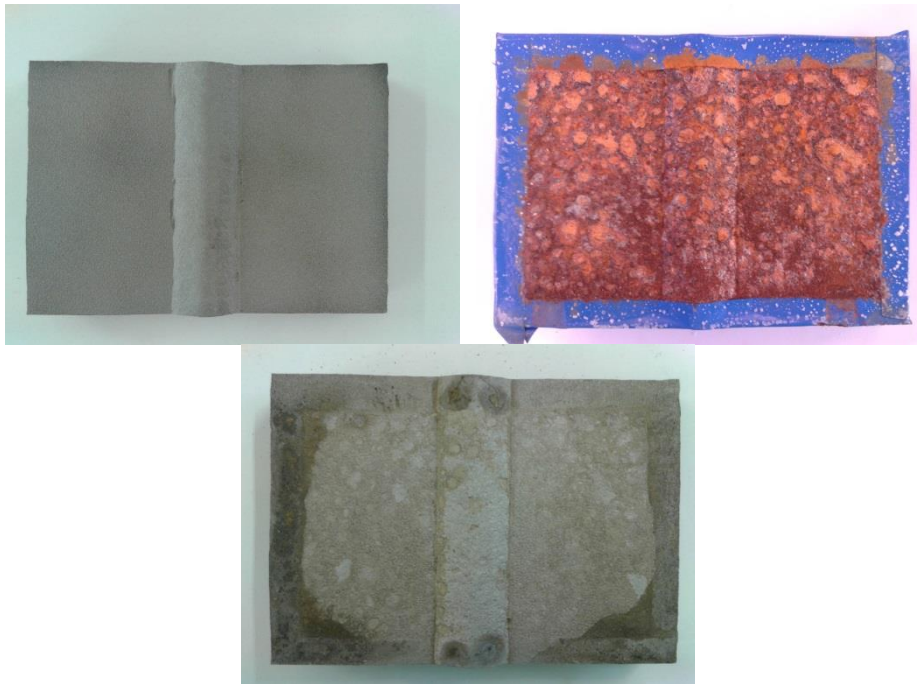
**ΙΧΑ3 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



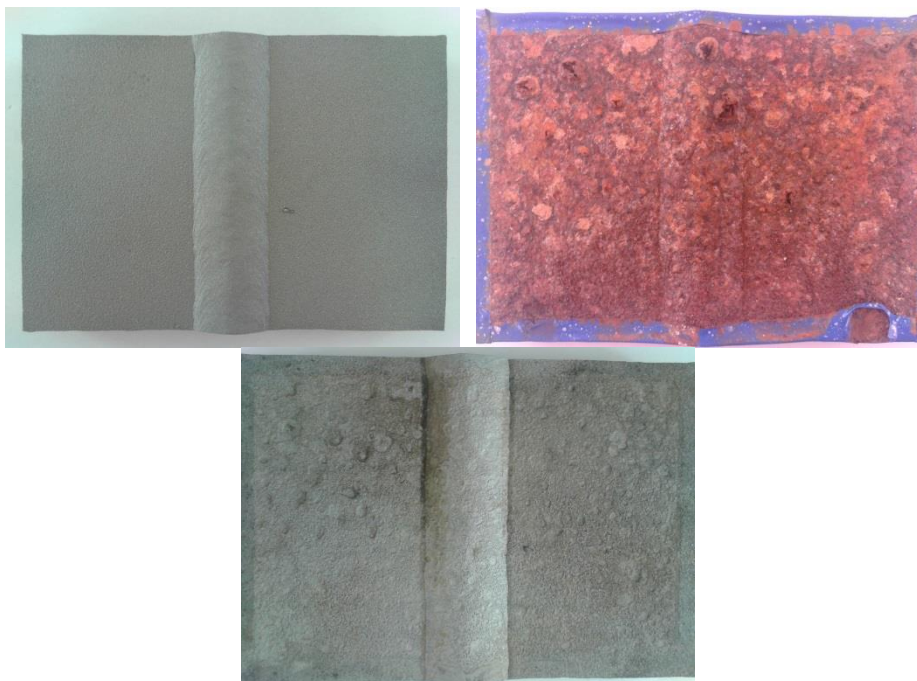
**ΧC1 (5 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΙΧΒ4 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

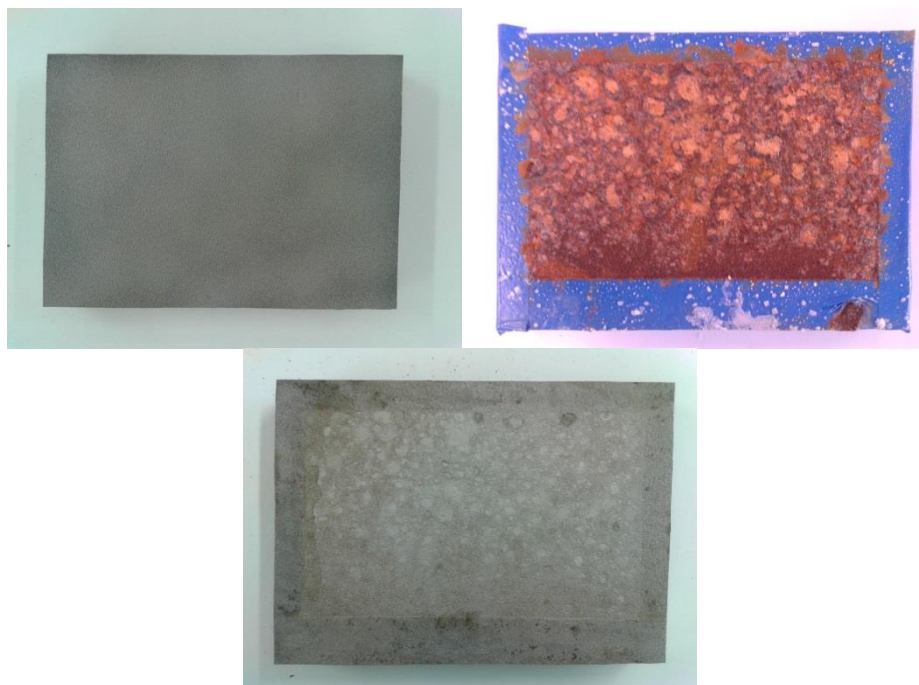


**ΙΧΒ2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

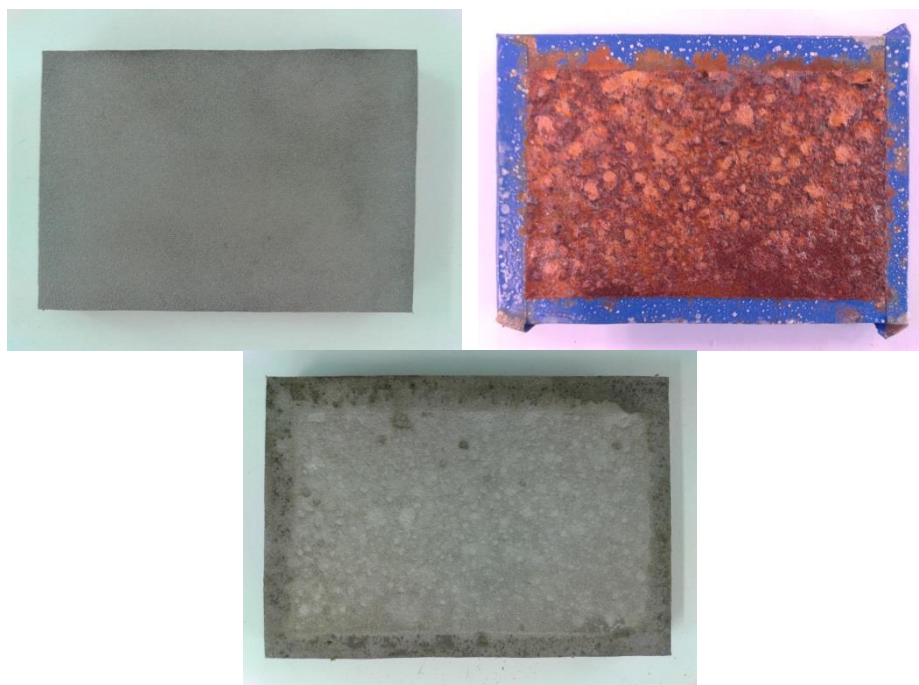




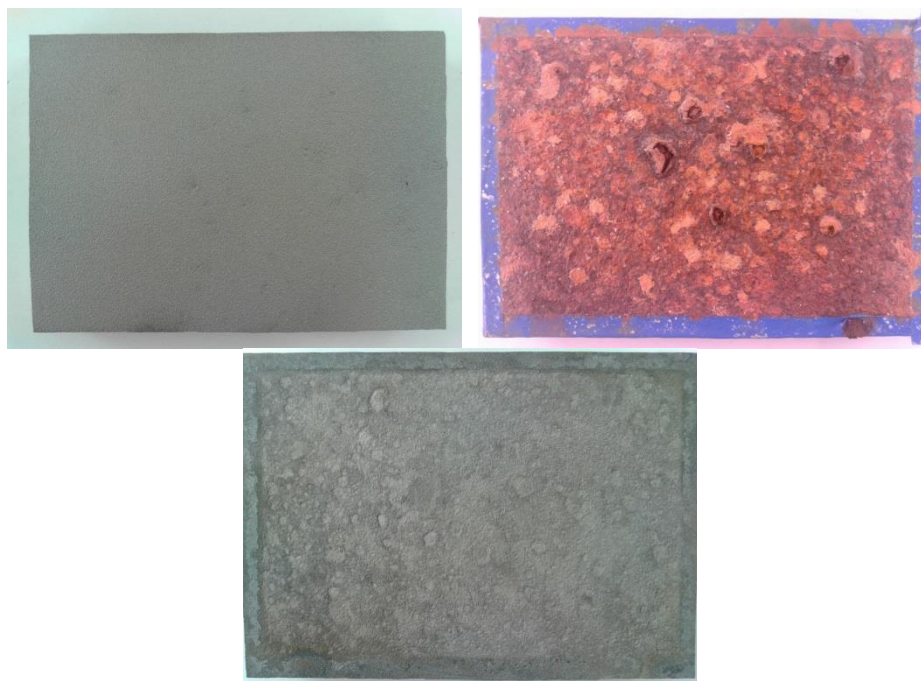
**ΙΧΑ1 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



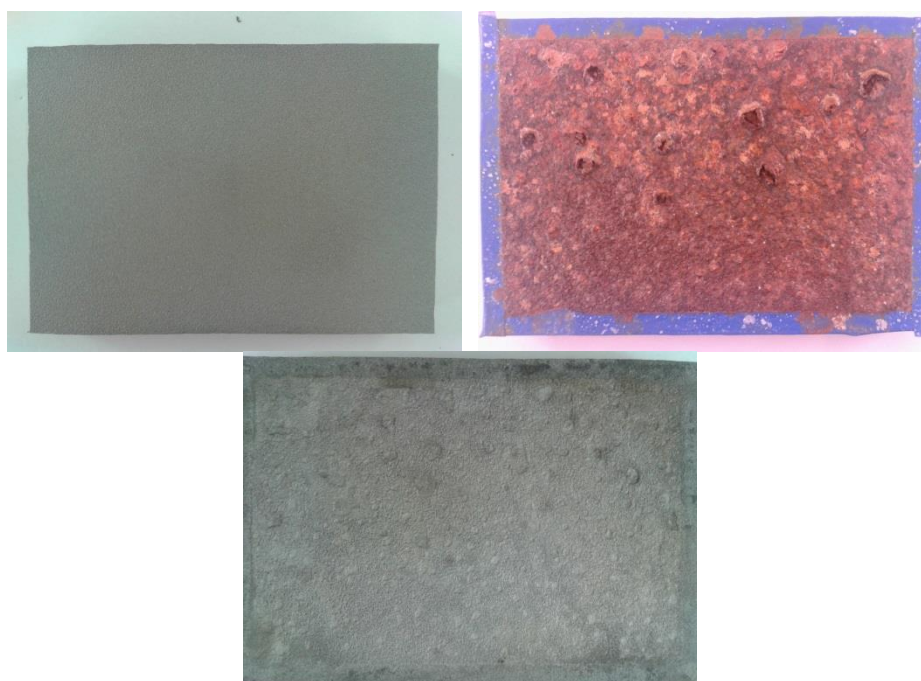
**ΧΑ2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIIIA1 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

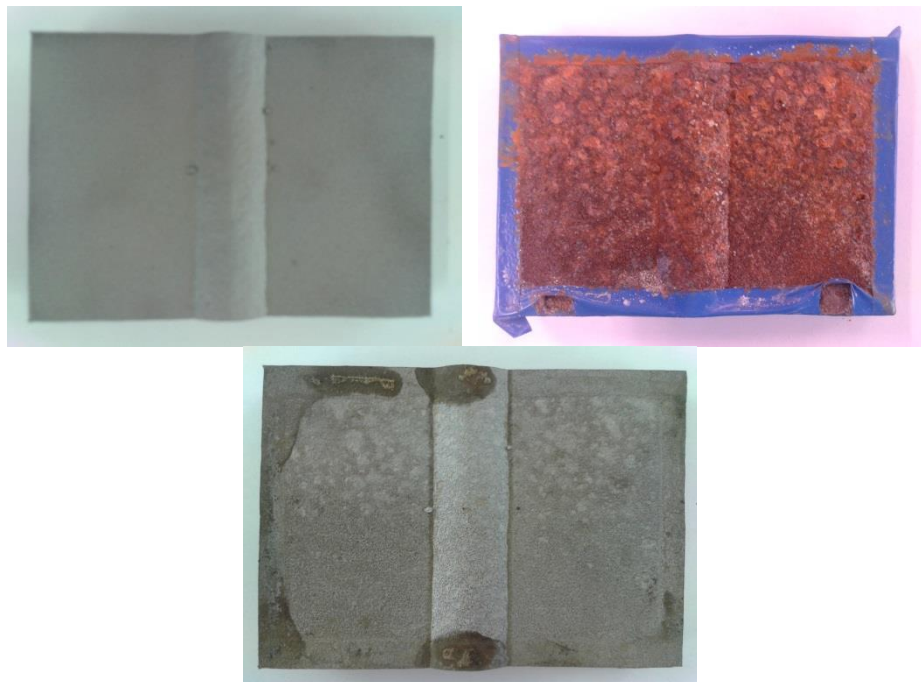


**VIIIC2 (10 ΗΜΕΡΕΣ)**

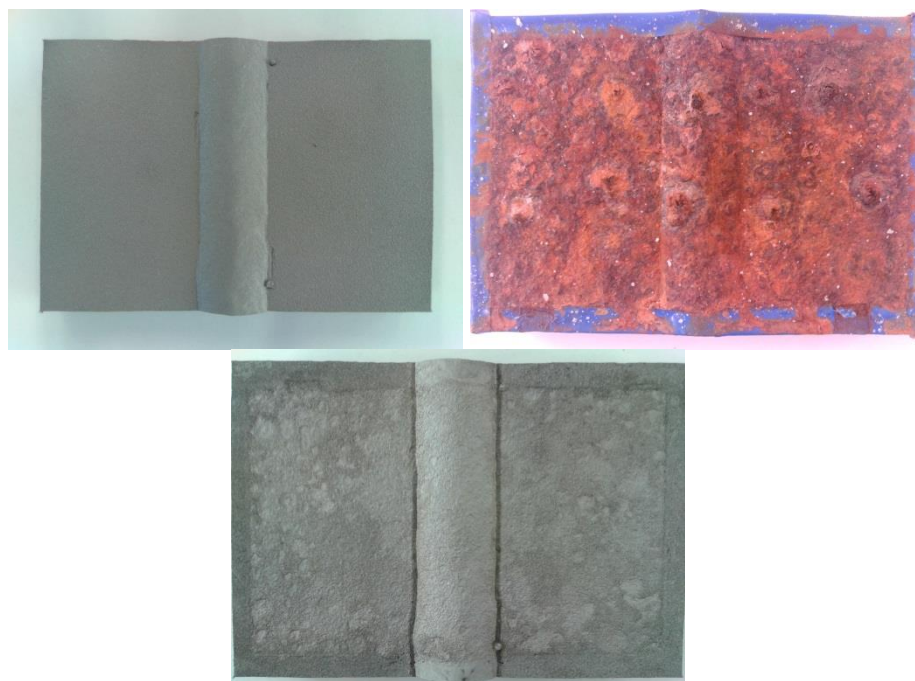




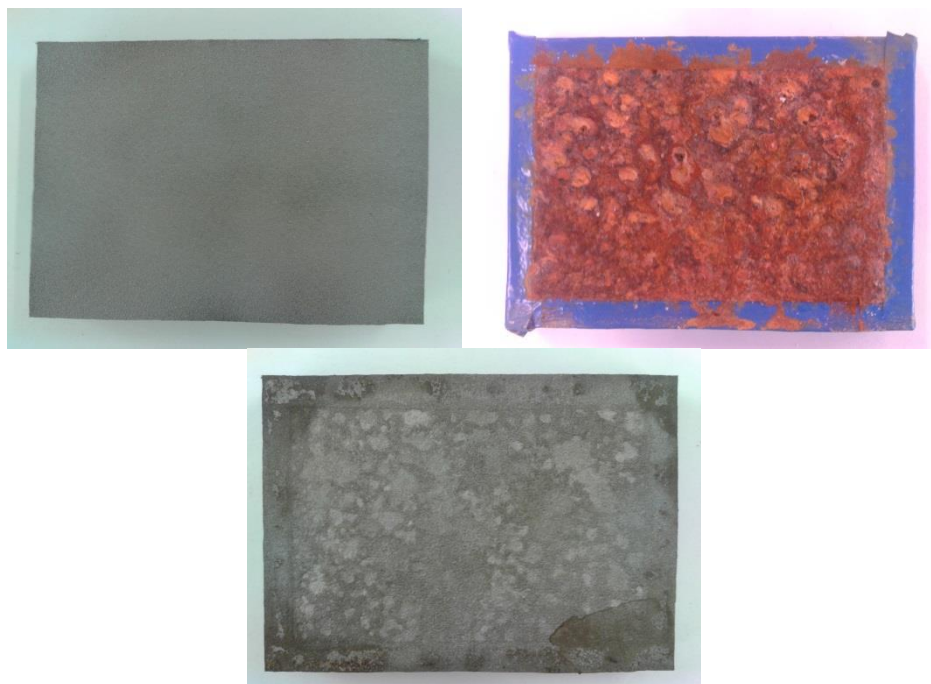
**ΙΧΒ1 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



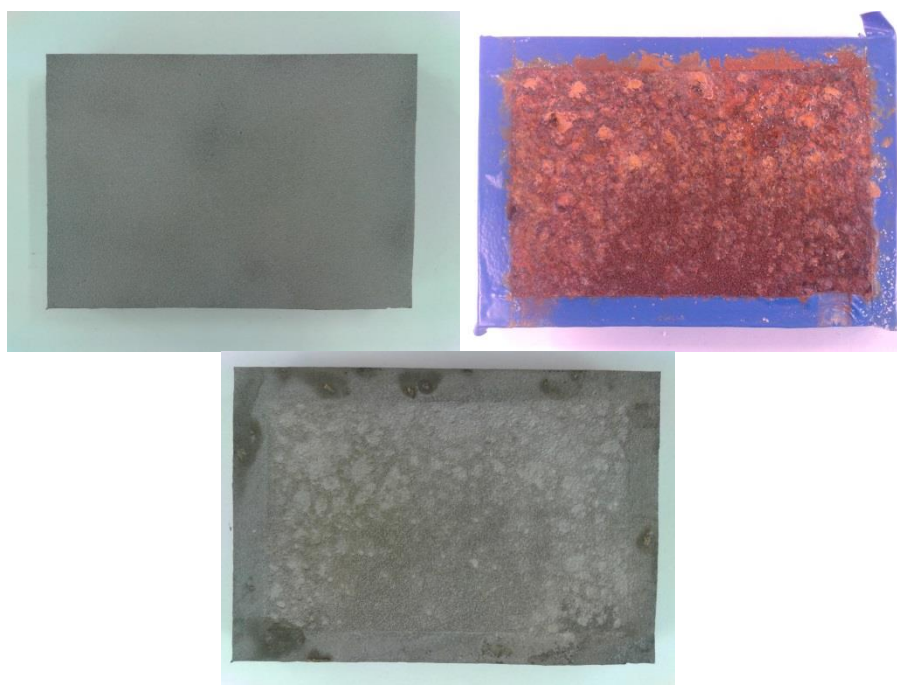
**VIII B4 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



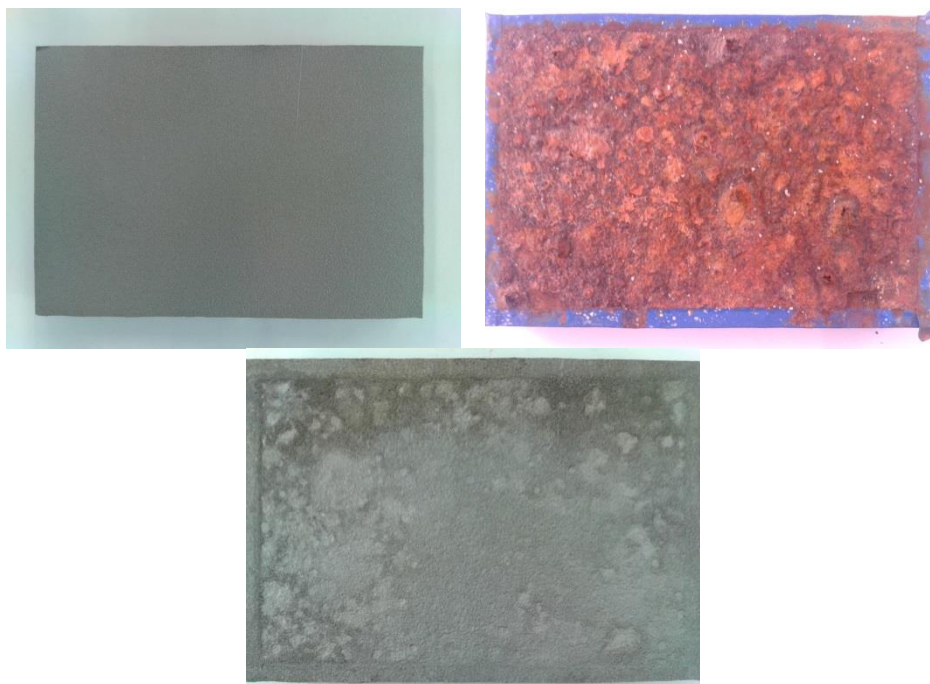
**VIII C3 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



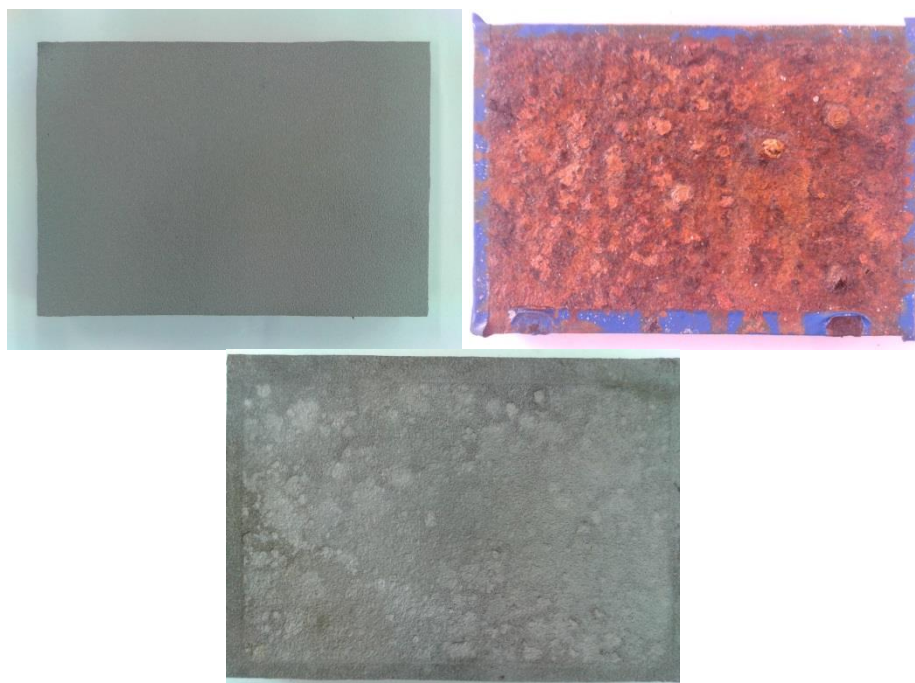
**XC4 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΙΧ3 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**

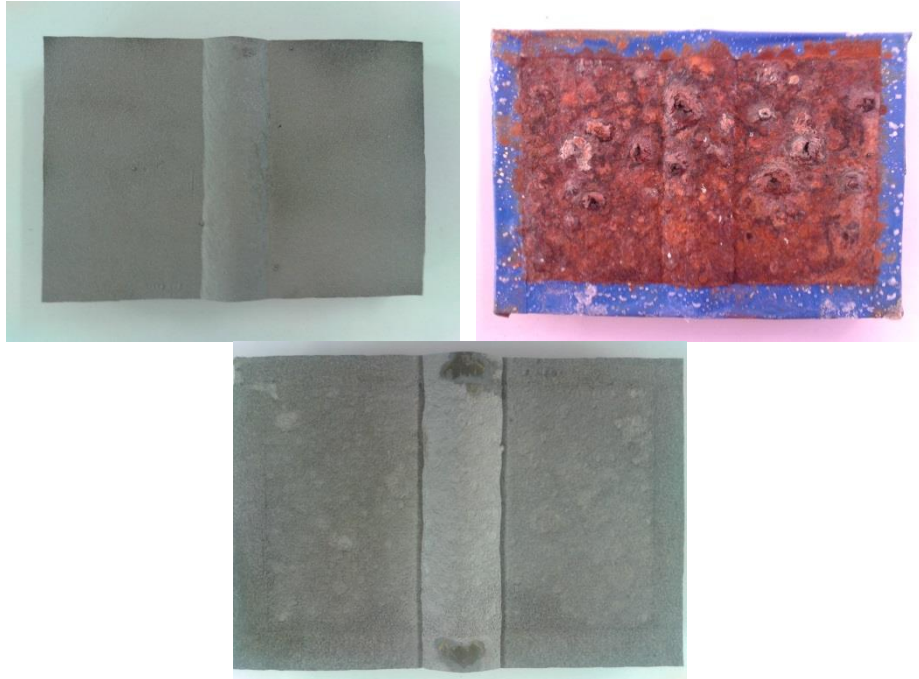


**ΧC2 (15 ΗΜΕΡΕΣ)**

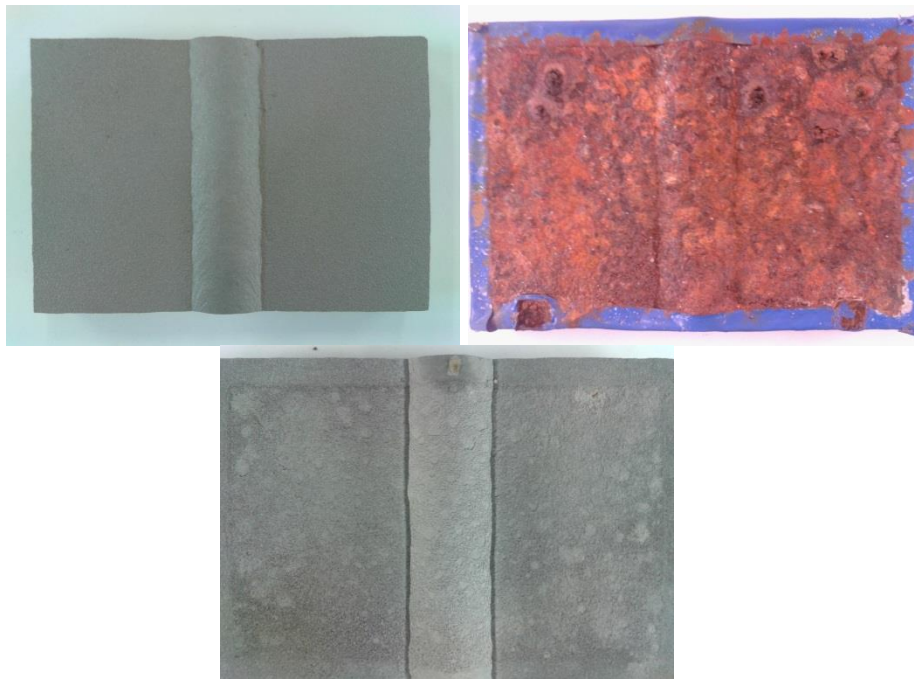




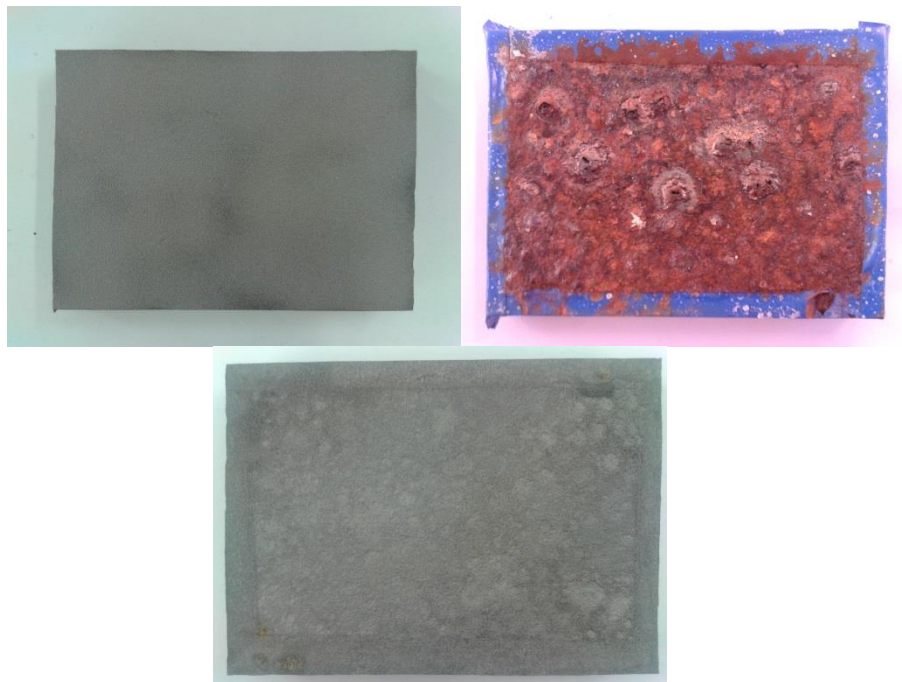
**XB2 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



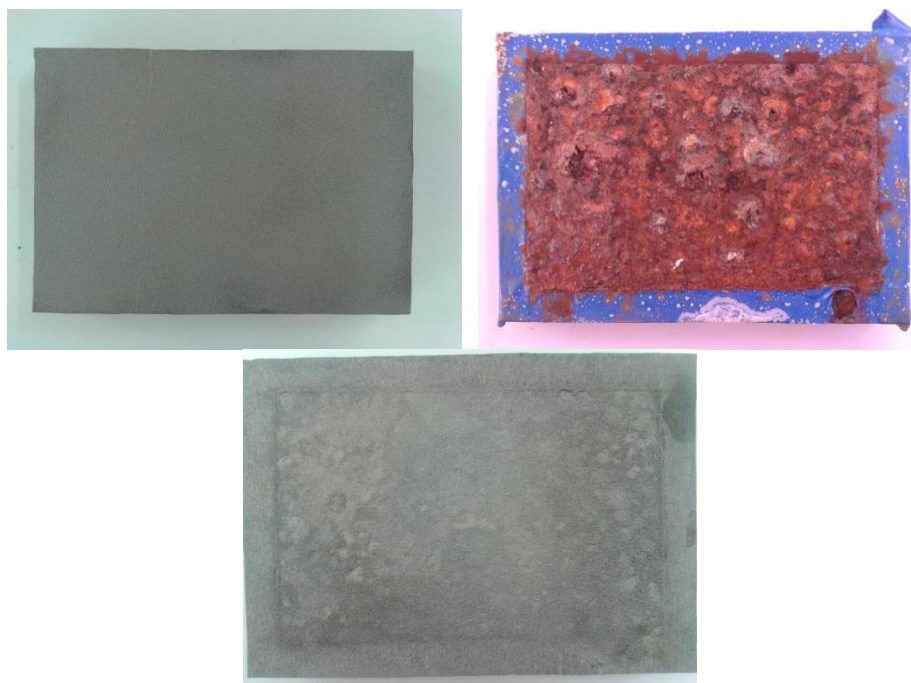
**VIIIB2 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIIIC1 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**

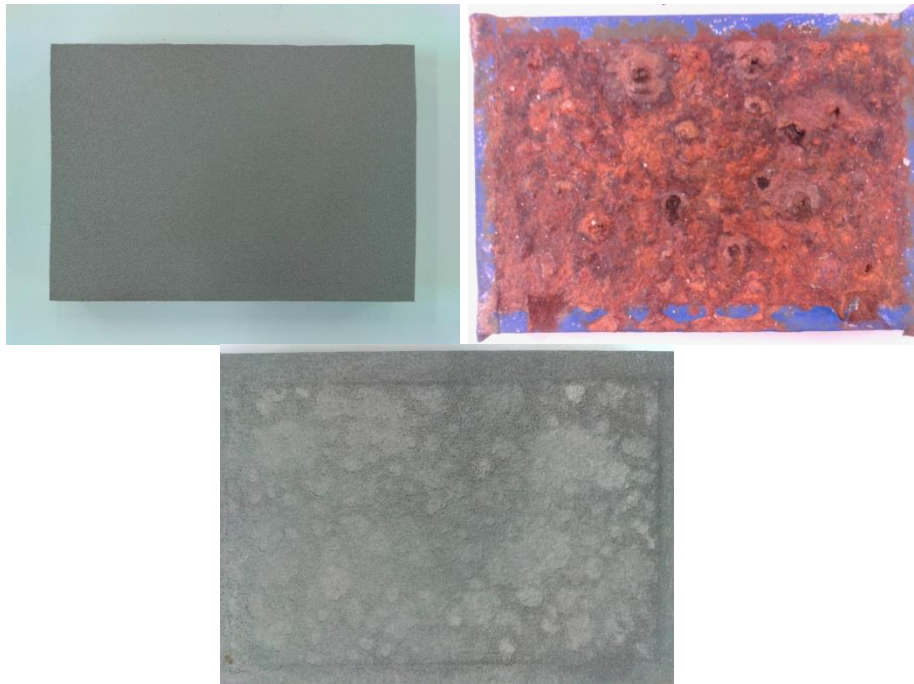


**IXC2 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**

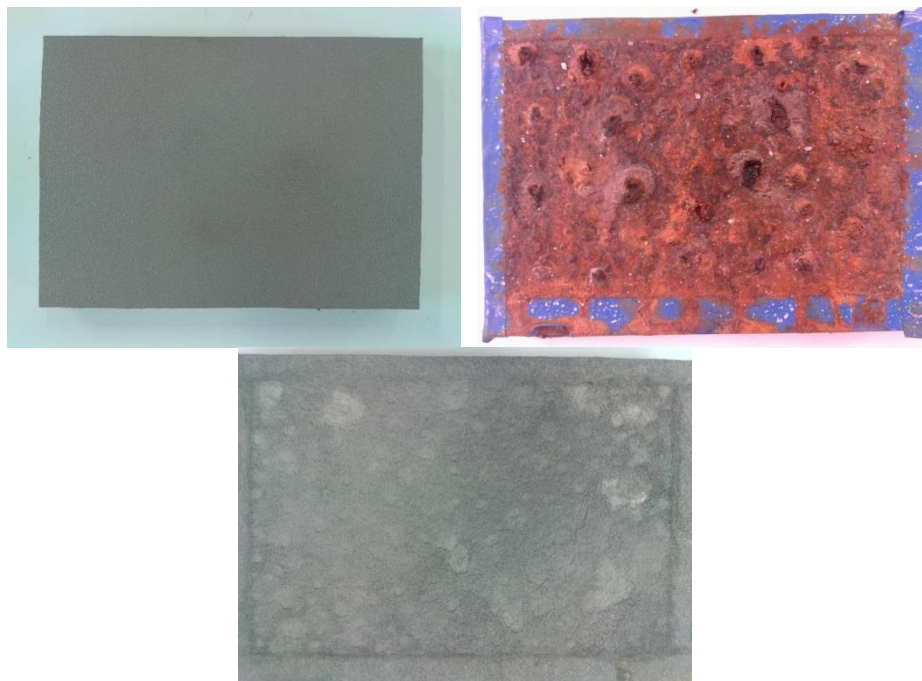




**VIIIC4 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



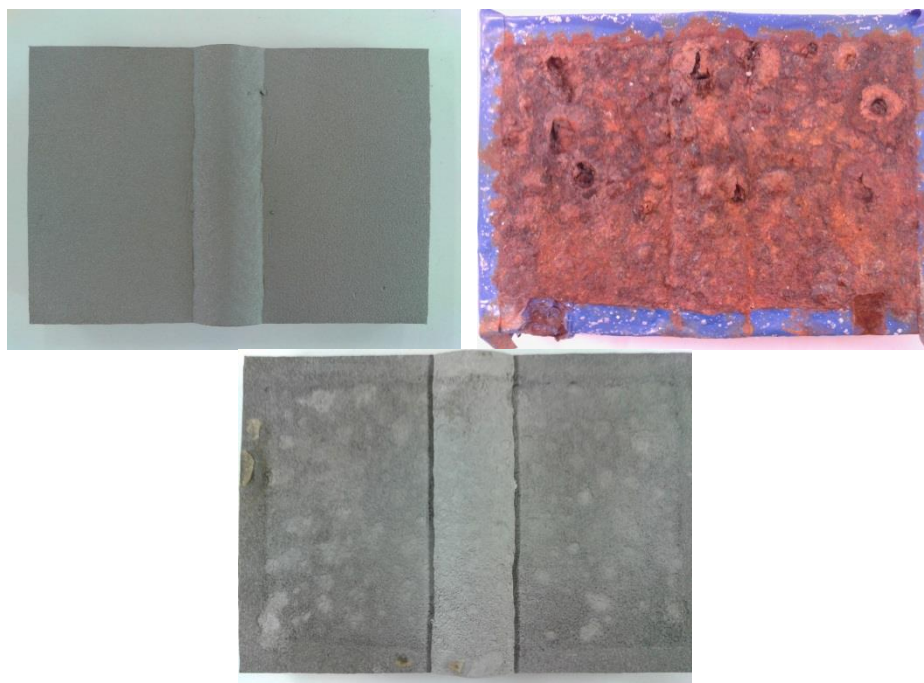
**IXC1 (20 ΗΜΕΡΕΣ)**



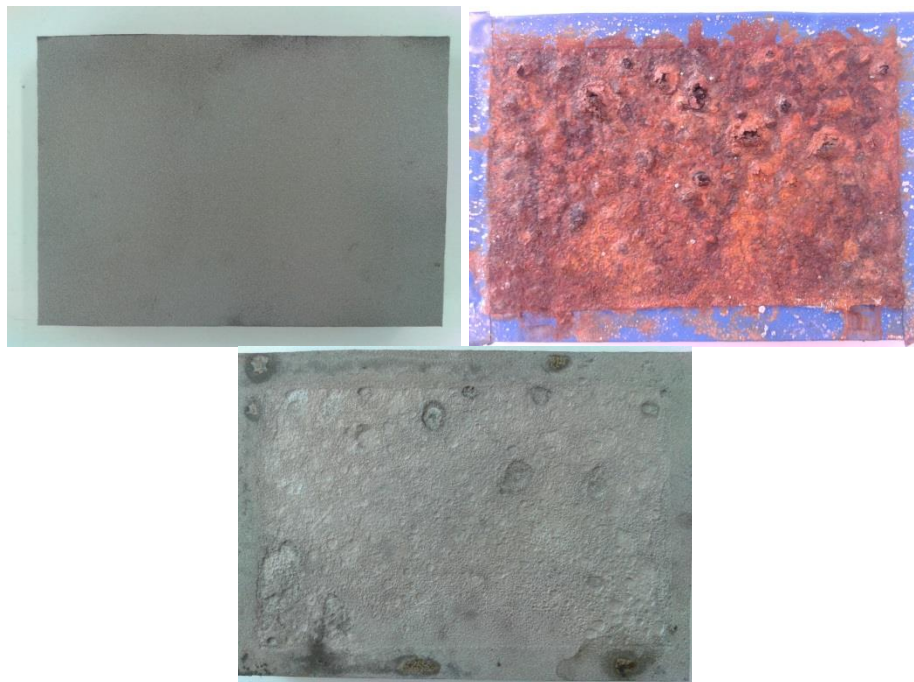
**VIII B1 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



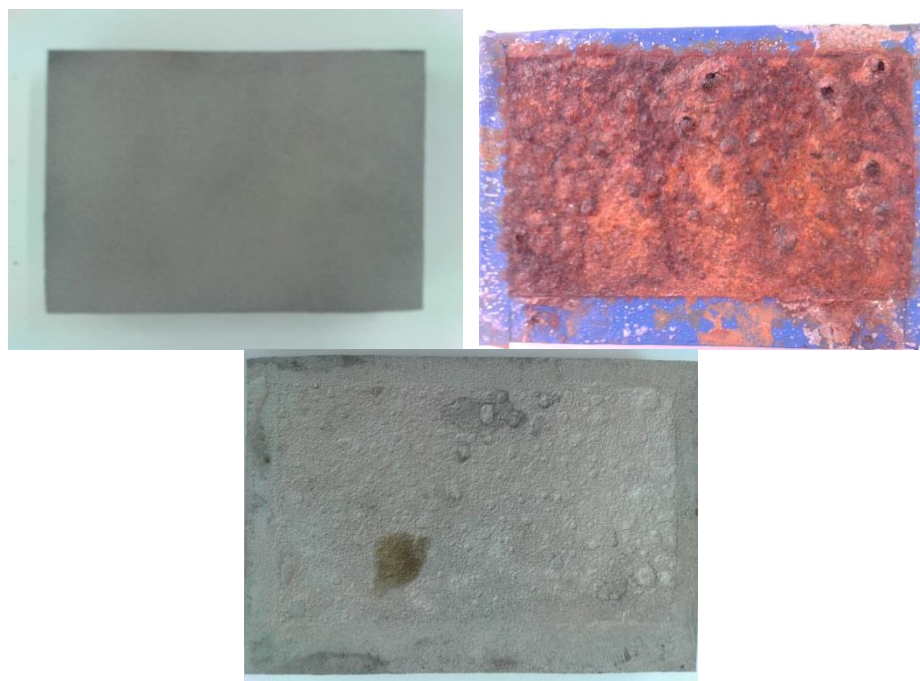
**XB1 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



**VIII A4 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**

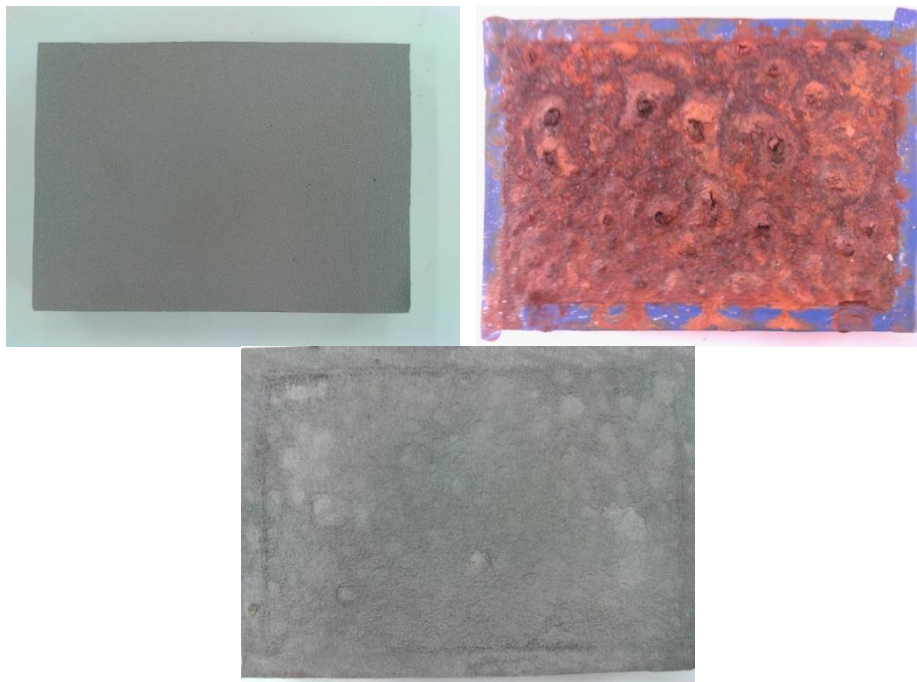


**XA3 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**

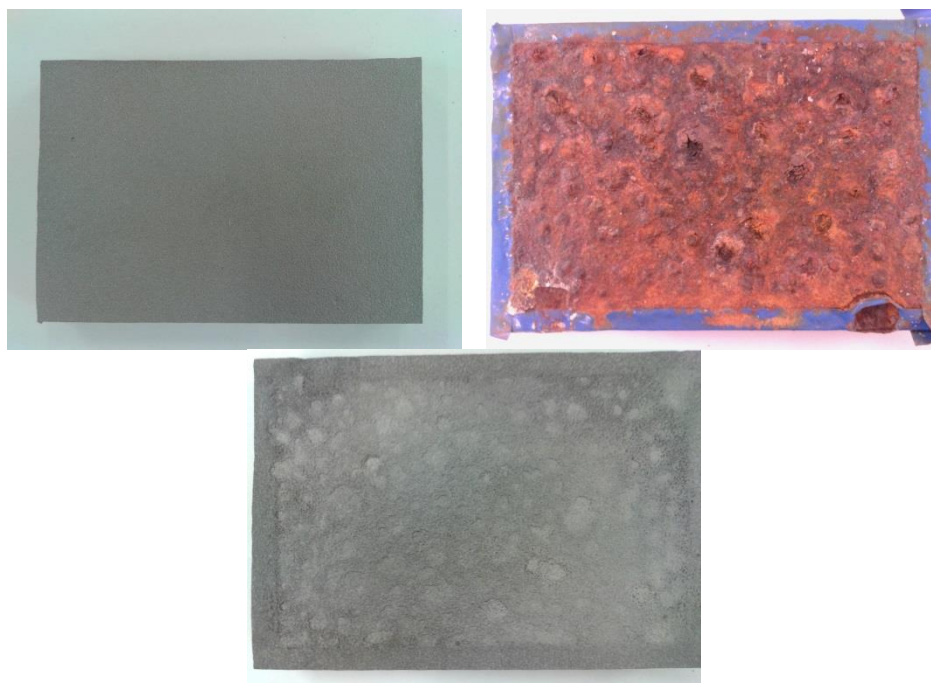




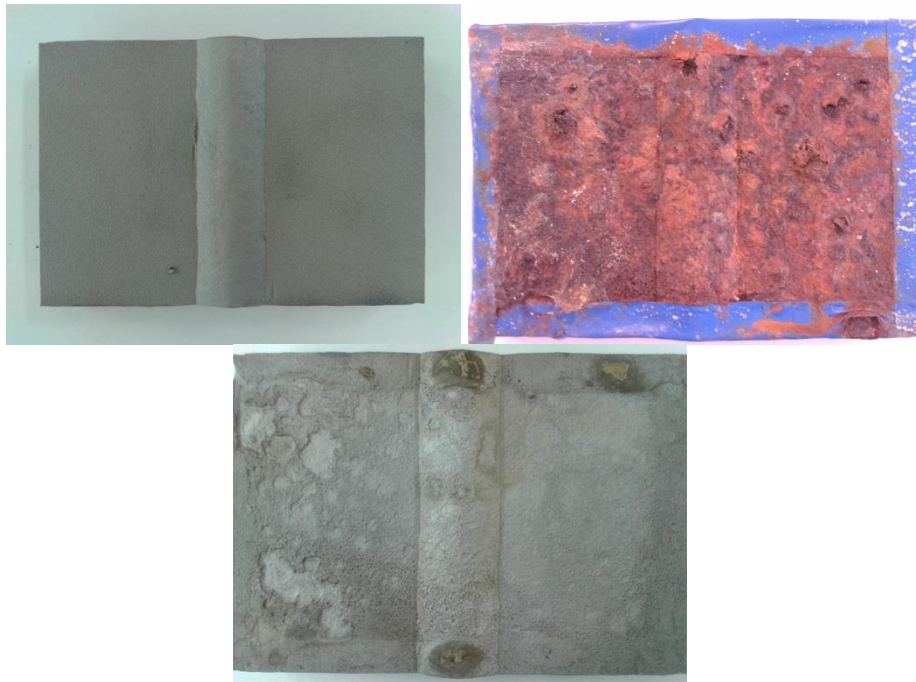
**ΙΧΑ4 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



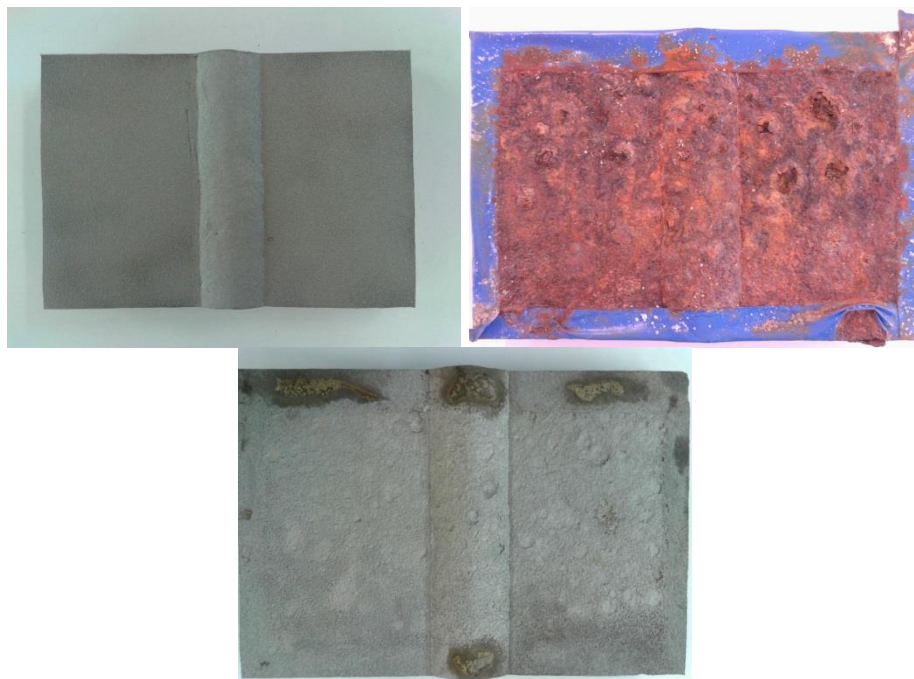
**ΧΑ4 (25 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΙΧΒ3 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**

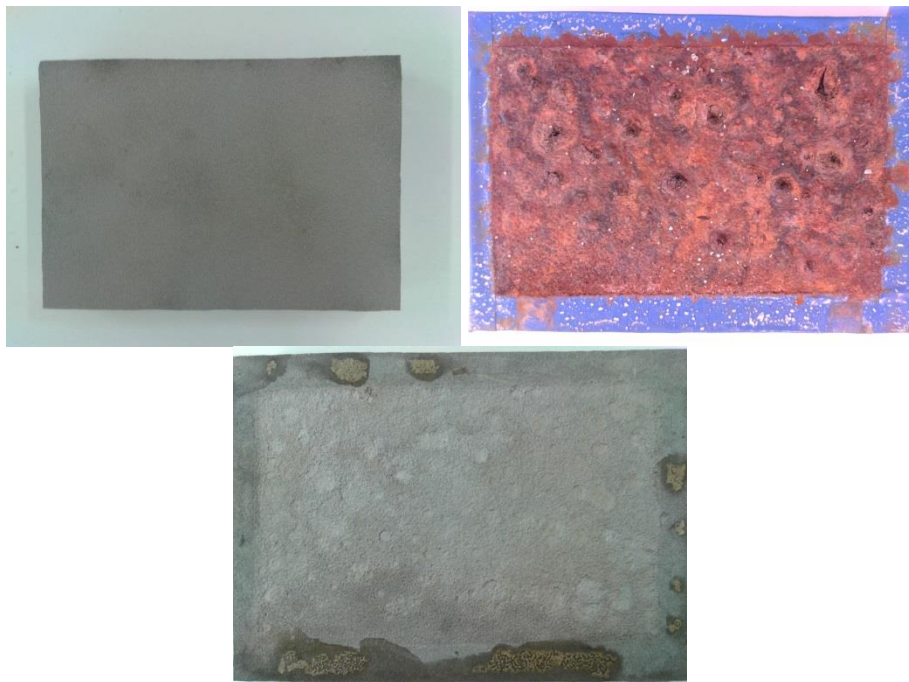


**ΧΒ4 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**

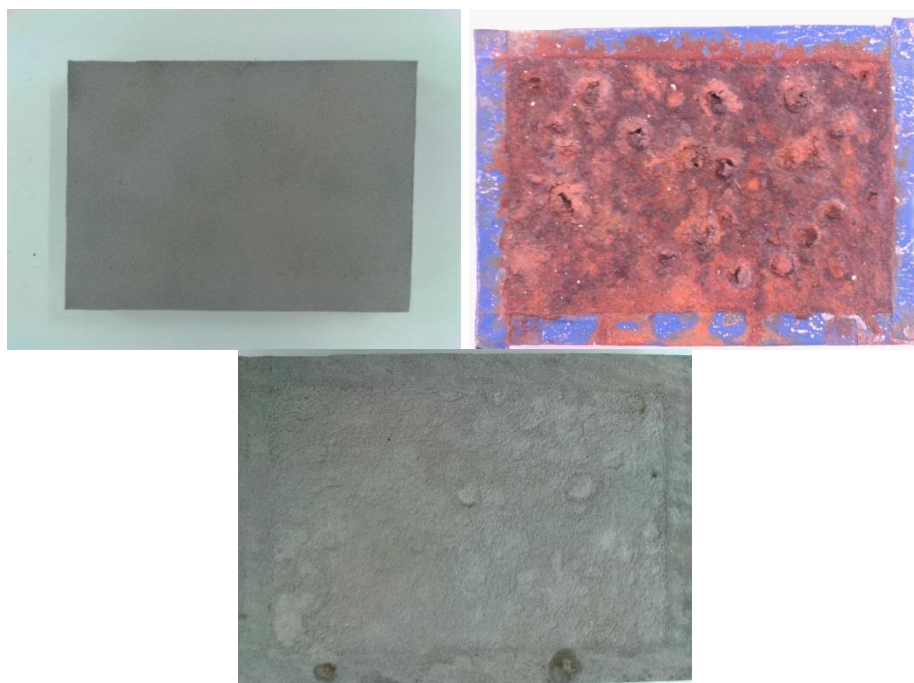




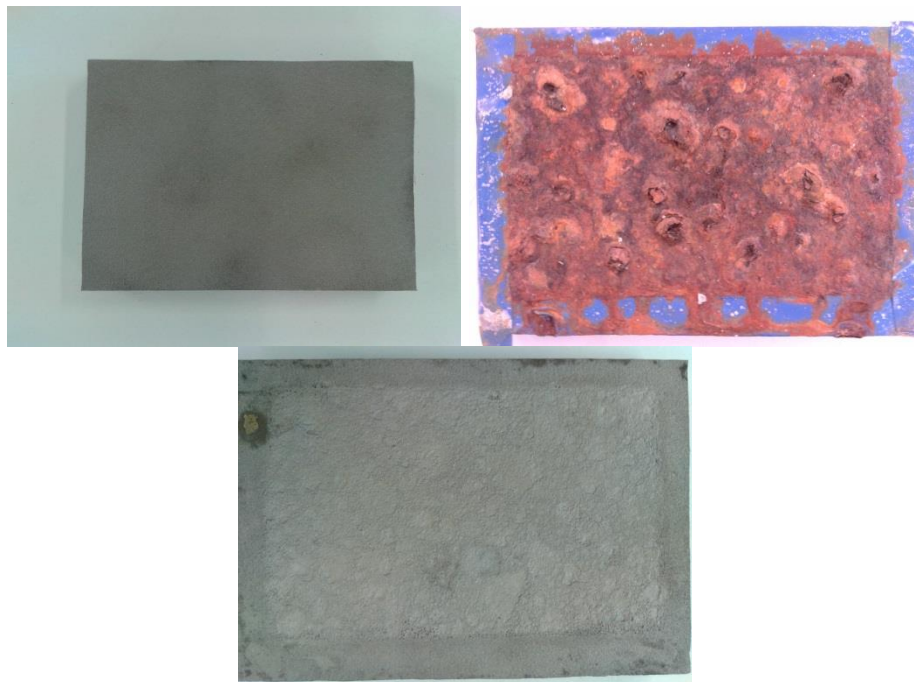
**VIIIΑ3 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**IXΑ2 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΧΑ1 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**



**ΧC3 (30 ΗΜΕΡΕΣ)**

