



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

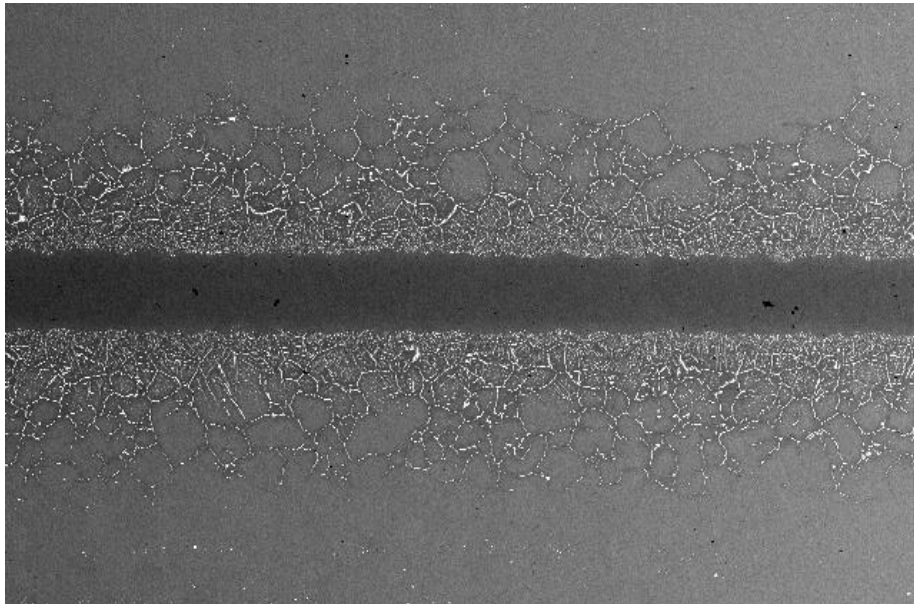
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FILLER METALS) ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΚΟΒΑΛΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ
ΜΕΣΑΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΕ ΦΟΥΡΝΟ ΚΕΝΟΥ
(VACUUM FURNACE BRAZING)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτα Παναγοπούλου



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ.ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FILLER METALS) ΚΑΤΑ ΤΗΝ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΚΟΒΑΛΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ
ΜΕΣΑΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΕ ΦΟΥΡΝΟ ΚΕΝΟΥ
(VACUUM FURNACE BRAZING)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτα Παναγοπούλου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: 28/02/2018

(Υπογραφή)

.....
Γ.Φούρλαρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Δ.Πάνιας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Σπ.Παπαευθυμίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

Ε.Μ.Π Copyright © ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ, Β.ΣΤΕΡΓΙΟΥ, Ε.Α.Β. 2018

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Γεώργιο Φούρλαρη, Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ο οποίος δέχτηκε να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας. Τον ευχαριστώ για τον χρόνο που διέθεσε, για τις υποδείξεις και την καθοριστική συμβολή του σε κάθε ζήτημα προέκυψε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η επιστημονική του καθοδήγηση και συνεργασία είναι υπεύθυνες για την ποιότητα και διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τον Δρ. Σπ. Παπαευθυμίου και τον Δρ. Δ. Πάνια για την τιμή που μου έκαναν με την αποδοχή τους να συμμετάσχουν στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε στενή συνεργασία με την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία και τον Δρ. μηχανικό Βασίλη Στεργίου. Ευχαριστώ θερμά τον κ. Βασίλη Στεργίου για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, για τις συμβουλές, καθώς και για την παροχή των υλικών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Αν. Αλεξανδράτου και Στ. Δεληγιάννη για την συνεισφορά τους στα διάφορα στάδια των πειραματικών δοκιμών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	4
2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	4
2.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΑ.....	5
2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΩΝ	7
2.4 ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΑ Co	8
2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΩΝ	12
2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΩΝ Co ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ M53-P2	14
2.7 ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΣΑΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (BRAZING)	17
2.8 ΜΕΘΟΔΟΣ VACUUM FURNACE BRAZING	20
2.9. DIFFUSION BRAZING	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	27
3.1. ΣΚΟΠΟΣ-ΣΤΟΧΟΣ.....	27
3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΒΑΣΗΣ.....	29
3.3. ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FILLER METALS).....	30
3.4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	36
3.4.1. ΚΟΠΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	36
3.4.2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	40
3.4.3. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	45
3.5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ.....	46

3.5.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM).....	46
3.5.2. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ.....	47
3.6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ.....	48
3.6.1. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	51
4.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM).....	51
4.1.1. ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ.....	51
4.1.2. ΔΟΚΙΜΙΟ 1-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4776.....	52
4.1.3. ΔΟΚΙΜΙΟ 2-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4779.....	64
4.1.4. ΔΟΚΙΜΙΟ 3-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΒNi-9.....	74
4.2. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ.....	83
4.2.1. ΔΟΚΙΜΙΟ 1-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4776.....	83
4.2.2. ΔΟΚΙΜΙΟ 2-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4779.....	84
4.2.3. ΔΟΚΙΜΙΟ 3-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΒNi-9.....	85
4.3. ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1- Επίδραση συνήθων κραματικών στοιχείων στα υπερκράματα.....	7
Πίνακας 2.2- Έυρος περιεκτικότητας για συνήθη κραματικά στοιχεία στα υπερκράματα.....	7
Πίνακας 2.3- Ενδομεταλλικές ενώσεις που μπορούν να σχηματιστούν σε υπερκράματα κοβαλτίου.....	11
Πίνακας 2.4- Φάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στο κράμα κοβαλτίου Haynes 25.	11
Πίνακας 3.1- Χημική σύσταση του υπερκράματος κοβαλτίου Haynes 25 ή L-605.	29
Πίνακας 3.2- Τυπικές μηχανικές ιδιότητες του Haynes 25 ή L-605 σε μονάδες SI	30
Πίνακας 3.3- Χημική σύσταση του κράματος AMS 4776 (filler metal).....	31
Πίνακας 3.4- Όρια κατανομής μεγέθους σωματιδίων για το κράμα AMS 4776 υπό την μορφή σκόνης.....	32
Πίνακας 3.5- Χημική σύσταση του κράματος AMS 4779 (filler metal).	33
Πίνακας 3.6- Όρια κατανομής μεγέθους σωματιδίων για το κράμα AMS 4779 υπό την μορφή σκόνης.	34
Πίνακας 3.7- Χημική σύσταση του κράματος AWS BNi-9 (ποσοστά κ.β.).....	35
Πίνακας 3.8- Αποστάσεις overlap σε σχέση με το πάχος T για όλα τα δοκίμια της δοκιμής εφελκυσμού.....	50
Πίνακας 4.1- Σημειακή χημική ανάλυση φάσης TCP (σημείο σταυρού Εικόνας 4.4).....	54
Πίνακας 4.2- Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίων MC και M ₂₃ C ₆ (σημείο Εικόνας 4.5)....	55
Πίνακας 4.3- Σημειακή χημική ανάλυση φάσης TCP (σημείο Εικόνας 4.6).....	56
Πίνακας 4.4- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (σημείο Εικόνας 4.7).....	59
Πίνακας 4.5- Σημειακή χημική ανάλυση διεπιφάνειας μεταξύ ΘΕΖ και ΖΤ (σημείο Εικόνας 4.8).....	60
Πίνακας 4.6- Γενικευμένη χημική ανάλυση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.....	61
Πίνακας 4.7- Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίων στα όρια των κόκκων (Εικόνα 4.11)....	62
Πίνακας 4.8- Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίου MC του τιτανίου (Εικόνα 4.12).....	63

Πίνακας 4.9- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.14).....	66
Πίνακας 4.10- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.15).....	67
Πίνακας 4.11- Σημειακή χημική ανάλυση οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3 (Εικόνα 4.16).....	68
Πίνακας 4.12- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.17).....	69
Πίνακας 4.13- Σημειακή χημική ανάλυση σε σημείο διεπιφάνειας μεταξύ ΘΕΖ και ΖΤ (Εικόνα 4.19).....	71
Πίνακας 4.14- Σημειακή χημική ανάλυση σε ενδοκρυσταλλικό σημείο κόκκου του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.20).....	72
Πίνακας 4.15- Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίων ενδοκρυσταλλικά των κόκκου του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.21).....	73
Πίνακας 4.16- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.23).....	75
Πίνακας 4.17- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.24).....	76
Πίνακας 4.18- Σημειακή χημική ανάλυση φάσης TCP (Εικόνα 4.25).....	77
Πίνακας 4.19- Σημειακή χημική ανάλυση σε σημείο διεπιφάνειας μεταξύ ΘΕΖ και ΖΤ (Εικόνα 4.27).....	80
Πίνακας 4.20- Σημειακή χημική ανάλυση σε ενδοκρυσταλλικό σημείο κόκκου του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.28).....	81
Πίνακας 4.21- Σημειακή χημική ανάλυση συσσωματώματος καρβιδίων περικρυσταλλικά των κόκκων του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.29).....	82
Πίνακας 4.22- Δεδομένα στοιχεία της δοκιμής εφελκυσμού σε συσκευή τύπου Instron – Model 4482.....	87
Πίνακας 4.23- Χαρακτηριστικά μεγέθη από το πέρας της δοκιμής εφελκυσμού για τα πέντε δοκίμια.....	88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1- Τυπικός κύκλος εργασιών για το Vacuum Furnace Brazing.....	24
Διάγραμμα 3.1- Ο κύκλος brazing και diffusion που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δοκιμίων.....	43
Διάγραμμα 3.2- Σχέση μέσης διατμητικής τάσης που ασκείται στο δοκίμιο και σημείο αστοχίας της συγκόλλησης.....	49
Διάγραμμα 4.1- Η μηχανική καμπύλη τάσης -παραμόρφωσης για τα 5 δοκίμια εφελκυσμού.....	87
Διάγραμμα 4.2- Σχέση μεταξύ απόστασης overlap (inches) και tensile strength (MPa).....	88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1.- Χρήση υλικών και κατανομή σε τομή κινητήρα πολιτικού αεροσκάφους.....	14
Εικόνα 2.2- High Pressure και Low Pressure τμήματα του μονού κινητήρα SNECMA M53-P2.....	14
Εικόνα 2.3- Επιμέρους τμήματα που συνθέτουν τον αεροκινητήρα SNECMA M53-P2.....	15
Εικόνα 2.4- Διάδοση του τηγμένου μετάλλου πλήρωσης (filler metal) μέσω τριχοειδών φαινομένων (Πηγή E.A.B.).	18
Εικόνα 2.5- Σχηματική απεικόνιση των βημάτων εφαρμογής της διαδικασίας συγκόλλησης brazing.	19
Εικόνα 2.6- Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης σε κλίβανο (μέθοδος Furnace Brazing) (Πηγή E.A.B.)	20
Εικόνα 2.7- Τυπικά κατασκευή οριζόντιου πλευρικά φορτωμένου φούρνου κενού (Vacuum Furnace), ιδανικό για συγκόλληση μικρών εξαρτημάτων.....	21
Εικόνα 2.8- Εσωτερικό φούρνου κενού (Thermal-Vacuum Furnace in South California).....	23
Εικόνα 2.9- Διαδικασία διάχυσης που προκαλεί αλλαγή της μικροδομής στην περιοχή της συγκόλλησης.....	26
Εικόνα 3.1- Σχηματική αναπαράσταση του outer liner και των σχηματιζόμενων διάκενων. Outer liner-2021, Adjusting Block-M2248 (Πηγή E.A.B.)	28
Εικόνα 3.2- Κόπή και προετοιμασία δοκιμίων εφελκυσμού διαστάσεων 130x30x1,6 mm.....	37
Εικόνα 3.3- Διαμόρφωση και συνιστώμενες αντοχές για την συναρμολόγηση των δοκιμίων εφελκυσμού πριν από την συγκόλληση.....	37
Εικόνα 3.4- Σχέδιο σύμφωνα με το οποίο κόπηκαν τα δοκίμια εφελκυσμού.	38
Εικόνα 3.5- Σχηματική αναπαράσταση ζεύγους δοκιμίων με overlap 40 mm.....	38
Εικόνα 3.6- Συγκολλημένα δοκίμια στις άκρες για την σταθεροποίηση του διάκενου ,μέσω του filler metal, και του overlap.	39
Εικόνα 3.7- Σχηματιζόμενο διάκενο 0,0002 mm (2 μm)μετά την αφαίρεση του filler metal.	39
Εικόνα 3.8- Filler metal powder που τοποθετείται σε επιφάνεια δίπλα στο διάκενο.....	41

Εικόνα 3.9- Cement που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή πάστας.....	41
Εικόνα 3.10- Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων μετά τον καθαρισμό με μεταλλική σκόνη και την εφαρμογή του stop-off.	42
Εικόνα 3.11- Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων μετά την τήξη των υλικών πλήρωσης και την συγκόλλησή τους σε φούρνο κενού.....	44
Εικόνα 3.12- Αποτέλεσμα της συγκόλλησης- πλήρωση του διάκενου με τήξη των υλικών πλήρωσης.....	44
Εικόνα 3.13- Συγκολλημένα δοκίμια εφελκυσμού τα οποία οδηγούνται για τράβηγμα.....	50
Εικόνα 4.1- Ηλεκτρονική μικρογραφία ηλεκτρονίων του μετάλλου βάσης Haynes 25 (στο σημείο του σταυρού) μετά την συγκόλληση, ανάλυση x200.....	51
Εικόνα 4.2- Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	53
Εικόνα 4.3- Ηλεκτρονική μικρογραφία σε εικόνα BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	53
Εικόνα 4.4- Ηλεκτρονική μικρογραφία σε εικόνα BES x 800 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	54
Εικόνα 4.5- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x1000. Οι μαύρες περιοχές αποτελούν πόρους της συγκόλλησης.....	55
Εικόνα 4.6- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης. Το μαύρο σημείο αποτελεί πόρο της συγκόλλησης.....	56
Εικόνα 4.7- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x200 όπου εμφανίζεται η απόσταση (clearance) της ζώνης συγκόλλησης.....	57
Εικόνα 4.8- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης.....	59
Εικόνα 4.9- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής στην διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ και ΖΤ (κάτω).....	60
Εικόνα 4.10- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x200 της μικροδομής της ΘΕΖ- ζώνης diffusion.....	61
Εικόνα 4.11- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1500 της μικροδομής της ΘΕΖ.....	62
Εικόνα 4.12- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1000 της μικροδομής της ΘΕΖ.....	63

Εικόνα 4.13- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x250 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	65
Εικόνα 4.14- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	66
Εικόνα 4.15- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	67
Εικόνα 4.16- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	68
Εικόνα 4.17- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	69
Εικόνα 4.18- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x250 όπου εμφανίζεται η απόσταση (clearance) της ζώνης συγκόλλησης	70
Εικόνα 4.19- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής στην διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ και ΖΤ (κάτω).....	71
Εικόνα 4.20- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ΘΕΖ.....	72
Εικόνα 4.21- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x2000 της μικροδομής της ΘΕΖ. Τα λευκά σωματίδια αποτελούν καρβίδια που έχουν σχηματιστεί περικρυσταλλικά και ενδοκρυσταλλικά των κόκκων.....	73
Εικόνα 4.22- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x200 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	74
Εικόνα 4.23- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	75
Εικόνα 4.24- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	76
Εικόνα 4.25- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.....	77
Εικόνα 4.26- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης σε εικόνα οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES) x300 όπου εμφανίζεται η απόσταση (clearance) της ζώνης συγκόλλησης.....	78
Εικόνα 4.27- Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής BES x1000 στην διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ και ΖΤ (κάτω).....	80

Εικόνα 4.28- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x250 της μικροδομής της ΘΕΖ.....	81
Εικόνα 4.29- Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x2000 της μικροδομής της ΘΕΖ. Τα λευκά σωματίδια αποτελούν καρβίδια που έχουν σχηματιστεί περικρυσταλλικά και ενδοκρυσταλλικά των κόκκων καθώς και συσσωματώματα καρβιδίων.....	82
Εικόνα 4.30- Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου για το δοκίμιο που υπέστη συγκόλληση με υλικό πλήρωσης AMS 4776.....	83
Εικόνα 4.31- Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου με κλίμακα για την εκτίμηση του πάχους της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το πάχος της συγκόλλησης είναι περίπου 40 μm.....	84
Εικόνα 4.32- Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου για το δοκίμιο που υπέστη συγκόλληση με υλικό πλήρωσης AMS 4779.....	84
Εικόνα 4.33- Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου με κλίμακα για την εκτίμηση του πάχους της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το πάχος της συγκόλλησης είναι 30 μm.....	85
Εικόνα 4.34- Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου για το δοκίμιο που υπέστη συγκόλληση με υλικό πλήρωσης BNi-9.....	85
Εικόνα 4.35- Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου με κλίμακα για την εκτίμηση του πάχους της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το πάχος της συγκόλλησης είναι περίπου 50 μm.....	86

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την συγκόλληση κράματος κοβαλτίου, με την χρήση υλικών πλήρωσης (filler metals), με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (vacuum furnace brazing). Η συγκόλληση αυτή πραγματοποιείται στα πλαίσια της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας ως ερευνητική μελέτη που εστιάζει στην μελέτη και σύγκριση υλικών για τη δημιουργία βέλτιστης σύνδεσης και πλήρωσης του διάκενου κατά την επισκευή του Outer Liner αεροκινητήρα M53– P2.

Το υλικό που εξετάζεται αποτελεί κράμα κοβαλτίου Haynes 25 ή L-605 (αεροπορικής προδιαγραφής AMS 5537). Το συγκεκριμένα κράμα κοβαλτίου με μεγάλα ποσοστά σε νικέλιο και βολφράμιο συνδυάζει εξαιρετική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες με καλή αντοχή σε οξειδωτικό περιβάλλον έως 980 ° C για παρατεταμένες εκθέσεις. Μπορεί να κατασκευαστεί και να διαμορφωθεί με συμβατικές τεχνικές, και έχει χρησιμοποιηθεί για χυτά εξαρτήματα.

Στόχος της μελέτης ήταν η μελέτη της μικροδομής και η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης του αναφερόμενου υπερκράματος σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, με διαφορετικό υλικό πλήρωσης (filler metal), καθώς και η σύγκριση μεταξύ των τριών περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης κράμα νικελίου αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4776, στη δεύτερη κράμα νικελίου αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4779 και τέλος στην τρίτη κράμα νικελίου προδιαγραφής AWS BNi-9.

Η μελέτη της μικροδομής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) σε συνδυασμό με την χρήση Οπτικού Μικροσκοπίου. Για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε δείγματα διαμορφωμένα σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM – E8.

Από τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι η συγκόλληση ήταν επιτυχής και στις τρεις περιπτώσεις χρήσης διαφορετικού μετάλλου προσθήκης. Η μελέτη της μικροδομής δεν εντόπισε την ανάπτυξη επιβλαβών φάσεων, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αξιοσημείωτη υποβάθμιση των ιδιοτήτων, ενώ η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων απέδειξε ότι η μηχανική απόκριση των συγκολλημένων δοκιμών ήταν επιτυχής. Τέλος, αναφέρεται ότι η συγκόλληση στην περίπτωση μετάλλου προσθήκης AMS 4779 εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέταλλα προσθήκης.

ABSTRACT

This diploma thesis examines the welding of a cobalt alloy, with the use of different filler metals, using the vacuum furnace brazing method. This brazing process was carried out within the framework of the Hellenic Aerospace Industry as a research study that focuses on the understanding and comparison of different materials so as to create optimum bonding and filling of the clearance during the repair of the M53-P2 engine Outer Liner.

The material under examination is the cobalt based alloy Haynes 25 or L-605 (air specification AMS 5537). This cobalt alloy with high nickel and tungsten rates combines exceptional high temperature resistance with good resistance to oxidative environments up to 980 ° C for extended exposures. It can be manufactured and configured with conventional techniques and has been used for cast components.

The aim of this study was to study the microstructure and to measure the mechanical properties of the brazed specimens of the mentioned superalloy in three different cases, where the filler metal changed, as well as the comparison between the three cases. In the first case, AMS 4776 nickel alloy was used as filler metal, in the second case AMS 4779 nickel alloy was used as filler metal and the third case AWS nickel alloy BNi-9 was used.

The microstructure study was performed using a scanning electron microscope (SEM) in conjunction with an Optical Microscope. For the study of mechanical properties, tensile tests were performed on samples conforming to ASTM - E8 standards

The study found that the brazing was successful in all three cases of use of different addition metal. The microstructure study did not detect the development of harmful phases, which could lead to significant degradation of properties, while the study of mechanical properties demonstrated that the mechanical response of the welded specimens was successful. Finally, it is reported that the bonding in the case of AMS 4779 addition metal showed better results compared to the other addition metals.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπερκράματα είναι από τα πιο σύνθετα υλικά που έχουν αναπτυχθεί ποτέ, τα οποία περιέχουν μια πολλαπλότητα κραματικών στοιχείων και παράγουν με τις κατάλληλες διεργασίες πολλαπλές φάσεις με σημαντικά μηχανικά αποτελέσματα. Μερικά βασικά στοιχεία κραμάτωσης παράγουν τις κυρίαρχες φάσεις, ενώ μια ποικιλία συμπληρωματικών κραματικών στοιχείων, συχνά σε μικρές ποσότητες, μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, την τροποποίηση είναι εκτενής. Ο τομέας των υπερκραμάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για έρευνα, ειδικά για πειραματική έρευνα, με νέες εφαρμογές να ανακαλύπτονται συνεχώς.

Μια από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των υπερκραμάτων είναι αυτή στην αεροπορική τεχνολογία και ιδιαίτερα στους κινητήρες αεροσκαφών. Ο θάλαμος καύσης του αεροκινητήρα, αλλά και η τουρμπίνα και το σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1000⁰ C) με αποτέλεσμα να υπάρχει η απαίτηση για κράματα, τα οποία θα διατηρούν την αντοχή τους σε αυτές τις θερμοκρασίες. Τέτοια υλικά είναι τα υπερκράματα του νικελίου και του κοβαλτίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συγκόλληση ενός υπερκράματος κοβαλτίου Haynes 25 (L-605) με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (vacuum furnace brazing) και με την χρήση τριών διαφορετικών μετάλλων πλήρωσης. Πρόκειται για ερευνητική μελέτη, που εστιάζει στην μελέτη και σύγκριση των υλικών πλήρωσης (filler metals) για τη δημιουργία βέλτιστης συγκόλλησης και πλήρωσης του διάκενου κατά την επισκευή ενός τμήματος του αεροκινητήρα SNECMA M53- P2. Η διαδικασία αυτή αποτελεί απαραίτητη εφαρμογή για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του κινητήρα του αεροσκάφους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο όρος “υπερκράματα” αντιπροσωπεύει μια κατηγορία κραμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αποτελούν, από άποψη χημικής σύστασης και μικροδομής, τα πιο πολύπλοκα κράματα που φτιάχτηκαν ποτέ απ’ τον άνθρωπο. Συνήθως υπάρχουν από δύο μέχρι τέσσερα κύρια κραματικά στοιχεία, τα οποία καθορίζουν και τις βασικές ιδιότητες του κράματος, ενώ μια μεγάλη ποικιλία από άλλα στοιχεία, προστίθενται με σκοπό να τροποποιήσουν ή να ενισχύσουν αυτές ή να προσδώσουν επιπλέον ιδιότητες, ανάλογα πάντα για την εφαρμογή για την οποία προορίζονται [7,52,53].

Ένας πιο ακριβής ορισμός δόθηκε από τους Sims και Hagel (Wiley, New York, 1972), σύμφωνα με τους οποίους υπερκράματα ονομάζονται τα κράματα τα οποία αναπτύχθηκαν για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου υπόκεινται σε δυσμενείς μηχανικές τάσεις, ενώ παράλληλα απαιτείται υψηλή επιφανειακή σταθερότητα, και απαρτίζονται συνήθως, από στοιχεία του περιοδικού πίνακα, που ανήκουν στην ομάδα VIII.

Τα υπερκράματα άρχισαν να αναπτύσσονται πριν τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και αποτελούσαν ουσιαστικά μια μετεξέλιξη των κραμάτων νικελίου – χρωμίου, τα οποία ήταν κράματα σκλήρωσης μέσω στερεού διαλύματος. Η κινητήριος δύναμη αυτής της εξέλιξης υπήρξε η ανάγκη για αύξηση της αποδοτικότητας των αεριοστρόβιλων για χρήση, κυρίως, σε αεροσκάφη. Ήδη την περίοδο 1940 με 1970 είχε γίνει αλματώδη εξέλιξη, καθώς και μια κατηγοριοποίηση των υπερκραμάτων σε τρεις βασικές ομάδες, ανάλογα με το ποιο ήταν το κυρίαρχο κραματικό στοιχείο. [7,53,54].

Τα πρώτα υπερκράματα αποτελούνταν αρχικά μόνο από σίδηρο και νικέλιο, καθώς και επαρκείς προσθήκες χρωμίου, το οποίο είχε γίνει, ήδη γνωστό για την συνεισφορά του κατά της οξειδωσης. Με το πέρασμα του χρόνου άρχισαν να προστίθενται και άλλα στοιχεία όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νιόβιο. Τα στοιχεία αυτά συντέλεσαν στη δημιουργία της συνεκτικής φάσης (ως προς την ωστενιτική μήτρα) γ' , η οποία συνέβαλε στο να αναπτύξουν τα κράματα αυτά πολύ καλή απόκριση έναντι του ερπυσμού (creep resistance), χωρίς να λείπει βέβαια και η εμφάνιση ανεπιθύμητων φάσεων όπως η φάση η . Στη συνέχεια, στα τέλη

της δεκαετίας του 1940, διαπιστώθηκε ότι με την προσθήκη πυρίμαχων μετάλλων όπως το βολφράμιο, το ταντάλιο και κυρίως το μολυβδαίνιο, παρέχεται στα κράματα αυτά σκλήρωση μέσω δημιουργίας στερεού διαλύματος, καθώς και μέσω κατακρήμνισης καρβιδίων [52,53,54].

Στις επόμενες δεκαετίες τα υπερκράματα εξελίχθηκαν, καθώς δημιουργήθηκαν και άλλες φάσεις και πολύπλοκα μεταλλουργικά συστήματα που τους προσέδωσαν μοναδικές ιδιότητες. Στην πορεία των χρόνων και ανάλογα το επιθυμητό αποτέλεσμα, πάντα γεννιούνται προκλήσεις όταν εμφανιζόταν η ανάγκη συγκόλλησης για προσαρμογή σε κάποια εφαρμογή ή σε κάποιο κομμάτι της. Οι συγκολλήσεις από την άλλη μεριά αποτελούν μια απαραίτητη εφαρμογή για λειτουργικά μέρη περίπλοκων εξαρτημάτων [1,7].

2.2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΑ

Τα υπερκράματα περιέχουν μεγάλα ποσοστά κραματικών προσθηκών με την επίτευξη συνδυασμού μεγάλης αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες (700–1000⁰C) και σε οξειδωτικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό θεωρούνται συνώνυμα των “κραμάτων υψηλών θερμοκρασιών”. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες όπως υψηλή θερμοκρασία, έντονο διαβρωτικό περιβάλλον, ενώ η φθορά τους λόγω διάλυσης, χημικής αντίδρασης ή οξείδωσης είναι η ελάχιστη δυνατή. Παραδοσιακά, τα υπερκράματα κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με το βασικό τους στοιχείο: *(a)* Υπερκράματα με βάση το *Σίδηρο Fe*, *(b)* Υπερκράματα με βάση το *Νικέλιο Ni*, *(c)* Υπερκράματα με βάση το *Κοβάλτιο Co*. Επί του παρόντος, όμως, υπό μια ευρύτερη έννοια, όλα τα κράματα που έχουν την ικανότητα να διατηρούν τις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητές τους σε υψηλές θερμοκρασίες και σε ισχυρό διαβρωτικό περιβάλλον μπορούν να ανήκουν στην κατηγορία των υπερκραμάτων [3,10,11,12,13].

Σε θερμοκρασία δωματίου, ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες των υπερκραμάτων δεν είναι πολύ διαφορετικές από εκείνη του χάλυβα, ο οποίος είναι πολύ φθηνότερος και παράγεται εύκολα. Η υπεροχή των υπερκραμάτων, συγκριτικά με άλλα μεταλλικά κράματα, αναδεικνύεται στο γεγονός ότι εμφανίζουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση ακόμη και σε πολύ υψηλό εύρος

θερμοκρασιών. Αυτό τα καθιστά ιδανικούς υποψήφιους για χρήση σε ισχυρό διαβρωτικό περιβάλλον, όπως οι υπεράκτιες πλατφόρμες πετρελαίου [3, page 20].

Όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία, τα υπερκράματα παρουσιάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή μεγάλη αντοχή σε ερπυσμό αλλά και σε θερμική κόπωση με παρουσία διαβρωτικού περιβάλλοντος χαμηλών συχνοτήτων.[12,13]. Η διατήρηση υψηλής αντοχής των υπερκράματων σε υψηλές θερμοκρασίες οφείλεται στους τρεις ακόλουθους μηχανισμούς: (1) Στην σκλήρυνση της μεταλλικής μήτρας λόγω δημιουργίας στερεού διαλύματος αντικατάστασης με τη προσθήκη στοιχείων όπως Cr, Mo, W, τα οποία μπορούν να παρευρεθούν σε υψηλή ποσοστιαία συμμετοχή και τα Ta, Zr, Nb, B, τα οποία συμμετέχουν σε χαμηλά ποσοστά.

(2) Στην ύπαρξη και συμμετοχή διαφόρων καρβιδίων, τύπου MC, M_6C , M_7C_3 και $M_{23}C_6$, στη δομή των υπερκράματων. Τα καρβίδια αυτά έχουν την τάση να δημιουργούνται ακόμα και σε πολύ μικρές ποσότητες άνθρακα. Ενδεικτικά, παραθέτουμε κάποια εκ των καρβιδίων όπως TaC, ZrC, TiC, BC, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, W_6C και Mo_6C . Τα καρβίδια αυτά σχηματίζουν ένα δίκτυο, το οποίο παρεμποδίζει την κίνηση των διαταραχών και την ολίσθηση των ορίων των κόκκων (sliding), με αποτέλεσμα να βελτιώνουν την αντοχή του υλικού σε ερπυσμό [14,2,15,16].

(3) Στην εμφάνιση πολυπληθών, λεπτομερών και ομοιόμορφα διεσπαρμένων ενδομεταλλικών φάσεων στη μήτρα. Τα υπερκράματα Ni ή Fe–Ni τα οποία περιέχουν Al και Ti, σχηματίζουν ενδομεταλλικές φάσεις γ' $Ni_3(Al,Ti)$ και η (Ni_3Ti) κατά την θερμική κατεργασία κατακρήμνισης μέσω γήρανσης. Πρόκειται για κατακρημνίσματα υψηλής καθαρότητας τα οποία έχουν κρυσταλλική συνάφεια με τη μήτρα καθώς το πρώτο κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο και το δεύτερο στο εξαγωνικό σύστημα. Δεδομένου ότι η κρυσταλλική παράμετρος των γ' και η είναι ελαφρώς τροποποιημένη από αυτή της ωστενιτικής μήτρας, η παρουσία τους στο κρυσταλλικό δίκτυο αυτής επιφέρει ελαφριά παραμόρφωση. Όσο η αναντιστοιχία αυτή (misfit) αυξάνει ευνοείται η μηχανική αντοχή αλλά δυσχεραίνεται η αντοχή σε ερπυσμό [1,17,18]. Στην επιστημονική κοινότητα πιστεύεται ότι πολλαπλότητα της δομής είναι αυτή που αποδίδει εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων στα υπερκράματα [19,20,21]. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθεται η επίδραση συνήθων κραματικών στοιχείων (Πίνακας 2.1), καθώς και οι περιεκτικότητες αυτών [54].

<i>Influence</i>	<i>Cr</i>	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>Co</i>	<i>Mo</i>	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>Zr</i>	<i>C</i>	<i>Nb</i>	<i>Hf</i>	<i>Ta</i>
Matrix strengthening	✓			✓	✓	✓						
γ' formers		✓	✓							✓		✓
Carbide formers	✓		✓		✓	✓				✓	✓	✓
Grain boundary strengthening							✓	✓	✓		✓	
Oxide scale formers	✓	✓									✓	

Πίνακας 2.1 Επίδραση συνήθων κραματικών στοιχείων στα υπερκράματα.

Element	Range, wt. %	Effect
Cr	5-25	Oxidation and hot corrosion resistance; carbides; solution hardening
Mo, W	0-12	Carbides; solution hardening
Al	0-6	Precipitation hardening; oxidation resistance; γ' former
Ti	0-6	Precipitation hardening; carbides; γ' former
Co	0-20	Affects amount of precipitate
Ni	Balance	Stabilizes γ phase; forms hardening precipitates
Nb	0-5	Carbides; solution hardening; precipitation hardening
Ta	0-12	Carbides; solution hardening; oxidation resistance; γ' former

Πίνακας 2.2 Εύρος περιεκτικότητας για συνήθη κραματικά στοιχεία στα υπερκράματα.

2.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΩΝ

Η εξέλιξη των υπερκραμάτων εξαρτάται όχι μόνο από την ανάπτυξη νέων κραμάτων και την βαθύτερη κατανόηση της μικροδομής τους, αλλά και από την εξέλιξη των τεχνικών παραγωγής και επεξεργασίας τους. Για τα μεταλλικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων των υπερκραμάτων, η τήξη είναι το πρώτο βήμα ανεξαρτήτως το τι ακολουθεί στην συνέχεια: χύτευση, σφυρηλάτηση ή μετατροπή σε μεταλλική σκόνη. Οι τεχνολογίες συγκόλλησης υπερκραμάτων έχουν βελτιωθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτές οι βελτιώσεις κατέστησαν δυνατό τον περισσότερο αξιόπιστο, καθαρό και ακριβέστερο έλεγχο της χημικής σύστασης των υπερκραμάτων και της καλύτερης αναπαραγωγής τους.

Προφανώς, η χύτευση αποτελεί την βασική και πρωταρχική μέθοδο για την παραγωγή υπερκραμάτων που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με πολύπλοκο σχήμα και πολύ χαμηλή

τραχύτητα επιφανείας. Είναι δυνατόν να αποκτήσουν τμήματα πολύπλοκων γεωμετριών μέσω των προόδων της χύτευσης, που διαφορετικά θα ήταν πολύ δύσκολο ή αδύνατο. Οι τεχνικές παραγωγής DS και SX έχουν ανοίξει νέους ορίζοντες στο σχεδιασμό κινητήρων.

Ταυτόχρονα, η τεχνολογία σφυρηλάτησης έχει αποκτήσει νέες διαστάσεις με ισοθερμική σφυρηλάτηση και θερμομηχανική επεξεργασίας. Η εφαρμογή της τεχνολογίας υπερπλαστικής διαμόρφωσης σε υπερκράματα είναι επίσης ένα σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη τεχνικών σφυρηλάτησης. Όπως και στην παραγωγή πολλών άλλων υπερκραμάτων η εκτεταμένη χρήση των υπολογιστών μειώνει δραστικά το κόστος, το χρόνο του σχεδιασμού και τον καθορισμό των παραμέτρων.

Τέλος, αν και οι βασικές τεχνικές της κonioμεταλλουργίας είναι ευρέως διαδεδομένες, η εφαρμογή τους στα υπερκράματα έγινε σχετικά αργά. Η αυξανόμενη ζήτηση καλύτερης αντοχής στους κινητήρες έκαναν αναγκαία την δημιουργία περισσότερων σκληρυντών καθίζησης στα υπερκράματα. Η κonioμεταλλουργία κάνει δυνατή την παραγωγή μαζικών τμημάτων που περιέχουν υψηλή ποσότητα γ 'φάσης, αλλά συγχρόνως κάνει το σφυρηλάτησή τους δύσκολη. Ένα άλλο ενδιαφέρον όφελος των τεχνικών της κonioμεταλλουργίας είναι η ανάπτυξη μιας νέας ομάδας υπερκραμάτων, των ODS, τα οποία έχουν χημική σύνθεση που διαφορετικά δεν θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί.

Γενικά, ανεξάρτητα από την διαδικασία παραγωγής, τα υπερκράματα χρειάζονται συνήθως έναν συνδυασμό από διαφορετικές μεθόδους κατασκευής για την μετατροπή τους σε σύνθετα τελικά προϊόντα [3,7,26].

2.4. ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΑ Co

Το κοβάλτιο χαρακτηρίζεται ως στρατηγικό και κρίσιμο μέταλλο εξαιτίας των εφαρμογών του στον τομέα της άμυνας, καθώς και την εξάρτηση των βιομηχανοποιημένων χωρών σχετικά με τις εισαγωγές κοβαλτίου. Με ατομικό αριθμό το 27, το κοβάλτιο (σύμβολο Co) βρίσκεται μεταξύ του σιδήρου και του νικελίου στον περιοδικό πίνακα. Η πυκνότητα του κοβαλτίου είναι 8,85 g/cm³, η οποία είναι παρόμοια με εκείνη του νικελίου (8.90). Το κοβάλτιο είναι σιδηρομαγνητικό υλικό, έχοντας αρχική διαπερατότητα 68 σε θερμοκρασία δωματίου, μέγιστη διαπερατότητα 245, και θερμοκρασία Curie στους 1121 °C (2050 °F), η οποία είναι

σημαντικά υψηλότερη από εκείνη του σιδήρου (770°C, ή 1418°F) ή του νικελίου (358°C ή 676°F). Η σκληρότητα σε θερμοκρασία δωματίου διαφόρων δειγμάτων κοβαλτίου έχει αναφερθεί ότι κυμαίνεται μεταξύ 140 και 250 HV. Για πυρακτωμένα δείγματα υψηλής καθαρότητας σε μέταλλο, οι τιμές πέφτουν μεταξύ 140 και 160 HV[7, 22, 23]

Τα κράματα κοβαλτίου μπορούν τυπικά να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

•Κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα- σχεδιασμένα για φθορά

•Κράματα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα- σχεδιασμένα για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες

•Κράματα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα- σχεδιασμένα για αντοχή σε περιβάλλον διάβρωσης ή ταυτόχρονης διάβρωσης και φθοράς.

Τα κράματα με βάση το κοβάλτιο διαφέρουν από τις υπόλοιπες κατηγορίες υπερκράματων λόγω της απουσίας συναφών ιζημάτων γ' ή γ'' . Τα υπερκράματα αυτά χαρακτηρίζονται από εδροκεντρωμένη κυβική μητρική δομή. Τα κύρια στοιχεία προσθήκης είναι Cr (20–30%), W (5–15%) και Ni (ως 22 %). Τα παραπάνω στοιχεία σχηματίζουν στερεά διαλύματα αντικατάστασης στα οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο η αυξημένη αντοχή σε ερπυσμό.

Η σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος μειώνει την ενέργεια στοίβαξης, καθιστώντας έτσι δυσκολότερη την ολίσθηση και την ανύψωση των επιπέδων ολίσθησης. Η κατακρήμνιση καρβιδίων (ιδιαίτερα του καρβιδίου $M_{23}C_6$) μπορεί επίσης να είναι αρκετά αποτελεσματική στην αποκοπή των μετατοπίσεων ολίσθησης και τόσο η αντοχή των σφυρήλατων όσο και των χυτών κραμάτων εξαρτώνται από τη διασπορά των καρβιδίων [57,58].

Η παρουσία άνθρακα, σε ποσοστό έως 1,2% οδηγεί στο σχηματισμό καρβιδίων στα όρια των κόκκων, τα οποία παρεμποδίζουν τη κίνηση των διαταραχών ιδιαίτερα όταν βρίσκονται σε ασυνεχή μορφή αλυσίδων [3,7,24,25] Αν και μερικά κράματα όπως το CM-7 (τροποποιημένο L-605) περιέχουν $Co_3(Al, Ti)$, η ωφέλιμη θερμοκρασία τους είναι πολύ περιορισμένη και όχι σταθερή για μεγάλη χρήση. Τα υπερκράματα κοβαλτίου επωφελούνται εκτεταμένα από τον σχηματισμό καρβιδίων και στερεών διαλυμάτων αντικατάστασης για την αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας. Επομένως, για τον λόγο αυτό τα κράματα κοβαλτίου περιέχουν περισσότερο άνθρακα C από τις υπόλοιπες κατηγορίες των υπερκράματων.

Τα τελικά λεπτομερή κατανεμημένα καρβίδια συμβάλλουν σημαντικά στην βελτίωση της μηχανικής αντοχής και είναι πιο σταθερά από τα καρβίδια των υπόλοιπων ομάδων υπερκραμάτων.

Παρόμοια με τα κράματα νικελίου, οι πιο συχνοί τύποι καρβιδίων που συναντάμε στα υπερκράματα κοβαλτίου είναι τα M_6C , M_7C_3 και $M_{23}C_6$. Δεδομένου ότι τα υπερκράματα κοβαλτίου δεν περιέχουν τα χημικά στοιχεία Ta, Ti, Zr ή Hf (M σε MC), τα καρβίδια τύπου MC δεν μπορούν να σχηματιστούν. Δεδομένου ότι τα κύρια στοιχεία για το σχηματισμό του καρβιδίου M_6C είναι W και Mo, το καρβίδιο αυτό μπορεί να σχηματιστεί εάν τα στοιχεία αυτά διατίθενται σε επαρκή ποσότητα (5% σε ή περισσότερο). Τα καρβίδια τύπου $M_{23}C_6$ σχηματίζονται κυρίως από το χρώμιο Cr, όπως και σε άλλα υπερκράματα, και μπορεί επίσης να περιέχει μικρότερες ποσότητες W και Mo. Τα καρβίδια M_6C μπορούν να μετασχηματιστούν σε $M_{23}C_6$ και να καταβυθιστούν στα όρια των κόκκων κυρίως ως $Cr_{23}C_6$. Αυτά τα όρια κόκκων $Cr_{23}C_6$ αποτρέπουν το κράμα από την ολίσθηση των ορίων των κόκκων, η οποία με τη σειρά της επιμηκύνει τη ζωή ρήξης ερπυσμού σε αυξημένη θερμοκρασία. Τα καρβίδια $Cr_{23}C_6$ κατακρημνίζονται επίσης σε περιοχές σφάλματος στο πλέγμα και αυξάνουν την αντοχή με την συγκράτηση των εξάρσεων. Δυστυχώς, η ευθραυστότητα είναι η πιο σημαντική και ανεπιθύμητη παρενέργεια των καρβιδίων σε κράματα με βάση το κοβάλτιο που περιέχουν περισσότερα καρβίδια από τα άλλα υπερκράματα και ιδιαίτερα όταν αυτά υποβάλλονται σε έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία για πολύ καιρό (Smith 1993) [3,7].

Μια άλλη σημαντική πτυχή της φυσικής μεταλλουργίας των κραμάτων με βάση το κοβάλτιο είναι η εμφάνιση των ενδομεταλλικών ενώσεων, όπως είναι οι φάσεις σ και Laves. Αυτές οι φάσεις είναι επιβλαβείς σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, αλλά τα κράματα που σχηματίζουν την φάση Laves χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ανθεκτικές στη φθορά. Η φάση Laves σχηματίζεται κυρίως με βάση παράγοντες ατομικού μεγέθους. Μερικά παραδείγματα ενδομεταλλικών ενώσεων που μπορούν να σχηματιστούν σε υπερκράματα κοβαλτίου δίνονται στον Πίνακα 2.3. Ειδικά δεδομένα για τις φάσεις που μπορούν να σχηματιστούν στο κράμα Haynes 25 (βασικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας) παρατίθενται στον Πίνακα 2.4. [57,59,60].

Compound	Structure
Co₂ (Mo, W, Ta, Nb)	Hexagonal Laves phase
Co₂ (Mo, W)₆	Rhombohedral, hexagonal μ phase
Co₂ (Ta, Nb, Ti)	Cubic Laves phase
Co₂ (Mo, W)₃	σ phase

Πίνακας 2.3 Ενδομεταλλικές ενώσεις που μπορούν να σχηματιστούν σε υπερκράματα κοβαλτίου.

Αν και το επίπεδο μηχανικής αντοχής είναι μικρότερο από τα υπερκράματα με βάση το νικέλιο, τα κράματα κοβαλτίου εμφανίζουν πολλές ξεχωριστές ιδιότητες έναντι άλλων ομάδων υπερκραμάτων. Τα υπερκράματα κοβαλτίου εμφανίζουν καλύτερη αντοχή στην διάβρωση εξαιτίας της υψηλότερης περιεκτικότητάς τους σε Cr, τον καλύτερο ερπυσμό και την αυξημένη αντοχή τους στην θερμική κόπωση.

Phase	Crystal structure	Lattice parameters, nm
M₇C₃	Hexagonal (trigonal)	$a = 1.398, c = 0.053, c/a = 0.0324$
M₂₃C₆	fcc	$a = 1.055$ to 1.068
M₆C	fcc	$a = 1.099$ to 1.102
Co₂W	Hexagonal	$a = 0.4730, c = 0.7700, c/a = 0.1628$
α-Co₃W	Ordered fcc	$a = 0.3569$
β-Co₃W	Ordered hexagonal	$a = 0.5569, c = 0.410, c/a = 0.0802$
Co₇W₆	Hexagonal (rhombohedral)	$a = 0.473, c = 2.55, c/a = 0.539$
Matrix	fcc	$a = 0.3569$
	hcp	$a = 0.2524, c = 0.4099, c/a = 0.1624$

Πίνακας 2.4 Φάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στο κράμα κοβαλτίου Haynes 25.

Παρόμοια με τα υπερκράματα με βάση το σίδηρο-νικέλιο, τα κράματα κοβαλτίου χρειάζονται επίσης επαρκή, αλλά μικρότερη ποσότητα νικελίου, σε ποσοστό τουλάχιστον 10% για τη σταθεροποίηση της ωστενιτικής τους δομής FCC, με εξαίρεση ορισμένα χυτά κράματα όπως το Haynes 21 και το MAR-M 302. Τα στοιχεία Fe, Mn και C λειτουργούν επίσης ως ωστενιτικοί σταθεροποιητές ενώ τα W και Cr δρουν ως σταθεροποιητές εξαγωνικού συστήματος HCP. Το Cr είναι το κύριο κραματικό στοιχείο, σε περιεκτικότητα 20-30% σε υπερκράματα με βάση το κοβάλτιο και βελτιώνει την αντοχή στην οξείδωση. Ο σίδηρος και το νικέλιο βελτιώνουν τη λειτουργικότητα. Οι μικροδομές των κραμάτων με βάση το

κοβάλτιο είναι σχετικά απλές, και τα κύρια στοιχεία σκλήρωσης με στερεό διάλυμα είναι τα Nb, Ta, W και Mo, που έχουν μεγάλη διαφορά ατομικής ακτίνας με τη μήτρα κοβαλτίου. Το κράμα MAR-M 302 είναι ένα πολύ γνωστό και καλό παράδειγμα σκλήρωσης με την χρήση στερεού διαλύματος με 10% W και 9% Ta. Οι κραματικές προσθήκες σε κράματα κοβαλτίου προκαλούν επίσης την εμφάνιση ανεπιθύμητων φάσεων TCP (topologically close-packed) όπως η φάση σίγμα σ και Laves. Τα κράματα με βάση το κοβάλτιο είναι πιο ευαίσθητα από τα νικελιούχα κράματα στο σχηματισμό αυτών των ανεπιθύμητων φάσεων.

Τα κράματα L-605 και Haynes 188 αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα ανθεκτικών στη θερμότητα υπερκράματων. Οι επίπεδες καμπύλες ρήξης της πίεσης σημαίνουν μεγάλη διάρκεια χρόνου χαμηλής τάσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, τα κράματα Stellite σειράς 6, 21, 31 (επίσης γνωστό ως X-40), αποτελούν γνωστά κράματα ανθεκτικά στη φθορά. Το κράμα Stellite 6 θεωρείται το πιο εύκαμπτο και ισχυρότερο ανάμεσα τους. Χρησιμοποιείται όχι μόνο για ανθεκτικά στη φθορά, αλλά και για εφαρμογές ανθεκτικές στη θερμότητα λόγω την ικανότητά της να διατηρεί τη σκληρότητα μέχρι τους 1050 ° C [3,7,26,27,28,61,62].

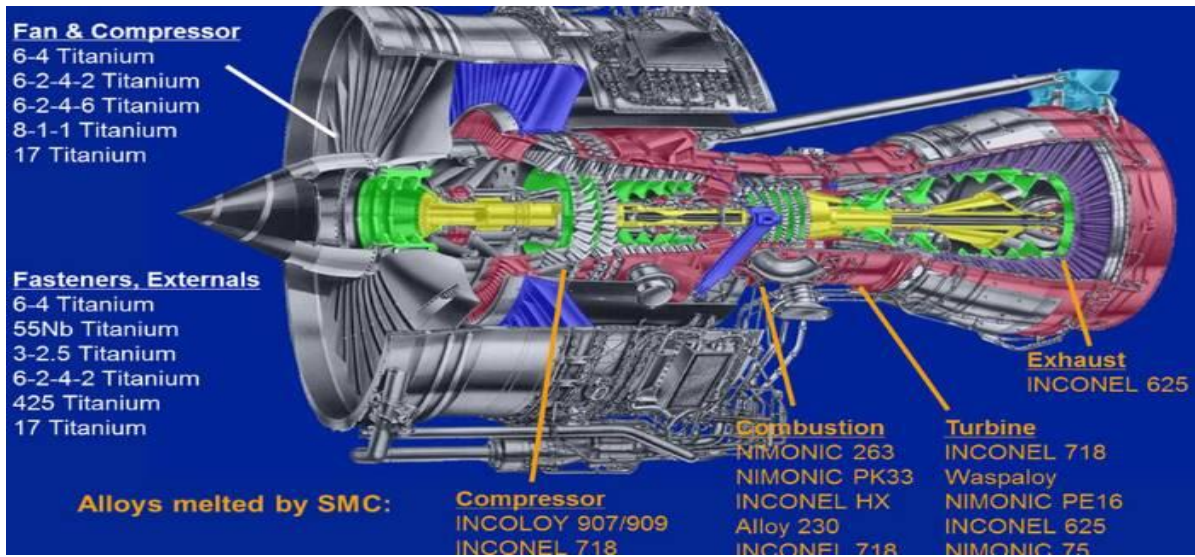
Στην πορεία της εργασίας θα πραγματοποιηθεί εκτενής αναφορά στη φυσική μεταλλουργία και τις μηχανικές ιδιότητες μέσω επίδρασης θερμικών κατεργασιών υπερκράματων με βάση το κοβάλτιο.

2.5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΩΝ

Η παραγωγή υπερκράματων είναι δαπανηρή. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι η κύρια περιοχή εφαρμογής των υπερκράματων είναι σε υψηλές θερμοκρασίες, παρά τις εντυπωσιακές ιδιότητες που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου καθώς και σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες, τα υπερκράματα είναι μοναδικά με τις μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες. Βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή σε θερμαινόμενες ηλεκτρικές αντιστάσεις, βαλβίδες εξάτμισης μηχανών εσωτερικής καύσης στις οποίες η θερμοκρασία φθάνει τους 750⁰ C και απαιτείται αντοχή σε οξείδωση από καυσαέρια, σε φθορά και σε μηχανικές παραμορφώσεις. Ακόμη απαντώνται σε βιομηχανικούς φούρνους όπου η θερμοκρασία λειτουργίας υπερβαίνει τους 1000⁰ C και συνοδεύεται από θερμικούς αφονιδιασμούς (thermal etching), σε βιομηχανίες πετρελαίου με εξαιρετικά διαβρωτικό περιβάλλον και τέλος σε αεροναυπηγικές εφαρμογές και ιδιαίτερα σε κινητήρες

αεριοστροβίλων (turbine jet engine) των οποίων η θερμοκρασία λειτουργίας αγγίζει τους 1050°C. Το μεγάλο άλμα που συντελέστηκε στην ανάπτυξη των υπερκραμάτων ήταν αποτέλεσμα της έντονης προσπάθειας ανάπτυξης θερμού τμήματος αεροκινητήρων έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των στρατιωτικών αεροσκαφών. Σήμερα, οι κινητήρες τόσο των στρατιωτικών όσο και των πολιτικών αεροσκαφών εξακολουθούν να παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην ανάπτυξη των υπερκραμάτων. Οι αεροστροβίλοι αεροσκαφών απορροφούν τα $\frac{3}{4}$ όλων των εφαρμογών στα υπερκράματα παγκοσμίως, ενώ το υπόλοιπο $\frac{1}{4}$ χρησιμοποιείται στην ιατρική βιομηχανία, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε πυραυλοκινητήρες, πυρηνικούς αντιδραστήρες και πετροχημικό εξοπλισμό. Ταυτόχρονα, στις μέρες μας ο ενεργειακός τομέας διαδραματίζει στρατηγικά έναν ακόμη πιο κρίσιμο ρόλο από πριν, λόγω της κλιμάκωσης της τιμής των καυσίμων. Η υπερθέρμανση του πλανήτη και η αυξανόμενη περιβαλλοντική ρύπανση καθιστούν αναγκαία την πιο συνετή και αποτελεσματική χρήση των προϊόντων πετρελαίου. Η εντολή μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών αερίων είναι σαφώς πρωταρχικής σημασίας. Αυτό υπαγορεύει την στρατηγική θέση και την κατεύθυνση για περαιτέρω ανάπτυξη όλων των υπερκραμάτων [3,29,30].

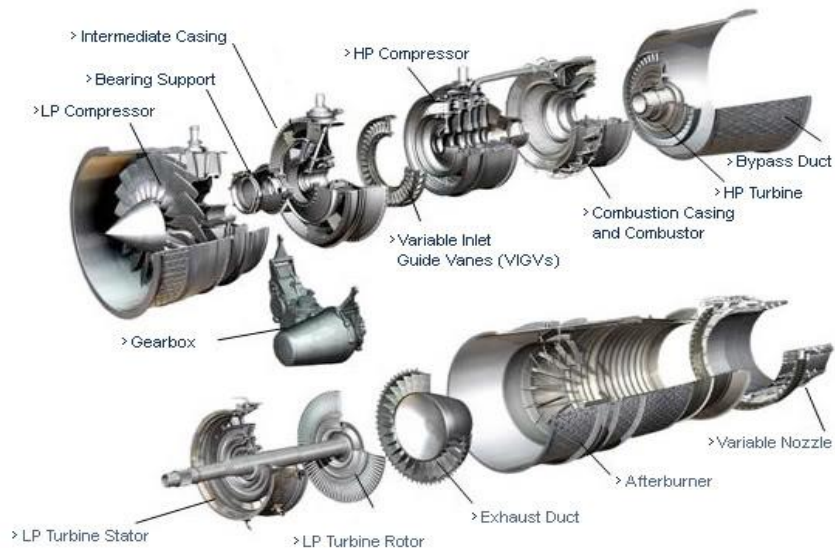
Όπως ήδη έχει διευκρινισθεί, ο τομέας όπου θα εστιαστεί η παρούσα εργασία είναι η αμυντική αεροναυπηγική βιομηχανία. Για τον λόγο αυτό θεωρείται σκόπιμο εισαγωγικά να αναφερθούν τα σημεία εφαρμογής της δεδομένης ομάδας υλικών στο πλαίσιο ενός μαχητικού αεροσκάφους αλλά και οι προϋποθέσεις που οφείλουν να πληρούν τα παραπάνω όσο αφορά στον ικανοποιητικό κύκλο ζωής και κόστους (life cycle cost). Δημοσιεύσεις στο τομέα της αεροναυπηγικής καθορίζουν τα υπερκράματα Ni και Co ως απαραίτητα σε πολλαπλά δομικά μέρη αεροσκαφών, σε συνδέσμους, λεπίδες στροβίλων, τμήματα μετάδοσης, υψηλής απόδοσης άξονες και ρουλεμάν, τμήματα δαχτυλιδιών, ελατήρια, φυσητήρες, στροβιλοφόρους άξονες, λεπίδες, και δίσκους συμπίεστών, μπουλόνια, στροβιλωθητές, συστήματα καύσης και αεριοθούμενες μηχανές [2,31,32,33,34].



Εικόνα 2.1. Χρήση υλικών και κατανομή σε τομή κινητήρα πολιτικού αεροσκάφους

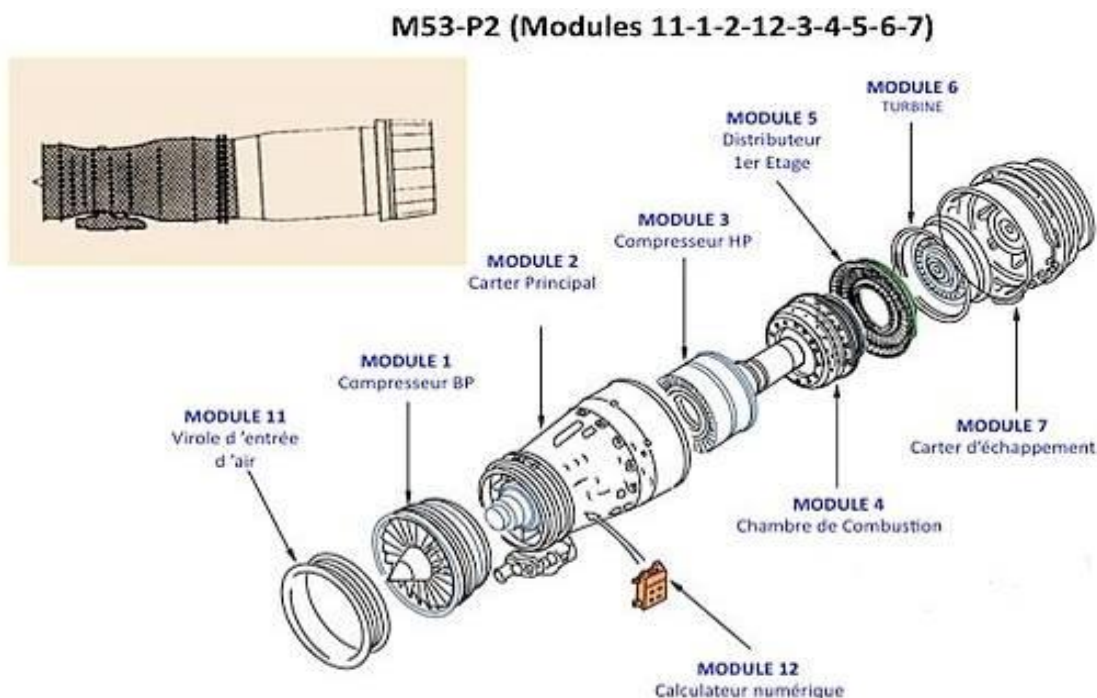
2.6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΥΠΕΡΚΡΑΜΑΤΩΝ Co ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ M53-P2

Για την δική μας μελέτη, κύριο σημείο αναφοράς σε εφαρμογές αποτέλεσε ο κινητήρας SNECMA M53-P2, υπερτροφοδοτούμενος κινητήρας turbofan με μετάκαυση, που αναπτύχθηκε για το μαχητικό αεροσκάφος Dassault Mirage 2000.



Εικόνα 2.2 Τμήματα (Modules) κινητήρα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μεταλλουργική και μεταλλογραφική μελέτη των συγκολλήσεων μεσαίων θερμοκρασιών οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή και επισκευή του Thin Strut Outer Liner του αναφερόμενου αεροκινητήρα. Το εξάρτημα αυτό τοποθετείται στο κέλυφος εξαγωγής καυσαερίων (Exhaust Casing-Mod. 7). Τα επιμέρους τμήματα του αεροκινητήρα απεικονίζονται αναλυτικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.3 Επιμέρους τμήματα που συνθέτουν τον αεροκινητήρα SNECMA M53-P2.

Σύμφωνα με τον κατασκευή, για την κατασκευή του Outer Liner καταδεικνύονται αυστηρά οι ακόλουθες απαιτήσεις: αντοχή σε τάση ροής αερίων, αντίσταση σε οξείδωση υψηλών θερμοκρασιών, αντίσταση στη μηχανική διάβρωση (erosion corrosion), αντίσταση στη θερμική κόπωση λόγω γρήγορων αλλαγών θερμοκρασιακού πεδίου, αντίσταση σε ερπυσμό, και καλή συγκολλησιμότητα για ευχέρεια κατασκευής και συντέλεσης επισκευών χωρίς την μείωση του πάχους του Outer Liner, αντίσταση στις τοπικά συγκεντρωμένες τάσεις και ικανότητα επιδιόρθωσης υλικών σε λειτουργία με συγκόλληση. Γενικά στα θερμά μέρη ενός στροβιλοκινητήρα απαιτείται κατασκευαστικά η εφαρμογή υπερκραμάτων Ni, που αποδίδουν

σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ στα ψυχρά μέρη απαντώνται κράματα Ti. Υπερκράματα Co χρησιμοποιούνται μονάχα όταν αναμένονται θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές στις οποίες αποδίδουν αποτελεσματικά υπερκράματα Ni, λόγω του υψηλού τους κόστους και της σκλήρυνσης τους με στερεό διάλυμα αντικατάστασης και όχι με κατακρήμνιση ενδομεταλλικών φάσεων. Ακόμη σημαντική συμμετοχή παρατηρείται από κράματα Al, χάλυβες υψηλών προδιαγραφών (maraging) και σύνθετα υλικά [8,20,37,38,39,40,41,42].

Η διαδικασία συγκόλλησης του Outer Liner στο Thin Strut του κινητήρα απαιτεί, σύμφωνα με τις οδηγίες εργασίας (Work Instruction 72-53-20-65B-666B) για τον κινητήρα M53-P2, τα εξής επιμέρους βήματα:

(a) Τοποθέτηση του Outer Liner στο Thin Strut του κινητήρα.

(b) Προσαρμογή του Outer Liner στο Thin Strut μέσω βοηθητικού εργαλείου (block).

(c) Αυστηρή διατήρηση του ακτινικού διάκενου (A) ανάμεσα στο Outer Liner και το Thin Strut όχι λιγότερο από 0,5mm και του περιφερειακού διάκενου (B) μεταξύ 0mm και 0,5mm (1mm μέγιστο τοπικά).

Κατά την επιθεώρηση του Outer Liner μετά από εγκεκριμένες ώρες πτήσης μπορεί να παρατηρηθούν φθορές όπως φθορά-σκάψιμο του μετάλλου, στράβωμα ή έντονη διάβρωση τοπικά. Για την επιδιόρθωση τέτοιων ατελειών χρησιμοποιείται η μέθοδος της συγκόλλησης και στη συνέχεια η αφαίρεση του περισσεύοντος υλικού προσέχοντας να μην μειωθεί το πάχος του υλικού στο Outer Liner [3,35].

Η πειραματική αυτή διαδικασία διεξήχθη στην E.A.B. (Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία).

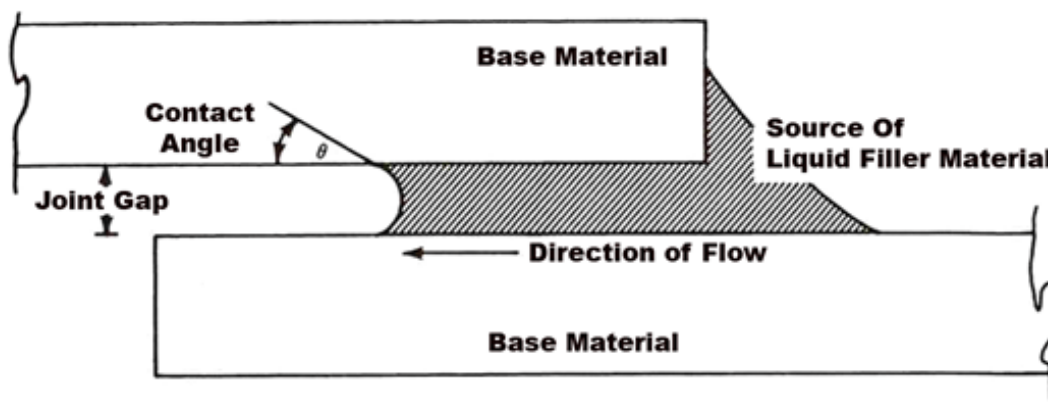
2.7. ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΜΕΣΑΙΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ (BRAZING)

Πολλά προϊόντα συναρμολογούνται από δύο ή περισσότερα μεμονωμένα εξαρτήματα, τα οποία είναι μονίμως συνδεδεμένα για την παραγωγή σταθερών δομικά συγκροτημάτων. Οι μέθοδοι συνδέσεως περιλαμβάνουν διάφορους συνδετήρες, συνδέσεις τύπου παρεμβολής, κόλλες και, για τις αρθρώσεις υψηλότερης ακεραιότητας, εφαρμόζονται τεχνικές που ταξινομούνται υπό την κατηγορία των συγκολλήσεων. Η συγκόλληση μεσαίων θερμοκρασιών (brazing) αποτελεί μία τέτοια τεχνική. Προς χάριν συντομίας η μέθοδος θα αναφέρεται ως brazing στο υπόλοιπο κείμενο.

Οι μέθοδοι που απαρτίζουν τις συγκολλήσεις brazing παράγουν ισχυρές, ομοιόμορφες, στεγανές συνδέσεις γρήγορα, χωρίς κόστος και σε πολλά τεμάχια ταυτόχρονα. Συνδέσεις που είναι απροσπέλαστες και τμήματα που μπορεί να μην μπορούν να συνδεθούν καθόλου με άλλες μεθόδους, συχνά μπορούν να ενωθούν μέσω brazing. Περίπλοκα συγκροτήματα που περιλαμβάνουν παχιά και λεπτά τμήματα, περίεργα σχήματα και διαφορετικά σφυρήλατα και χυτά κράματα μπορούν να μετατραπούν σε ενσωματωμένα εξαρτήματα μετά από πέρασμα μέσα από φούρνο brazing. Μέταλλα τόσο λεπτά από 0,01 mm (0,0004 in.) και τόσο χονδρά έως 150 mm (6 ίντσες) μπορούν να συγκολληθούν με brazing.

Η αντοχή των αρμών συγκόλλησης είναι υψηλή. Η φύση του μεταλλικού δεσμού είναι τέτοια που ακόμη και μια απλή σύνδεση, όταν είναι σωστά σχεδιασμένη και κατασκευασμένη, θα έχει αντοχή ίση ή μεγαλύτερη από εκείνη του βασικού μετάλλου που έχει υποστεί brazing. Τα φυσικά σχήματα των συγκολλημένων μετάλλων πλήρωσης είναι εξαιρετικά. Η επιφάνεια του μηνίσκου που σχηματίζεται από το μέταλλο πλήρωσης καθώς καμπυλώνει στις γωνίες είναι ιδανικά διαμορφωμένο ώστε να αντιστέκεται στην κόπωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις συγκολλημένες συνδέσεις που γίνεται χρήση ευτηκτικού μετάλλου βάσης, συχνά περιέχεται υπερβολική ποσότητα εύθραυστων διμεταλλικών ενώσεων. Στην πραγματικότητα, τα μέταλλα βάσης είναι 5 έως 10 φορές παχύτερα από αυτά που συνδέονται και έτσι έχουν πολύ μεγαλύτερο όγκο της υγρής φάσης από την οποία κρυσταλλοποιούνται αυτές οι εύθραυστες φάσεις. Ως εκ τούτου, η πυρήνωση των ρωγμών προέρχεται συχνά από το μέταλλο βάσης [3,6,44].

Μηχανική του brazing: Η μηχανική της συγκόλλησης brazing περιλαμβάνει περιορισμένη διάλυση ή πλαστική παραμόρφωση του βασικού μετάλλου. Η διεργασία του brazing περιλαμβάνει μια ομάδα διαδικασιών σύνδεσης στις οποίες παράγεται συγχώνευση με θέρμανση σε μία κατάλληλη θερμοκρασία πάνω από 450°C (840°F) και με τη χρήση σιδηρούχου ή μη σιδηρούχου μετάλλου πλήρωσης που πρέπει να έχει θερμοκρασία υγροποίησης πάνω από 450°C (840°F) και θερμοκρασία (-ες) στερεοποίησης κάτω από αυτή (-ές) του μετάλλου (-ων) βάσης. Η θερμοκρασία εφαρμογής πρέπει να βρίσκεται κάτω από το αρχικό σημείο συγκόλλησης του υλικού βάσης και αρκετή ώστε να λιώσει το υλικό πλήρωσης. Συνήθως τα κράματα συγκόλλησης με βάση το νικέλιο ή το κοβάλτιο χρησιμοποιούνται για συγκόλληση υπερκραμάτων και μερικά στοιχεία όπως το Si, το B και το P προστίθενται στο υλικό πλήρωσης για την μείωση του σημείου τήξεως. Το μέταλλο πλήρωσης κατανέμεται μεταξύ των στενά τοποθετημένων επιφανειών της σύνδεσης (διάκενο). Η μέθοδος συγκόλλησης brazing διακρίνεται από τις υπόλοιπες κατηγορίες συγκολλήσεων, στις οποίες συνήθως χρησιμοποιείται μέταλλο πλήρωσης με θερμοκρασία υγροποίησης κάτω από 450° C (840° F).

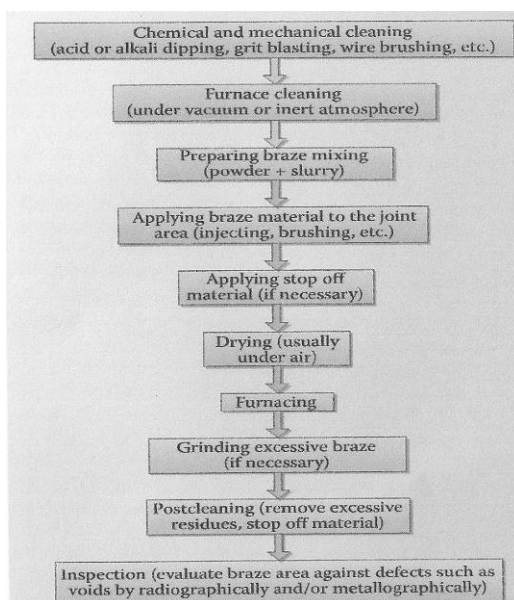


Εικόνα 2.4 Διάδοση του τηγμένου μετάλλου πλήρωσης (filler metal) μέσω τριχοειδών φαινομένων

Η διαδικασία του brazing ακολουθεί τα τέσσερα σαφή βήματα όπως αναφέρονται παρακάτω:

- Το συγκρότημα ή η περιοχή των προς συγκόλληση μονάδων θερμαίνεται σε θερμοκρασία τουλάχιστον 450°C (840°F).
- Τα επιμέρους υλικά προς συγκόλληση καθώς και το μέταλλο πλήρωσης που χρησιμοποιείται θερμαίνονται μέχρι μία αρκετά υψηλή θερμοκρασία, κατάλληλη ώστε να ξεκινήσει η τήξη του μετάλλου πλήρωσης, αλλά όχι του μετάλλου βάσης.
- Το λιωμένο μέταλλο πλήρωσης διατηρείται στην σύνδεση λόγω της επιφανειακής τάσης, διαδίδεται μέσω τριχοειδών φαινομένων σε οποιοδήποτε κενό σημείο της σύνδεσης και φτάνει να περιβρέχει την επιφάνεια του(-ων) μετάλλου(-ων) βάσης.
- Τα υλικά που έχουν συγκολληθεί ψύχονται κάτω από την θερμοκρασία στερεοποίησης του μετάλλου πλήρωσης, με αποτέλεσμα την δημιουργία συμπαγών συνδέσεων μεταξύ των υλικών, τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους μέσω μεταλλουργικής αντίδρασης και ατομικής σύνδεσης.

Μια σχηματική όψη των βημάτων εφαρμογής της διαδικασίας συγκόλλησης δίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η διεργασία της συγκόλλησης brazing περιλαμβάνει τον καθαρισμό των επιμέρους τμημάτων, τη στερέωσή τους και την εφαρμογή των υλικών πλήρωσης στην προς συγκόλληση περιοχή, την εφαρμογή θερμότητας, την ψύξη των συγκολλημένων υλικών και την αξιολόγηση της ενισχυμένης περιοχής.



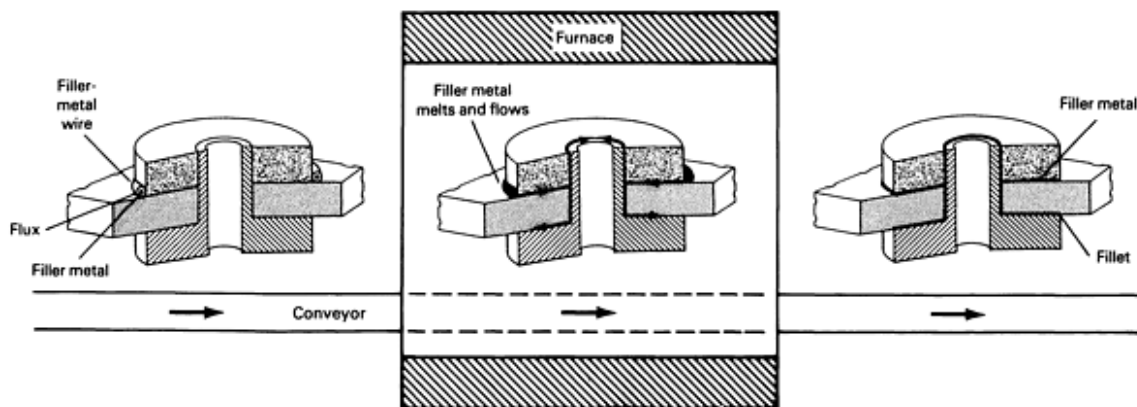
Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση των βημάτων εφαρμογής της διαδικασίας brazing.

Η μέθοδος brazing κατέστησε δυνατή τη συγκόλληση υπερκραμάτων που έχουν υποστεί σκλήρωση με κατακρήμνιση, τα οποία επειδή περιέχουν μεγάλες ποσότητες γ' φάσης δεν μπορούσαν να συγκολληθούν στο παρελθόν. Τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου brazing είναι η ευθραυστότητα και απώλεια αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες εξαιτίας του χαμηλού σημείου συγκόλλησης του υλικού πλήρωσης.

Οι περιοχές εφαρμογής ποικίλλουν: αεροτομή πτερυγίων, στροβίλων, εξωτερικές και εσωτερικές συνδέσεις ζωνών, θήκες στροβίλων, τμήματα των πτερυγίων και τμήματα των αρμών διάχυσης[3,6,43,44,45].

2.8. ΜΕΘΟΔΟΣ VACUUM FURNACE BRAZING

Η συγκόλληση σε φούρνο (Furnace Brazing) αποτελεί μια μαζική διαδικασία παραγωγής για την ένωση των επιμέρους τμημάτων μικρών συγκροτημάτων υλικών με ένα μεταλλουργικό δεσμό, χρησιμοποιώντας ένα μη σιδηρούχο μέταλλο πλήρωσης ως υλικό συγκόλλησης και έναν φούρνο ως την πηγή θερμότητας. Η τεχνολογία της συγκόλλησης σε φούρνο ξεκίνησε τη δεκαετία του 1920 και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά εμπορικά γύρω στο 1930, κυρίως για να προσφέρει μια διαδικασία συγκόλλησης που δεν απαιτεί χημική ροή (flux), εξαλείφοντας έτσι το πρόβλημα παγίδευσης ροής. Επί του παρόντος, η μέθοδος του Furnace Brazing είναι ευρέως εφαρμοσμένη σε μια ποικιλία βιομηχανιών.

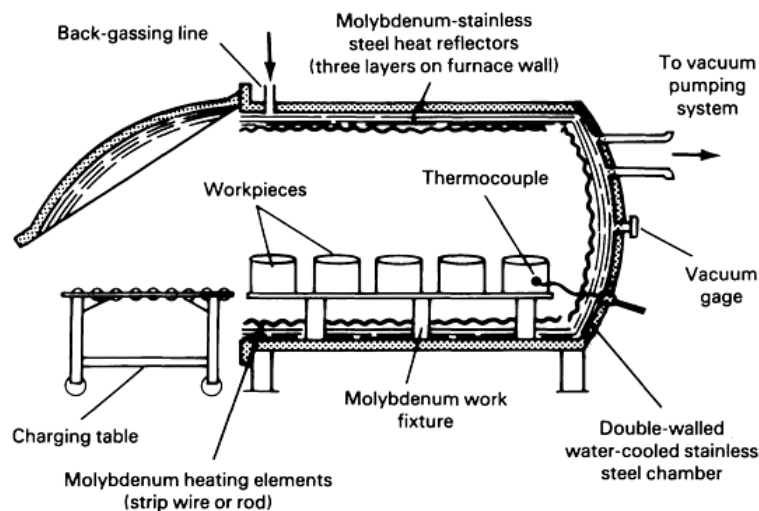


Εικόνα 2.6 Σχηματική απεικόνιση συγκόλλησης σε φούρνο Furnace Brazing (Πηγή E.A.B.)

Στη διαδικασία συγκόλλησης σε φούρνο, τα καθαρισμένα μέρη (μέταλλο βάσης) και το μέταλλο πλήρωσης της συγκόλλησης συναρμολογούνται, τοποθετούνται σε φούρνο και θερμαίνονται στη θερμοκρασία συγκόλλησης. Η συγκόλληση σε φούρνο είναι πρακτική μόνο αν το μέταλλο πλήρωσης μπορεί να τοποθετηθεί στην ένωση των επιμέρους μελών πριν τη συγκόλληση και διατηρείται στη θέση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Ο ρυθμός θέρμανσης, η θερμοκρασία και ο χρόνος συγκόλλησης καθώς και ο ρυθμός ψύξης ελέγχονται. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις, η συγκόλληση πραγματοποιείται σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, η οποία μπορεί να είναι είτε αδρανής, είτε κενό [6,8,44,45].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η συγκεκριμένη αναφορά επικεντρώνει την πειραματική της πορεία στην συγκόλληση δοκιμίων με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (Vacuum Furnace Brazing). Η συγκόλληση υπό κενό είναι μια διαδικασία σύνδεσης που μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την καθαρότητα, την αντοχή και την ακεραιότητα των συνδέσμων. Η διεργασία εκτελείται υπό κενό με εξαιρετική ομοιομορφία θερμοκρασίας.

Ο φούρνος κενού τυπικά χρησιμοποιείται για την συγκόλληση υλικών κατά παρτίδες. Ο φούρνος συγκόλλησης υπό κενό τυπικά διασυνδέεται με ένα μικροεπεξεργαστή. Ο μικροεπεξεργαστής ελέγχει όλες τις παραμέτρους συγκόλλησης, τον ρυθμό θέρμανσης, την θερμοκρασία και το χρόνο συγκόλλησης, τον ρυθμό ψύξης και το συμπληρωματικό αέριο.



Εικόνα 2.7 Τυπικά κατασκευή οριζόντιου φούρνου κενού (Vacuum Furnace), ιδανικού για συγκόλληση μικρών εξαρτημάτων.

Ο φούρνος κενού μπορεί να διασφαλίσει την επίτευξη της θερμοκρασίας συγκόλλησης με εξαιρετική ακρίβεια και χωρίς υπερβολική βολή. Αυτό σημαίνει ότι τα εξαρτήματα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας ελεγχόμενη θέρμανση και ψύξη, η οποία με τη σειρά της μειώνει την παραμένουσα τάση στις επιμέρους επιφάνειες. Αυτή η δυνατότητα ελέγχου επιτρέπει την ταυτόχρονη διεξαγωγή πρόσθετων διαδικασιών θερμικής επεξεργασίας, γεγονός που προσφέρει μια μοναδική και οικονομικά αποδοτική διπλή διαδικασία που θα μειώσει το συνολικό κόστος ανά συνιστώσα. Επίσης, σημειώνεται ότι τα προβλήματα αντοχής στην οξειδωση και τη διάβρωση του ίδιου του κράματος καθίστανται αμελητέα στον φούρνο κενού. Και αυτό γιατί ο φούρνος κενού λειτουργεί στη θερμοκρασία συγκόλλησης του υλικού πλήρωσης, που είναι γενικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία στην οποία σχηματίζονται τα οξειδία. Κατά συνέπεια, ακόμη και τα οξειδωμένα κομμάτια χάνουν το στρώμα οξειδίου στο κενό πριν φθάσουν στη θερμοκρασία συγκόλλησης.

Για να είναι επιτυχής η συγκόλληση, το υλικό πλήρωσης πρέπει να τήκεται (είτε υπό τη μορφή πάστας είτε ως μεταλλικό σύρμα ή ταινία) στη δική του ειδική θερμοκρασία συγκόλλησης και όχι σε υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό κυρίως αποφεύγει το υγρό να βρίσκεται σε θερμοκρασία στην οποία η επιφανειακή του τάση θα ήταν χαμηλότερη και επομένως να διαβρέχει μεγαλύτερη επιφάνεια, με τον προκύπτοντα σύνδεσμο να μην έχει τη σωστή πλήρωση. Το υγρό πρέπει να εξαπλώνεται ακριβώς μέσα στην κοιλότητα των συνδέσμων μεταξύ των μετάλλων, δημιουργώντας έτσι ένα ενδιάμεσο στρώμα.

Οι εφαρμογές της συγκόλλησης με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (Vacuum Furnace Brazing) έχουν αυξηθεί σημαντικά λόγω βελτιώσεων που έχουν συντελεστεί στον εξοπλισμό προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα που εμφανίζονταν σε πρώιμες προσπάθειες. Συχνά, η μέθοδος επεξεργασίας δοκιμίων σε συνθήκες κενού και σε ατμόσφαιρα αερίου χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά η μία για την άλλη. Για παράδειγμα, η ατμόσφαιρα κενού χρησιμοποιείται μερικές φορές ως καθαριστικό στάδιο πριν τη συγκόλληση με ξηρό υδρογόνο. Ταυτόχρονα, αδρανές αέριο ή ξηρό υδρογόνο χρησιμοποιούνται μερικές φορές ως καθαριστικά μέσα πριν τη συγκόλληση σε φούρνο κενού ή ως μέσα μερικής πίεσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης [6,9,44,46,47,48].

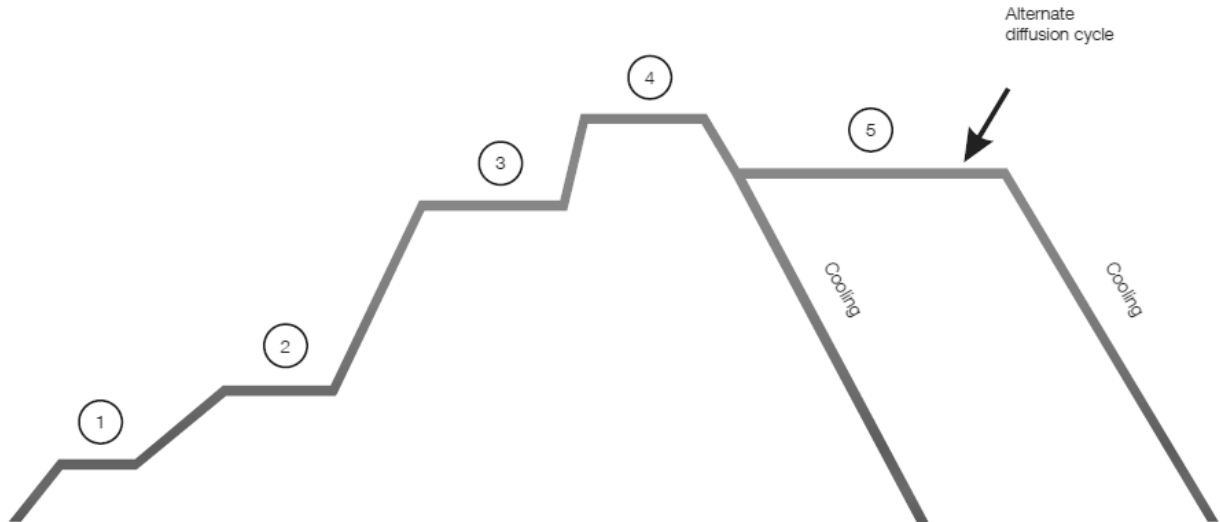


Εικόνα 2.8 Εσωτερικό φούρνου κενού (Vacuum Furnace).

Η διεργασία της συγκόλλησης με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού περιλαμβάνει, μετά την τοποθέτηση των προς συγκόλληση τμημάτων μαζί με το υλικό πλήρωσης (filler metal) στον φούρνο, τα ακόλουθα βήματα:

(1) Θέρμανση και παραμονή στους 150 έως 260 ° C (300 έως 500 ° F) για 10 έως 15 λεπτά. Αυτό επιτρέπει στους διαλύτες ή το συνδετικό υλικό ή το νερό στην πάστα να εξέρχονται από την εναπόθεση του υλικού πλήρωσης.

(2) Παραμονή στους περίπου 540°C (1000°F) για 10 έως 15 λεπτά. Αυτό επιτρέπει στα οργανικά στοιχεία (όχι υγρά) στο υλικό πλήρωσης (filler metal) επαρκή χρόνο ώστε να μετατραπούν σε αέρια και να απομακρυνθούν μέσω του συστήματος εξαερισμού.



Διάγραμμα 2.1 Τυπικός κύκλος εργασιών για το Vacuum Furnace Brazing.

(3) Θέρμανση στο θερμοκρασιακό τμήμα από 10 έως 38 ° C (50 έως 100 ° F), κάτω από τη θερμοκρασία στερεοποίησης του κράματος για τουλάχιστον δέκα λεπτά. Το στάδιο αυτό συντελεί στην σταθεροποίηση και εν συνεχεία συντελείται θέρμανση όσο το δυνατόν γρηγορότερα στη θερμοκρασία συγκόλλησης για να περιοριστεί η μετακίνηση του υγροποιημένου κράματος.

(4) Χρόνος διατήρησης. Συνήθως, ο χρόνος διατήρησης στην θερμοκρασία συγκόλλησης (brazing) κυμαίνεται από 1 έως 10 λεπτά αποτελεί επαρκή χρόνο για να λιώσει το κράμα (filler metal) και να ρεύσει μέσα στο διάκενο της ένωσης. Μετά του πέρασ του δεδομένου χρόνου ακολουθεί αργή μείωση της θερμοκρασίας (κάτω από την θερμοκρασία solidus) προκειμένου το υγρό υλικό πλήρωσης να στερεοποιηθεί στη θέση του.

(5) Η διατήρηση των συγκολλημένων δοκιμίων από δύο έως τέσσερις ώρες στον φούρνο σε θερμοκρασία από 1065 έως 1150°C (1950 έως 2100°F) επιτρέπει τη διάχυση στο μέταλλο βάσης και θα αυξήσει ελαφρώς την θερμοκρασία επανάτηξης του συγκολλημένου κράματος. Κατά την τελική ψύξη χρησιμοποιείται κατάλληλος ρυθμός ψύξης ώστε να ελέγχεται η παραμόρφωση και η συγκόλληση να ικανοποιεί τις απαιτούμενες μεταλλουργικές ιδιότητες και τις ανάγκες παραγωγής [49,50].

2.9. DIFFUSION BRAZING

Μια εξίσου αξιολογημένη διαδικασία που επιτελείται προαιρετικά, συνήθως μετά την ολοκλήρωση της συγκόλλησης δοκιμίων μέσω οποιασδήποτε μέθοδο brazing, αποτελεί η διάχυση (Diffusion Brazing). Η μέθοδος αυτή θα συντελεστεί και στην παρούσα διπλωματική μετά τον τυπικό κύκλο συγκόλλησης μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού.

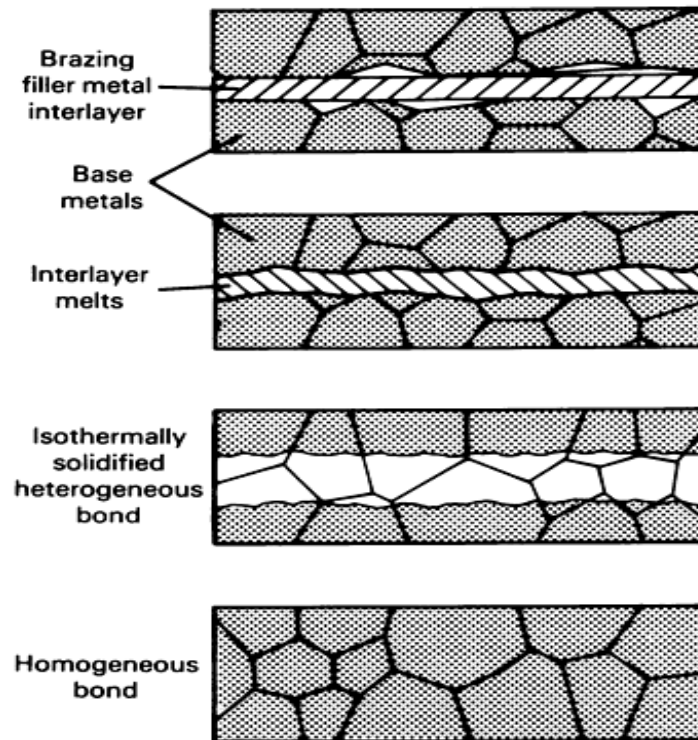
Η συγκόλληση μέσω διάχυσης, η οποία μπορεί να αναφέρεται είτε στη μέθοδο συγκόλλησης είτε στη διάχυση που ακολουθεί μετά, θεωρείται πλέον ως μη τυπικός όρος. Όπου απαιτείται διάχυση θα πρέπει να διευκρινίζεται σαφώς. Ωστόσο, στην αεροπορική βιομηχανία, η συγκόλληση μέσω διάχυσης εξακολουθεί να αναφέρεται κοινώς με ονόματα όπως Activated Diffusion Bonding (ADB), ή Transient Liquid-Phase Bonding (TLP).

Δύο κρίσιμες πτυχές του Diffusion Brazing είναι:

- Πρέπει να σχηματιστεί τήξη του μετάλλου πλήρωσης ώστε να βρίσκεται σε υγρή φάση και να γίνει ενεργό στην περιοχή της συγκόλλησης.
- Πρέπει να συντελεστεί εκτεταμένη διάχυση των στοιχείων του υλικού πλήρωσης (filler metal) στο μέταλλο βάσης (base metal) για να προκύψουν τα κατάλληλα αποτελέσματα [6,49,51].

Αυτή η διαδικασία διάχυσης συχνά έχει ως αποτέλεσμα την ολική απώλεια ταυτότητας του αρχικού συγκολλημένου αρμού (δημιουργία ομογενούς δεσμού, εικόνα 2.9).

Οι πιο προηγμένες διεργασίες συγκόλλησης με διάχυση χρησιμοποιούνται στην αεροπορική βιομηχανία, ιδιαίτερα για συνδέσεις υλικών που εμπλέκονται κράματα τιτανίου, νικελίου, κοβαλτίου και αλουμινίου. Γενικά, η διάχυση εμπλέκεται σε όλες τις διαδικασίες συγκόλλησης μεσαίων θερμοκρασιών, είτε σε μικρότερο είτε σε μεγαλύτερο βαθμό.



Εικόνα 2.9 Διαδικασία διάχυσης που προκαλεί αλλαγή της μικροδομής στην περιοχή της συγκόλλησης

Αν και η συγκόλληση με διάχυση πραγματοποιείται συνήθως σε φούρνους ειδικά διαμορφωμένους για συγκόλληση ή θερμική επεξεργασία, είναι επίσης δυνατή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αρχική συγκόλληση δύο συνιστωσών με άλλες μεθόδους brazing και στη συνέχεια η τοποθέτησή τους σε έναν φούρνο για τον εκτεταμένο κύκλο διάχυσης. Αυτός ο κύκλος μπορεί να κυμαίνεται από 30 λεπτά έως 80 ώρες. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να διαρκέσει ακόμα και περισσότερο [6,51].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

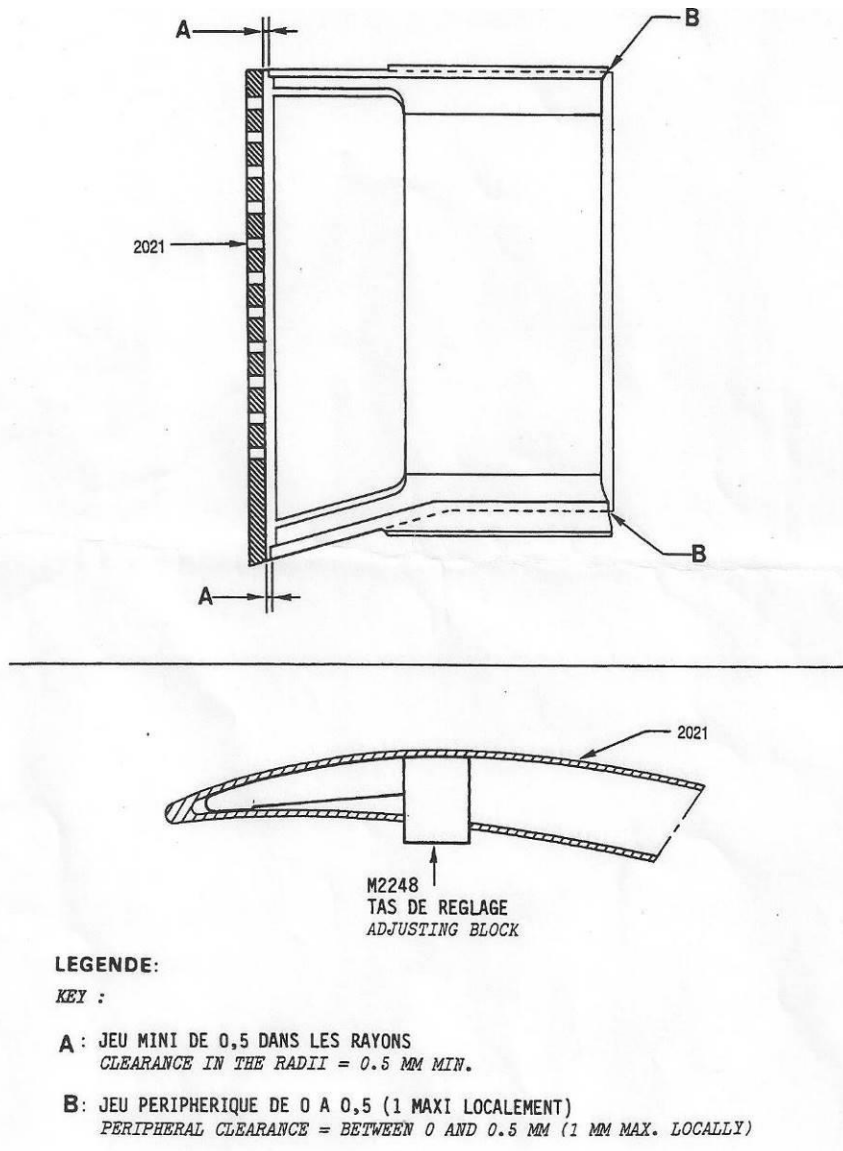
3.1 ΣΚΟΠΟΣ – ΣΤΟΧΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η συγκόλληση υπερκράματος κοβαλτίου Haynes 25 ή L-605 (αεροπορικής προδιαγραφής AMS 5537) με την μέθοδο συγκόλλησης μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (Vacuum Furnace Brazing). Η εργασία εστιάζεται στη μελέτη της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλληση του αναφερόμενου υπερκράματος σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, όπου αλλάζει το υλικό πλήρωσης (filler metal), καθώς και στη σύγκριση μεταξύ των τριών περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης κράμα νικελίου αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4776, στην δεύτερη κράμα νικελίου αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4779 και τέλος για την τρίτη κράμα νικελίου προδιαγραφής AWS BNi-9 (ή αλλιώς προδιαγραφής GE B50TF207).

Η συγκόλληση αυτή, καθώς και το μεγαλύτερο μέρος του πειραματικού μέρους πραγματοποιήθηκαν στην Ε.Α.Β. (Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία), ενώ τα υπόλοιπα τμήματα συντελέστηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Πρόκειται για ερευνητική μελέτη που εστιάζει στην μελέτη και σύγκριση υλικών για την δημιουργία βέλτιστης συγκόλλησης και πλήρωσης του διάκενου κατά την επισκευή του Outer Liner αεροκινητήρα M53– P2.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η διαδικασία τοποθέτησης του Outer Liner στο Thin Strut του κινητήρα, συντελείται σύμφωνα με τις οδηγίες εργασίας “Work Instruction 72-53-20-65B-666B” (Πηγή Ε.Α.Β.) για τον κινητήρα M53-P2, ενώ η θερμική επεξεργασία των δοκιμίων συντελείται σύμφωνα με τις οδηγίες “Work Instruction 72-53-20-66B-623A” (Πηγή Ε.Α.Β.)

Σύμφωνα με τις γενικές οδηγίες, το διάκενο μεταξύ του Outer Liner και του Thin Strut δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0,5 mm (0,0197 inches).



Εικόνα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση του Outer Liner, του Thin Strut και των σχηματιζόμενων διάκενων (Πηγή E.A.B.)

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η παρούσα εργασία μελετά την συγκόλληση του υπερκράματος κοβαλτίου Haynes 25 (αεροπορικής προδιαγραφής AMS 5537). Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στη μελέτη της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων του αναφερόμενου υλικού μετά την θερμική τους επεξεργασία.

Το σύνολο του προς συγκόλληση υλικού (υπερκράμα κοβαλτίου), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος προήλθε από την E.A.B. με την μορφή ελάσματος και συγκολλήθηκε με την μέθοδο συγκόλλησης μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (Vacuum Furnace Brazing) στις εγκαταστάσεις της E.A.B.

Το υπερκράμα Haynes 25 αποτελεί κράμα σκλήρωσης μέσω στερεού διαλύματος και η χημική σύσταση πρέπει να συμμορφώνεται με τα ποσοστά κατά βάρος που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 που δίνεται παρακάτω, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E354. Οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2., ακολουθώντας την ίδια προδιαγραφή [26,56]

Element	min	max
Carbon	0.05	0.15
Manganese	1.00	2.00
Silicon	-	0.40
Phosphorus	-	0.040
Sulfur	-	0.030
Chromium	19.00	21.00
Nickel	9.00	11.00
Tungsten	14.00	16.00
Iron	-	3.00
Cobalt	remainder	

Πίνακας 3.1 Χημική σύσταση του υπερκράματος κοβαλτίου Haynes 25 (ποσοστά κ.β.)

Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή εξαρτημάτων που απαιτούν υψηλή αντοχή μέχρι 816°C και αντοχή στην οξείδωση μέχρι τους 1093°C, αλλά η χρήση τους δεν περιορίζεται σε τέτοιες εφαρμογές [7,26].

Nominal Thickness Millimeters	Tensile Strength MPa, min	Yield Strength at 0.2% Offset MPa	Elongation in 50.8 mm %, min
Up to 0.076, excl	896	379 min	Report
0.076 to 0.127, incl	896	379 to 552	25
Over 0.127 to 0.51, incl	896	379 to 552	30
Over 0.51 to 0.81, incl	896	379 to 552	35
Over 0.81 to 1.09, incl	896	379 to 552	40
Over 1.09 to 57.15, incl	896	379 to 552	45

Πίνακας 3.2 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες του Haynes 25 σε μονάδες SI.

Το κράμα κανονικά υποβάλλεται σε σκλήρωση μέσω στερεού διαλύματος με θερμική κατεργασία σε θερμοκρασία από 1175°C έως 1230°C (2150 έως 2250°F) και ταχεία ψύξη ή σε νερό για βέλτιστες ιδιότητες. Ανόπτηση σε θερμοκρασίες μικρότερες από τη θερμοκρασία στερεού διαλύματος θα παράγουν καθίζηση ορισμένων καρβιδίων, φαινόμενου που μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες του κράματος

Κατά την πειραματική διαδικασία, από το αρχικό υλικό δημιουργήσαμε έξι ίδια ελάσματα με αρχικές διαστάσεις πριν τη συγκόλληση 130x30x1,6 mm (μήκος, πλάτος, πάχος). Από αυτά τα κομμάτια σχηματίστηκαν τρία σετ δοκιμίων, τα οποία υποβλήθηκαν στη συνέχεια σε συγκόλληση με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού.

3.3 ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΗΣ – FILLER METALS

Σε κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις συγκόλλησης του κράματος Haynes 25 σε φούρνο κενού, χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό υλικό πλήρωσης (filler metal). Τα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται αναλυτικά στην συνέχεια.

- **AMS 4776**

Αυτή η προδιαγραφή καλύπτει ένα κράμα νικελίου με χαμηλά ποσοστά σε άνθρακα C, με τη μορφή σύρματος, ράβδου, λωρίδας, φύλλου και σκόνης ή ένα παχύρρευστο μείγμα (πάστα) αποτέλεσμα σκόνης συνδυασμένης με κατάλληλο συνδετικό υλικό (cement).

Αυτό το υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται συνήθως για την ένωση ανθεκτικών στη θερμότητα και τη διάβρωση χαλύβων και κραμάτων που απαιτούν αντοχή στην διάβρωση και στην οξείδωση με καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση του δεν περιορίζεται σε τέτοιες εφαρμογές. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σκληρή επίστρωση-επικάλυψη, ανθεκτική στη διάβρωση και την οξείδωση.

Το κράμα AMS 4776 έχει τυπική χημική σύσταση που πρέπει να συμμορφώνεται με τα ποσοστά κατά βάρος όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 που δίνεται παρακάτω, όπως αυτά ορίζονται από την προδιαγραφή ASTM E354, με την χρήση υγρών χημικών μεθόδων.

Element	min	max
Carbon	--	0.06
Silicon	4.00	5.00
Phosphorus	--	0.02
Sulfur	--	0.02
Chromium	13.00	15.00
Boron	2.75	3.50
Iron	4.00	5.00
Cobalt (3.1.1)	--	0.10
Titanium	--	0.05
Aluminum	--	0.05
Selenium (3.1.1)	--	0.005 (50 ppm)
Zirconium	--	0.05
Nickel	remainder	

Πίνακας 3.3 Χημική σύσταση του κράματος AMS 4776 (ποσοστά κ.β.).

Η μηχανική αντοχή του υλικού δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 2,48 MPa (360 psi), όπως ορίζεται από την προδιαγραφή ASTM D638 για το υλικό πλήρωσης.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί το αναφερόμενο κράμα AMS 4776 υπό την μορφή σκόνης. Τα μεγέθη κόκκων της σκόνης αυτής διακρίνονται σε 60, 100, 140, 200 ή 325 mesh. Η σκόνη παρέχεται σύμφωνα με τα όρια κατανομής μεγέθους σωματιδίων που εμφανίζονται στον Πίνακα 3.4, εκτός αν ορίζεται μια άλλη κατανομή. Ο πίνακας αναφέρει την χρήση διαφορετικού μεγέθους κόσκινων και ορίζει το μέγιστο και ελάχιστο ποσοστά της σκόνης που πρέπει να διέρχονται μέσω αυτών. Οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται σύμφωνα με την αεροπορική προδιαγραφή ASTM B214 [63,65,66].

Mesh Designation	U.S. Standard Sieve			
60	Through a No.	40 sieve -	100	%
	Through a No.	60 sieve -	95	% min
	Through a No.	325 sieve -	10	% max
100	Through a No.	60 sieve -	100	%
	Through a No.	100 sieve -	95	% min
	Through a No.	325 sieve -	15	% max
140C	On a No.	100 sieve -	0.5	% max
	On a No.	140 sieve -	10	% max
	Through a No.	325 sieve -	20	% max
140F	On a No.	100 sieve -	0.5	% max
	On a No.	140 sieve -	10	% max
	Through a No.	325 sieve -	55	% max
200	On a No.	140 sieve -	0.5	% max
	On a No.	200 sieve -	10	% max
	Through a No.	325 sieve -	65	% max
325	On a No.	200 sieve -	0.5	% max
	On a No.	325 sieve -	10	% max
	Through a No.	325 sieve -	90	% min

Πίνακας 3.4 Όρια κατανομής μεγέθους σωματιδίων για το κράμα AMS 4776 υπό την μορφή σκόνης.

Το υλικό πλήρωσης AMS 4776 έχει κατά προσέγγιση θερμοκρασία solidus (θερμοκρασία κάτω από την οποία το σύστημα είναι τελείως στερεό) στους 977°C (1790°F) και κατά προσέγγιση θερμοκρασία liquidus (θερμοκρασία πάνω από την οποία το σύστημα είναι τελείως υγρό) 1077°C (1970°F).

Το προτεινόμενο θερμοκρασιακό εύρος για την συντέλεση συγκόλλησης brazing του μετάλλου πλήρωσης AMS 4476 είναι μεταξύ 1065-1205⁰C, ενώ η προτεινόμενη θερμοκρασία για βέλτιστα αποτελέσματα είναι στους 1120⁰C.

▪ **AMS 4779**

Αυτή η προδιαγραφή καλύπτει ένα κράμα νικελίου με χαμηλά ποσοστά σε άνθρακα C, με τη μορφή σύρματος, ράβδου, λωρίδας, φύλλου και σκόνης ή ένα παχύρρευστο μείγμα (πάστα), αποτέλεσμα σκόνης συνδυασμένη με κατάλληλο συνδετικό υλικό.

Αυτό το υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται τυπικά για τη ένωση χαλύβων και κραμάτων που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και τη θερμότητα και απαιτούν αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση με καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση του δεν περιορίζεται σε

τέτοιες εφαρμογές. Αυτό το μέταλλο πλήρωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως σκληρή επίστρωση- επικάλυψη ανθεκτική στη διάβρωση και την οξείδωση.

Το κράμα AMS 4779 έχει τυπική χημική σύσταση που πρέπει να συμμορφώνεται με τα ποσοστά κατά βάρος όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5 που δίνεται παρακάτω, όπως αυτά ορίζονται από την προδιαγραφή ASTM E354 με την χρήση υγρών χημικών μεθόδων.

Element	min	max
Carbon	-	0.06
Silicon	3.00	4.00
Phosphorus	-	0.02
Sulfur	-	0.02
Boron	1.50	2.20
Iron	-	1.50
Cobalt (3.1.1)	-	0.10
Titanium	-	0.05
Aluminum	-	0.05
Selenium (3.1.1)	-	0.005 (50 ppm)
Zirconium	-	0.05
Nickel	remainder	

Πίνακας 3.5 Χημική σύσταση του κράματος AMS 4779 (ποσοστά κ.β.)

Σε περίπτωση που απαιτείται η ανάμειξη της σκόνης κράματος με συνδετικό υλικό για την δημιουργία πάστας, τότε το τελικό μείγμα θα πρέπει να περιέχει σκόνη σε ποσοστό 84 έως 90% κατά βάρος σε κατάλληλο συνδετικό υλικό και, εκτός αν διατάσσεται διαφορετικά, δεν περιέχει συλλίπασμα. Το συλλίπασμα (flux) είναι ένα υγρό που χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις στην πάστα και ευνοεί την διάλυση των οξειδίων και την ροή του υλικού πλήρωσης κατά την διαδικασία της συγκόλλησης.

Η μηχανική αντοχή του υλικού δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 2,48 MPa (360 psi), όπως ορίζεται από την προδιαγραφή ASTM D638 για το υλικό πλήρωσης.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί το αναφερόμενο κράμα AMS 4779 υπό την μορφή σκόνης. Τα μεγέθη κόκκων της σκόνης αυτής διακρίνονται σε 60, 100, 140, 200 ή 325 mesh. Η σκόνη παρέχεται σύμφωνα με τα όρια κατανομής μεγέθους σωματιδίων που εμφανίζονται στον Πίνακα 3.6, εκτός αν ορίζεται μια άλλη διανομή. Ο πίνακας αναφέρει την χρήση διαφορετικού μεγέθους κόσκινων και ορίζει το μέγιστο και ελάχιστο ποσοστά της

σκόνης που πρέπει να διέρχονται μέσω αυτών. Οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται σύμφωνα με την αεροπορική προδιαγραφή ASTM B214 [64,65,66].

Mesh Designation	U.S. Standard Sieve
60	Through a No. 40 sieve - 100 %
	Through a No. 60 sieve - 95 % min
	Through a No.325 sieve - 10 % max
100	Through a No. 60 sieve - 100 %
	Through a No. 100 sieve - 95 % min
	Through a No.325 sieve - 15 % max
140C	On a No. 100 sieve - 0.5% max
	On a No. 140 sieve - 10 % max
	Through a No.325 sieve - 20 % max
140F	On a No. 100 sieve - 0.5% max
	On a No. 140 sieve - 10 % max
	Through a No.325 sieve - 55 % max
200	On a No. 140 sieve - 0.5% max
	On a No. 200 sieve - 10 % max
	Through a No.325 sieve - 65 % max
325	On a No. 200 sieve - 0.5% max
	On a No. 325 sieve - 10 % max
	Through a No.325 sieve - 90 % min

Πίνακας 3.6 Όρια κατανομής μεγέθους σωματιδίων για το κράμα AMS 4779 υπό την μορφή σκόνης.

Το υλικό πλήρωσης AMS 4779 έχει κατά προσέγγιση θερμοκρασία solidus στους 982°C (1800°F) και κατά προσέγγιση θερμοκρασία liquidus στους 1066°C (1950°F).

Το προτεινόμενο θερμοκρασιακό εύρος για την συντέλεση συγκόλλησης brazing του μετάλλου πλήρωσης AMS 4779 είναι μεταξύ 1065-1175°C, ενώ η προτεινόμενη θερμοκρασία για βέλτιστα αποτελέσματα είναι στους 1120°C.

▪ **AWS BNi-9**

Αυτή η προδιαγραφή καλύπτει ένα κράμα νικελίου με χαμηλά ποσοστά σε άνθρακα C, με τη μορφή σκόνης ή πάστας- ένα παχύρρευστο μείγμα, αποτέλεσμα της σκόνης συνδυασμένη με κατάλληλο συνδετικό υλικό. Το κράμα αναφέρεται επίσης ως High Temperature 935 ή Microbraz 150.

Το BNi-9 είναι ένα ευτηκτικό κράμα συγκόλλησης με βάση το νικέλιο, κατάλληλο για τη συγκόλληση νικελίου, υπερκραμάτων, ανοξειδωτων χαλύβων και άλλων συγκροτημάτων τα οποία απαιτούν καλή αντοχή αρμού σε υψηλές θερμοκρασίες με εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση και οξείδωση. Μερικές από τις εφαρμογές για αυτό το μέταλλο πλήρωσης είναι φύλλα μετάλλου έντονα καταπονημένα, μέρη τζετ κινητήρα και τα συγκροτήματα που χρησιμοποιούνται σε διαβρωτικές συνθήκες. Εμφανίζει επίσης καλή αντοχή μετά από συγκόλληση με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών.

Το κράμα AWS BNi-9 (Microbraz 150) έχει τυπική χημική σύσταση που πρέπει να συμφωνεί με τα ποσοστά κατά βάρος όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7 που δίνεται παρακάτω:

Nickel	Remainder
Chromium	15.0% ± 1.5
Boron	3.625% ± 0.375
Iron	1.5% max
Carbon	0.06% max
Phosphorous	0.02% max
Sulfur	0.02% max
Aluminum	0.05% max
Titanium	0.05% max
Zirconium	0.05% max
Cobalt	0.10% max
Selenium	0.005% max
Other Elements, Total**	0.50% max

Πίνακας 3.7 Χημική σύσταση του κράματος AWS BNi-9 (ποσοστά κ.β.)

Λόγω της ευτηκτικής του φύσης, η σκόνη BNi-9 παρουσιάζει εξαιρετική ρευστότητα και ως εκ τούτου είναι καλή επιλογή για στενές, βαθιές συνδέσεις όπου διατηρούνται αυστηρότερες αποστάσεις. Όταν χρησιμοποιείται για συγκόλληση λεπτότερων, λιγότερο ελατών εξαρτημάτων, η συγκόλληση θα πρέπει να διεξάγεται στο κάτω μέρος του θερμοκρασιακού εύρους brazing, συνδυασμένο μαζί με γρήγορους κύκλους θέρμανσης και ψύξης, ώστε να ελαχιστοποιείται η παραμόρφωση. Το προτεινόμενο θερμοκρασιακό εύρος για την συντέλεση συγκόλλησης brazing είναι μεταξύ 1065-1205°C (1950-2200°F), ενώ η προτεινόμενη θερμοκρασία για βέλτιστα αποτελέσματα είναι στους 1065°C.

Το υλικό πλήρωσης AWS BNi-9 έχει κατά προσέγγιση θερμοκρασία solidus στους 1055°C (1930°F) και θερμοκρασία liquidus στους 1055°C (1930°F).

Οι ιδιότητες των συγκολλημένων δοκιμίων εξαρτώνται από το βασικό μέταλλο, τον σχεδιασμό της συγκόλλησης και την τεχνική συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε [65,66].

3.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

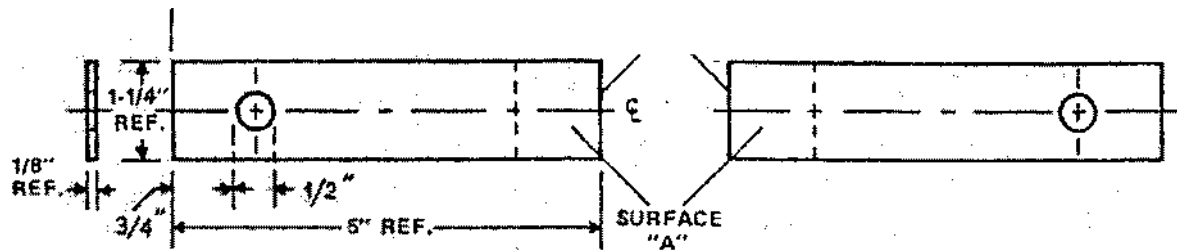
3.4.1. ΚΟΠΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας, από το αρχικό έλασμα του κράματος κοβαλτίου Haynes 25 σχηματίστηκαν δύο ομάδες δοκιμίων προς μελέτη. Για την πρώτη ομάδα δοκιμίων δημιουργήσαμε δέκα ίδια ελάσματα ορθογωνικού σχήματος. Από αυτά τα επιμέρους ελάσματα σχηματίστηκαν πέντε δοκίμια (αποτελούμενο από δυο ελάσματα έκαστο) τα οποία υποβλήθηκαν σε συγκόλληση με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού, με διαφορετικό μέταλλο προσθήκης το καθένα και τέλος οδηγήθηκαν για τεστ αντοχής σε εφελκυσμό.

Ο σχηματισμός των προς συγκόλληση τεμαχίων συντελέστηκε σύμφωνα με την αεροπορική προδιαγραφή AWS C3.2. Τα δείγματα προς συγκόλληση κόπηκαν σε διαστάσεις περίπου 130x30x1,6 mm (μήκος, πλάτος, πάχος). Τα δείγματα τοποθετούνται ανά ζεύγος σχηματίζοντας πέντε δοκίμια, όπου το ένα καλύπτει το άλλο με επικάλυψη (overlap) 2,3,4,5, και 6 φορές αντίστοιχα το πάχος του δοκιμίου (T).

Η πειραματική εμπειρία έχει δείξει ότι τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν περίπου το 70% όλων των δοκιμίων αποτυγχάνουν στην περιοχή του μετάλλου πλήρωσης. Σε κάθε περίπτωση, οι επικαλύψεις (overlap) πρέπει να επιλέγονται ανάλογα για να επιτυγχάνεται αυτή η αναλογία.

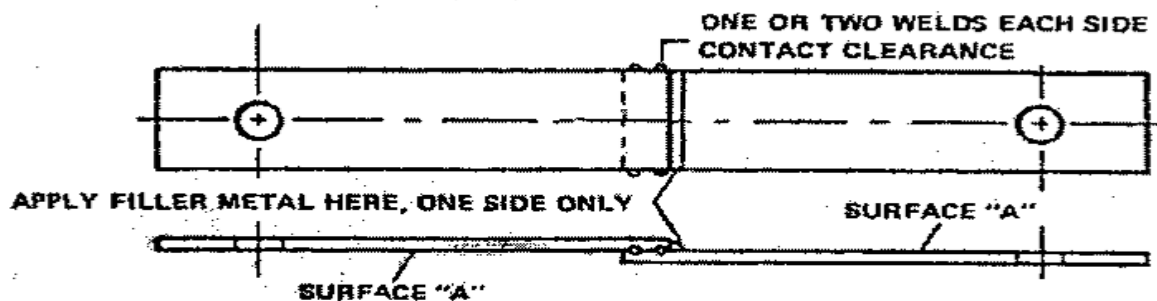
Τα δοκίμια εφελκυσμού προετοιμάζονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2 Κοπή και προετοιμασία δοκιμίων εφελκυσμού.

Ανάμεσα στην επαφή του κάθε ζεύγους δοκιμίων τοποθετήθηκε έλασμα πάχους 0,0002 mm (2μm) ή 0,004 χιλιοστά της ίντσας (0,004" inches) για την δημιουργία του αντίστοιχου διάκενου. Η διατήρηση του διάκενου πρέπει να βρίσκεται στα βέλτιστα συνιστώμενα πλαίσια από την παρούσα προδιαγραφή.

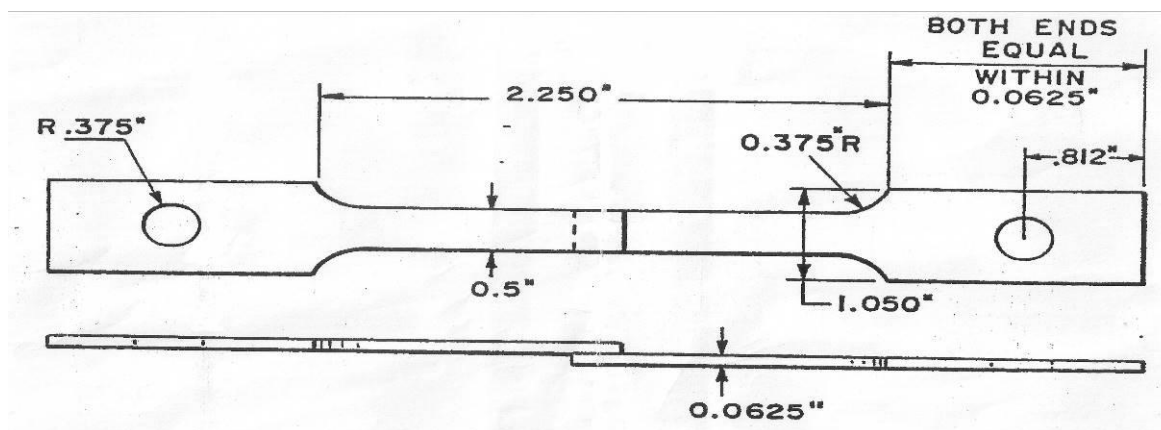
Το overlap και το ζεύγος δειγμάτων μπορούν να συγκρατούνται με επιμέρους συγκόλληση (tack weld) στα άκρα με τη μέθοδο βολφραμίου-τόξου με αέριο (TIG) ή μπορεί να συγκρατούνται από ένα κατάλληλο εξάρτημα κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η διαμόρφωση και οι συνιστώμενες αντοχές για τη συναρμολόγηση των δοκιμίων εφελκυσμού πριν από τη συγκόλληση (brazing) φαίνονται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 Διαμόρφωση και συνιστώμενες αντοχές για την συναρμολόγηση των δοκιμίων εφελκυσμού πριν από την συγκόλληση (brazing).

Μετά την συγκόλληση των δοκιμίων με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού, τα δοκίμια για τον εφελκυσμό στάλθηκαν στο μηχανουργείο για κοπή για την απόκτηση του τελικού τους σχήματος. Για λόγους μη διατάραξης της μικροδομής, από αυξημένες θερμοκρασίες λόγω τριβής, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της υδροκοπής (waterjet cutting). Η

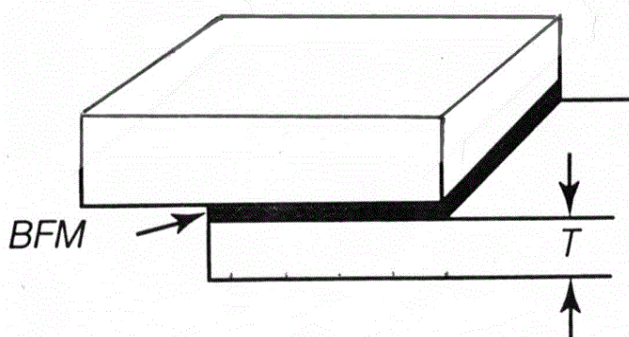
κόπη των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM E8, και οι διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στην Εικόνα 3.4. Μετά από τον σχηματισμό των παρακάτω δοκιμίων, αυτά οδηγούνται για δοκιμή εφελκυσμού.



Εικόνα 3.4 Σχέδιο σύμφωνα με το οποίο κόπηκαν τα δοκίμια εφελκυσμού.

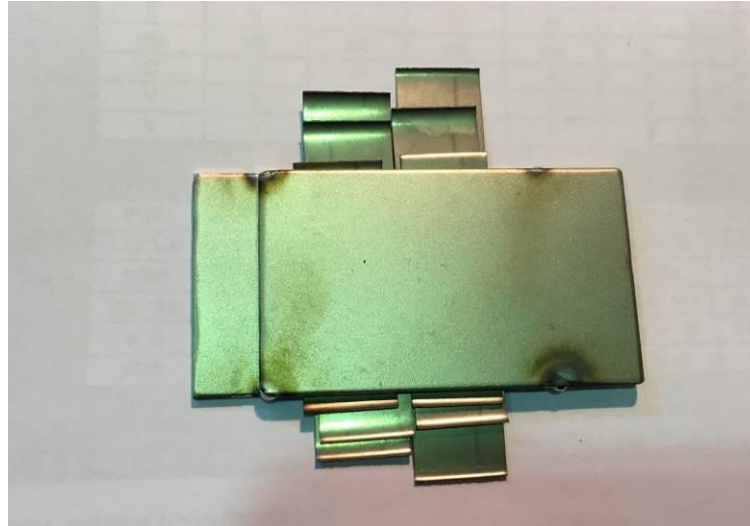
Για την δεύτερη ομάδα δοκιμίων δημιουργήθηκαν από το υλικό βάσης έξι ίδια ελάσματα. Παρόμοια με την προηγούμενη ομάδα δοκιμίων, από αυτά τα επιμέρους κομμάτια σχηματίστηκαν τρία δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε συγκόλληση με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού, με διαφορετικό μέταλλο προσθήκης το καθένα.

Τα δείγματα προς συγκόλληση κόπηκαν σε διαστάσεις περίπου 130x30x1,6 mm (μήκος, πλάτος, πάχος). Τα δείγματα τοποθετούνται ανά ζεύγος, το ένα καλύπτοντας το άλλο με επικάλυψη (overlap) 40 mm, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση ζεύγους δοκιμίων με overlap 40 mm. (T=πάχος και BFM=brazing filler metal)

Ανάμεσα στην επαφή του κάθε ζεύγους δοκιμίων τοποθετήθηκε έλασμα πάχους 0,004 χιλιοστών της ίντσας (100 μm) ή για την δημιουργία του αντίστοιχου διάκενου. Τα δοκίμια μαζί με το έλασμα σταθεροποιούνται στα άκρα μέσω συγκόλλησης TIG και στην συνέχεια το έλασμα αφαιρείται από το σύστημα των δειγμάτων με αποτέλεσμα την δημιουργία του διάκενου.



Εικόνα 3.6 Συγκολλημένα δοκίμια στις άκρες για την σταθεροποίηση του διάκενου (μέσω λεπτού ελάσματος) και του overlap.



Εικόνα 3.7 Σχηματιζόμενο διάκενο περίπου 0.004” μετά την αφαίρεση του λεπτού ελάσματος

Τα τρία δοκίμια που σχηματίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία, οδηγήθηκαν εν συνεχεία για συγκόλληση με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού. Μετά το πέρας της συγκόλλησης τα δοκίμια κόπηκαν σε κάθετη τομή στην περιοχή του διάκενου και οδηγήθηκαν για μεταλλογραφική ανάλυση της συγκόλλησης.

3.4.2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

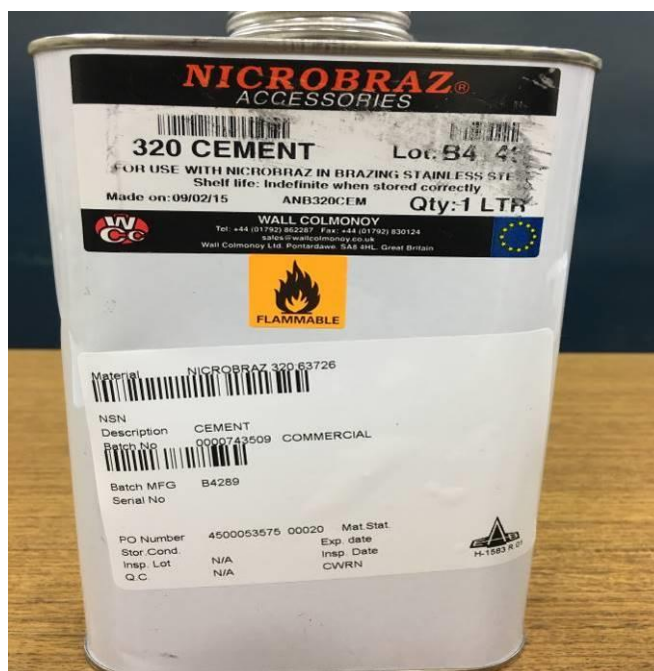
Οι δύο ομάδες δοκιμίων, όπως σχηματίστηκαν μετά την κοπή, στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε συγκόλληση με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (vacuum furnace brazing). Οι επιφάνειες των δοκιμίων πρέπει να προετοιμαστούν κατάλληλα για τη συγκόλληση, σύμφωνα με την αεροπορική προδιαγραφή AWS C3.2, με αρμόζουσα διαδικασία ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού και την μέθοδο συγκόλλησης που θα ακολουθηθεί. Αυτή μπορεί να περιλαμβάνει, αλλά δεν περιορίζεται σε, αμμοβολή, επικάλυψη ή καθαρισμό με διαλύτη των προς συγκόλληση επιφανειών. Συνήθως, όπως και στην παρούσα περίπτωση, στα δοκίμια χρησιμοποιείται σκόνη Microbraz No. 60 (ανοξειδωτος χάλυβας) για αμμοβολή, προκειμένου να τραχυνθούν τις επιφάνειες της συγκόλλησης. Δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μη μεταλλικές σκόνες όπως γυαλί ή αλουμίνα για τέτοιου είδους υλικά.

Στην συνέχεια, το μέταλλο πλήρωσης εφαρμόζεται στη μία από τις δύο επιφάνειες δίπλα από το διάκενο, σε ποσότητα η οποία πρέπει να είναι το ελάχιστο που πληρώνει πλήρως το διάκενο της συγκόλλησης. Η ποσότητα ποικίλει ανάλογα με την έκταση του κενού.



Εικόνα 3.8 Σκόνη brazing

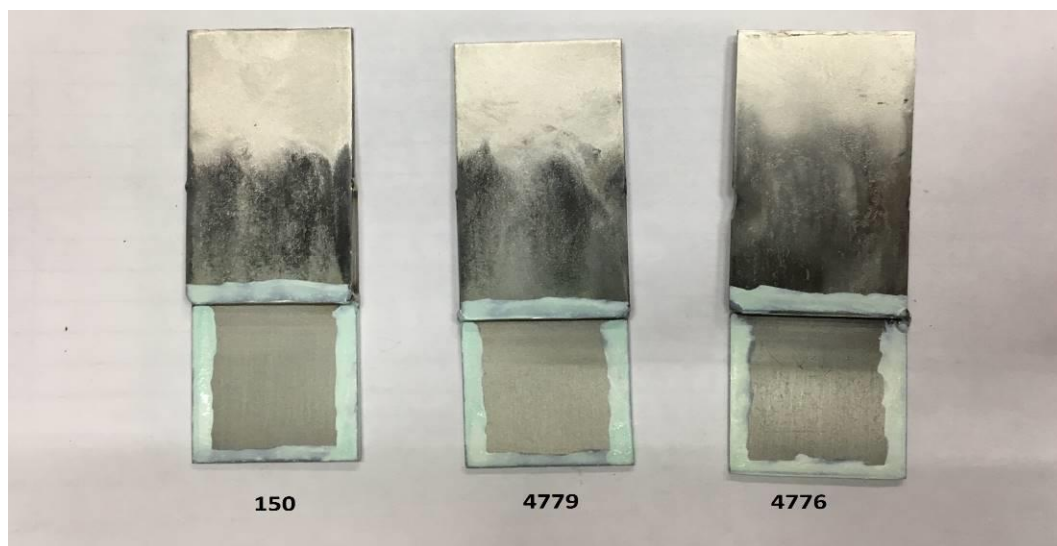
Για την δημιουργία πάστας, πριν την τοποθέτηση του στο δοκίμιο το υλικό πλήρωσης αναμειγνύεται με το συνδετικό υλικό (cement), το οποίο χρησιμοποιείται για δημιουργία πάστας υλικού και την εύκολη τοποθέτηση στα σημεία συγκόλλησης.



Εικόνα 3.9 Συνδετικό υλικό σκόνης (cement) που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή πάστας (Πηγή Ε.Α.Β.).

Τέλος, πριν την εισαγωγή των δοκιμίων στο φούρνο κενού για συγκόλληση, στα δοκίμια πρέπει να προστεθεί stop-off, ένα υλικό που τοποθετείται στα άκρα των δοκιμίων και εμποδίζει το μέταλλο πλήρωσης να ρεύσει εκτός της επιφάνειας των δοκιμίων αφού έχει υποστεί τήξη. Η τελική μορφή των δοκιμίων πριν την εισαγωγή τους στον φούρνο συγκόλλησης απεικονίζεται στην Εικόνα 3.10. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν όρθια στον φούρνο για συγκόλληση.

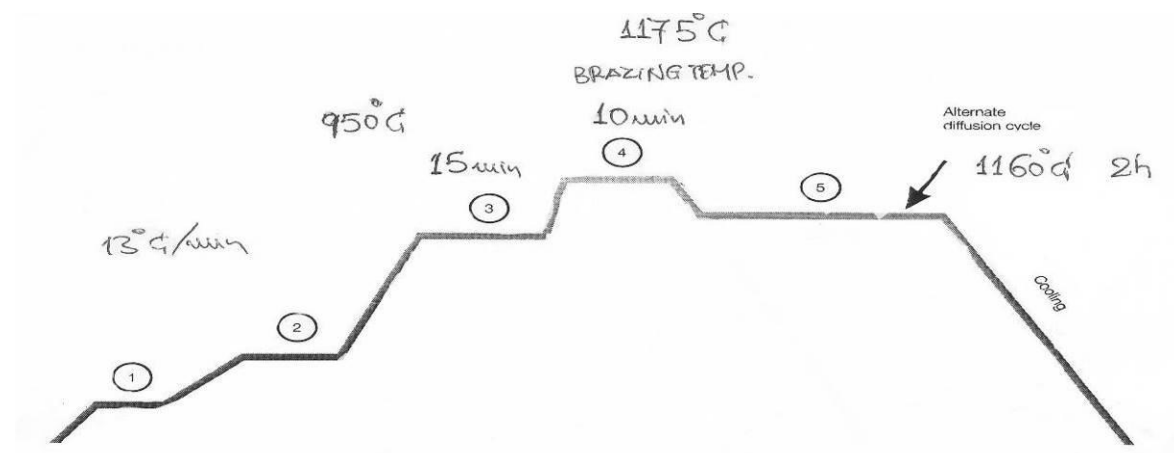
Για την συγκόλληση των δύο ομάδων δοκιμίων θα ακολουθηθεί ο κύκλος brazing όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.1. Τα δοκίμια θερμάνθηκαν στον φούρνο κενού με ρυθμό $13^{\circ}\text{C}/\text{min}$ μέχρι να φτάσουν τους 950°C . Σε αυτή την θερμοκρασία διατηρήθηκαν για 15 λεπτά. Στην συνέχεια ανήλθαν στην θερμοκρασία συγκόλλησης brazing, στην οποία παρέμειναν για 10 λεπτά. Η συγκόλληση συντελέστηκε σε θερμοκρασία brazing 1175°C , μεγαλύτερη από την προτεινόμενη θερμοκρασία brazing και για τα τρία υλικά πλήρωσης.



Εικόνα 3.10 Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων μετά τον καθαρισμό με μεταλλική σκόνη και την εφαρμογή του stop-off.

Τέλος, μετά την συγκόλληση, αντί για την ψύξη των δοκιμίων και την επαναφορά τους στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, ακολουθήθηκε ένας εναλλακτικός κύκλος διάχυσης (diffusion) με διατήρηση των δοκιμίων σε θερμοκρασία 1160°C για δύο ώρες και στην συνέχεια ψύξη

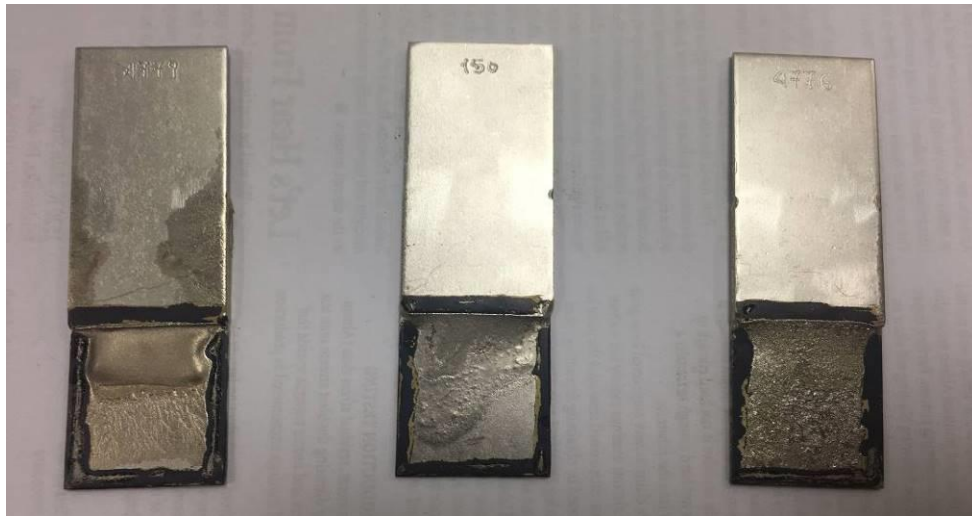
για επαναφορά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή συντελέστηκε τρεις φορές, μία για κάθε υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιήθηκε.



Διάγραμμα 3.1 Ο κύκλος brazing και diffusion που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δοκιμίων.

Μετά τη συγκόλληση, όλα τα δείγματα λειάνθηκαν και καθαρίστηκαν ώστε να απομακρυνθεί πλεόνασμα του μετάλλου πλήρωσης.

Τα δείγματα της πρώτης ομάδας δοκιμίων μετά την συγκόλληση στάλθηκαν για δοκιμή εφελκυσμού. Τα τρία δοκίμια που λήφθηκαν από την δεύτερη ομάδα δοκιμίων, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 3.11., κόπηκαν, όπως αναφέραμε σε κάθετη τομή στην περιοχή του διάκενου και οδηγήθηκαν για μεταλλογραφική ανάλυση της συγκόλλησης. Η παρατήρηση έγινε σε δοκίμια διαστάσεων $20 \times 30 \times 3$ mm (μήκος, πλάτος, πάχος).



Εικόνα 3.11 Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων μετά την τήξη των υλικών πλήρωσης και την συγκόλλησή τους σε φούρνο κενού.



Εικόνα 3.12 Αποτέλεσμα της συγκόλλησης. Πλήρωση του διάκενου με τήξη των υλικών.

3.4.3. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Τα τρία δοκίμια που οδηγήθηκαν σε μεταλλογραφική μελέτη εγκιβωτίστηκαν σε καλούπια βακελίτη διαμέτρου περίπου 3cm.

Τα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης αποσκοπούσαν στην μείωση της επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων, με σκοπό να είναι εφικτή η αποκάλυψη της μικροδομής τους στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η λείανση πραγματοποιήθηκε σε οριζόντιο, υδρόψυκτο, περιστρεφόμενο τροχό, κατά την διάρκεια της οποίας, η επιφάνεια του δοκιμίου εφάπτονταν στον τροχό. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε ειδικό μηχάνημα με αυτοματοποιημένο τρόπο, έτσι ώστε η πίεση να εφαρμόζεται ισόποσα στην επιφάνεια των δοκιμίων, με σκοπό την εξάλειψη των περιθωρίων σφάλματος του ανθρώπινου παράγοντα. Σαν μέσο λείανσης χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά από καρβίδιο του πυριτίου (SiC), τοποθετημένα πάνω στην επιφάνεια του τροχού. Τα λειαντικά χαρτιά χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό (grit), ο οποίος αντιπροσωπεύει το μέγεθος κόκκου του λειαντικού μέσου. Παραδείγματος χάριν, ο αριθμός 220 grit υποδηλώνει πως σε κάθε τετραγωνική ίντσα του λειαντικού χαρτιού υπάρχουν 220 καρβίδια του πυριτίου. Τα χαρτιά που χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά ήταν 220, 400, 800 και 1200 grit. Κατά την ολοκλήρωση του κάθε επιπέδου λείανσης, και με την αλλαγή του λειαντικού χαρτιού, άλλαζε και ο προσανατολισμός των δοκιμίων κατά 90 μοίρες, με σκοπό να απαλείφονται οι γραμμές από το προηγούμενο στάδιο.

Κατά το επόμενο στάδιο προετοιμασίας των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε στίλβωση των δοκιμίων. Σκοπός της στίλβωσης ήταν η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Η στίλβωση επετεύχθη με την χρήση πάστας κολλοειδούς διοξειδίου του πυριτίου (colloidal silica), με μέγεθος σωματιδίων 0.05μm. Η διάταξη ήταν οριζόντιος, ομοαξονικά περιστρεφόμενος τροχός, χωρίς ψύξη. Πριν και κατά την επαφή του δείγματος με το ύφασμα του τροχού τροφοδοτούσαμε περιοδικά στίλβωτικό.

3.5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

3.5.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Στη παρούσα μελέτη το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της μικροδομής ήταν τύπου JEOL JSM-6380 LV με συλλέκτη X-ray INCA x-sight από την OXFORD. Το μικροσκόπιο JEOL είναι ένα μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης υψηλής απόδοσης, χαμηλού κόστους, με υψηλή ανάλυση μέχρι και 3,0 nm αφού το σύστημα έχει ονομαστική μεγέθυνση από 10 μέχρι 300.000 φορές για την μορφολογική παρατήρηση των δοκιμίων. Ο θάλαμος λειτουργεί υπό χαμηλό κενό της τάξης 10^{-6} torr και επιτρέπει την παρατήρηση δειγμάτων που δεν μπορούν να προβληθούν σε υψηλό κενό λόγω υπερβολικής περιεκτικότητας σε νερό ή λόγω μη αγωγίμης επιφάνειας. Οι τυπικές αυτοματοποιημένες λειτουργίες περιλαμβάνουν αυτόματη εστίαση, αυτόματο όπλο (για κορεσμό και ευθυγράμμιση) και αυτόματη αντίθεση και φωτεινότητα.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για την εξέταση δοκιμίων. Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X.

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια προκύπτουν από τη σύγκρουση των ηλεκτρονίων της δέσμης με εκείνα του ατόμου. Είναι χαμηλής ενέργειας, εκπέμπονται κοντά στην επιφάνεια του δείγματος και είναι χρήσιμα για την απεικόνιση της επιφάνειας του δείγματος.

Τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι αυτά που συγκρούονται ελαστικά με τον πυρήνα του ατόμου (ειδικά σε μεγάλα άτομα) και σκεδάζονται προς τα πίσω με γωνία 180° , έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και εκπέμπονται από μεγαλύτερο βάθος από το δείγμα. Ανάλογα με τον ατομικό αριθμό του ατόμου του δείγματος αλλάζει και το ποσοστό των οπισθοσκεδαζόμενων (backscattered) ηλεκτρονίων, άρα και η εικόνα που παίρνουμε. Έτσι, έχουμε πληροφορίες για τη σύσταση του δοκιμίου.

Όσον αφορά τις ακτίνες X, ο τρόπος λειτουργίας τους είναι παρόμοιος με αυτόν του XRD.

3.5.2. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Το οπτικό μικροσκόπιο είναι οπτικό σύστημα για την παρατήρηση αντικειμένων υπό μεγέθυνση, με τη βοήθεια του φωτός. Η παρατήρηση μπορεί να γίνεται είτε μέσω του ανακλώμενου είτε μέσω του διερχόμενου, από τα προς παρατήρηση αντικείμενα, φωτός. Το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιείται σε μία ευρεία περιοχή εφαρμογών. Στην παρούσα εργασία η παρατήρηση συντελέστηκε σε ένα σύγχρονο οπτικό μικροσκόπιο Olympus GX51 στις εγκαταστάσεις της Ε.Α.Β.

Το αντικείμενο τοποθετείται πολύ κοντά σε ένα συγκλίνοντα φακό (τον *αντικειμενικό* ή *αντοφθάλμιο φακό*), πολύ μικρής εστιακής απόστασης, ο οποίος σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλό του. Το είδωλο αυτό μεγεθύνεται από έναν άλλο συγκλίνοντα φακό (τον *προσοφθάλμιο φακό*), ο οποίος σχηματίζει ένα φανταστικό είδωλο σε μια απόσταση από το μάτι που βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως. Το μάτι παρατηρεί αυτό το είδωλο. Το μήκος του σωλήνα του μικροσκοπίου έχει συνήθως σταθερό μήκος (τυπικά 160 mm). Έτσι, η εστίαση γίνεται με μετακίνηση του όλου οπτικού συστήματος ως προς το παρατηρούμενο αντικείμενο, μέχρι να επιτευχθεί εστίαση για ευκρινή παρατήρηση.

Τα οπτικά μικροσκόπια συνήθως λειτουργούν χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές φωτισμού και απεικόνισης, οι οποίες προσαρμόζονται κάθε φορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του παρατηρούμενου δείγματος. Μεταξύ αυτών των τεχνικών φωτισμού και απεικόνισης, η λειτουργία με φωτισμό φωτεινού πεδίου είναι η πλέον συνηθισμένη. Κατά τη λειτουργία με φωτισμό *φωτεινού πεδίου* η δέσμη φωτισμού εστιάζεται επί του δείγματος, κατά μήκος του οπτικού άξονα του συστήματος, σε γεωμετρία είτε ανάκλασης είτε διάδοσης, οπότε ο μηχανισμός απεικόνισης είναι η σκέδαση ή η απορρόφηση αντίστοιχα. Κατά τη λειτουργία με φωτισμό *σκοτεινού πεδίου* η δέσμη φωτισμού εστιάζεται επί του δείγματος αφού το κεντρικό μέρος της αποκοπεί από κατάλληλο δίσκο αποκοπής. Με τον τρόπο αυτό, στον αντικειμενικό φακό εισέρχονται μόνο σκεδαζόμενες ακτίνες, και επομένως είναι ο κατάλληλος τρόπος λειτουργίας για την παρατήρηση δειγμάτων που παρουσιάζουν χαμηλή *αντίθεση* (contrast) σε ανάκλαση ή διάδοση αλλά έχουν λεπτομέρειες οι οποίες σκεδάζουν έντονα το φως. Άλλη τεχνική φωτισμού και απεικόνισης είναι η λειτουργία με χρήση πολωμένου φωτός, κατά την οποία δύο πολωτές, διασταυρωμένοι μεταξύ τους, παρεμβάλλονται, ο μιν ένας μεταξύ πηγής

και αντικειμένου ο δε άλλος μεταξύ αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την παρατήρηση διπλοθλαστικών ή φωτοελαστικών δειγμάτων, και είναι πολύ χρήσιμη για την παρατήρηση ανισότροπων σκοτεινών δειγμάτων, όταν μελετώνται κατανομές φάσεων, μέγεθος και προσανατολισμός κρυσταλλικών κόκκων, κρυσταλλικές διδυμίες κ.ά.

Το μικροσκόπιο μπορεί να συνδυαστεί με φωτογραφική μηχανή, για τη φωτογράφιση μεγεθυμένων εικόνων των αντικειμένων, εφαρμογή που χρησιμοποιήθηκε και για την παρούσα εργασία.

3.6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

3.6.1. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Στην πρώτη ομάδα συγκολλημένων δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές εφελκυσμού, κάθετα στη διεύθυνση της συγκόλλησης, σε συσκευή τύπου Instron – Model 4482. Η δοκιμή εφελκυσμού πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της Ε.Α.Β. Τα δοκίμια εφελκυσμού διαμορφώθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8 και οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου δόθηκαν στην παράγραφο 3.4.1. Οι δοκιμές εφελκυσμού διεκπεραιώθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8 (Standard Methods of Metallic Materials) και το πρότυπο ASTM για ειδικές βάσεις μετάλλων.

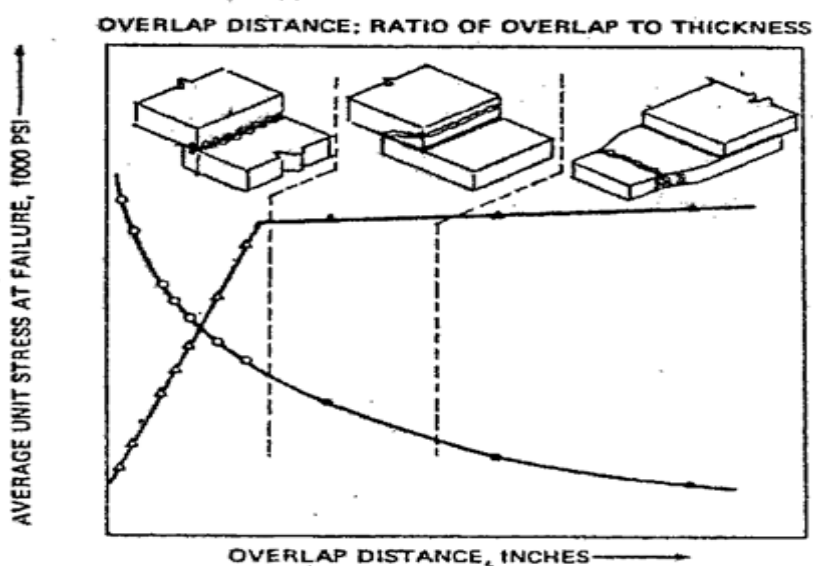
Πριν από τη δοκιμή εφελκυσμού, όλα τα δείγματα μετρήθηκαν για τις αποστάσεις υπερκάλυψης (overlap), το πλάτος και το πάχος τους. Ταυτόχρονα καθορίστηκε το πάχος της συγκόλλησης. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν με την χρήση παχύμετρου. Το εκτιμώμενο πάχος της συγκόλλησης μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέτρηση του πάχους χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$T_{\text{joint}} = T_{\text{total}} (T_1 + T_2)$$

όπου T_{total} είναι το συνολικό πάχος του δείγματος και τα T_1 και T_2 είναι τα αρχικά πάχη του μετάλλου βάσης.

Πρέπει να καταγράφεται το φορτίο (όριο) θραύσης και η θέση θραύσης (είτε στο μέταλλο πλήρωσης είτε στο βασικού μετάλλου) για όλα τα δοκίμια που θα υποβληθούν σε δοκιμή εφελκυσμού.

Η σχέση μεταξύ της μέσης διατμητικής τάσης που ασκείται σε δοκίμιο και του σημείου της αστοχίας της συγκόλλησης κατά τον εφελκυσμό ανάλογα με την απόσταση υπερκάλυψης (overlap) εμφανίζεται στο Διάγραμμα 3.2. Τα κενά σύμβολα του διαγράμματος αντιπροσωπεύουν αστοχία στο μέταλλο πλήρωσης (filler metal) ενώ τα γεμάτα σύμβολα αντιπροσωπεύουν αστοχία στο βασικό μέταλλο (metal base).



Διάγραμμα 3.2 Σχέση μέσης διατμητικής τάσης που ασκείται στο δοκίμιο και σημείο αστοχίας της συγκόλλησης.

Τα πέντε δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού σχηματίστηκαν με αποστάσεις υπερκάλυψης (overlap) 2T, 3T, 4T, 5T και 6T αντίστοιχα, όπου T είναι το πάχος των δοκιμίων από το αρχικό έλασμα δηλ. 1,6 mm. Αναλυτικά, οι αποστάσεις overlap σε χιλιοστάμετρα για το κάθε δοκίμιο αναφέρονται στον Πίνακα 3.8.

Δοκίμιο	Overlap	Overlap mm
1 ^ο	2T	3,29
2 ^ο	3T	5,40
3 ^ο	4T	9,20
4 ^ο	5T	12,70
5 ^ο	6T	13,70

Πίνακας 3.8: Αποστάσεις overlap σε σχέση με το πάχος T για όλα τα δοκίμια της δοκιμής εφελκυσμού.

Τα σχηματιζόμενα δοκίμια που οδηγούνται για την δοκιμή εφελκυσμού ονομάζονται με αριθμό που αναγράφεται και στα δύο μέρη του δοκιμίου δεξιά και αριστερά της συγκόλλησης όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.13. Πριν την τοποθέτησή τους στο μηχάνημα εφελκυσμού τα δοκίμια λειαίνονται στα πλάγια και στα σημεία αρχής του λαιμού στην συγκόλλησης ώστε να αποφευχθούν αιχμές και σημεία ανύψωσης τάσεων (stress raising).



Εικόνα 3.13 Συγκολλημένα δοκίμια εφελκυσμού.

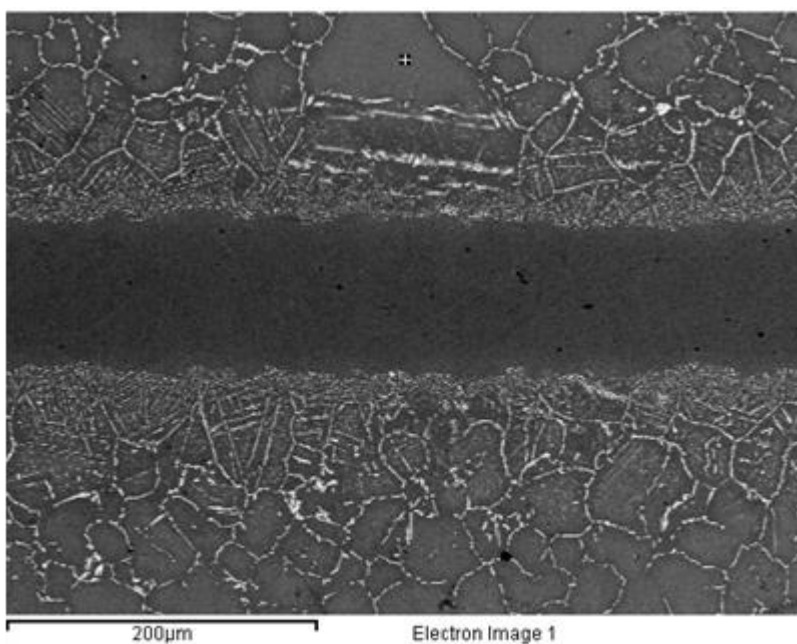
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

4.1.1. ΜΕΤΑΛΛΟ ΒΑΣΗΣ

Πραγματοποιήθηκε παρατήρηση της μικροδομής του μετάλλου βάσης Haynes 25 μετά την διαδικασία συγκόλλησης με την χρήση εικόνων που παραλήφθηκαν από το SEM.

Το υπερκράμα Haynes 25 χαρακτηρίζεται από ισοαξονικούς κόκκους με μέγεθος κόκκου μεταξύ 70 και 100 μm ενώ παρατηρείται η χαρακτηριστική ωστενιτική δομή, με εμφανή σε ορισμένα σημεία την παρουσία διδυμιών.



Εικόνα 4.1 Ηλεκτρονική μικρογραφία του μετάλλου βάσης Haynes 25 (στο σημείο του σταυρού) μετά την συγκόλληση. (x200).

Στο Haynes 25 παρατηρείται επίσης ποικιλία καρβιδίων τύπου M_6C , πλούσια σε βολφράμιο, ογκώδους μορφολογίας, ενδοκρυσταλλικά αλλά και στα όρια των κόκκων, τα οποία εμποδίζουν την μεγέθυνση των κόκκων κατά την θερμική επεξεργασία. Ταυτόχρονα, παρατηρείται και ύπαρξη καρβιδίων τύπου M_{23}C_6 τα οποία βρίσκονται διεσπαρμένα σε ενδοκρυσταλλικές περιοχές, αλλά και περικρυσταλλικά κατά μήκος των ορίων των καρβιδίων

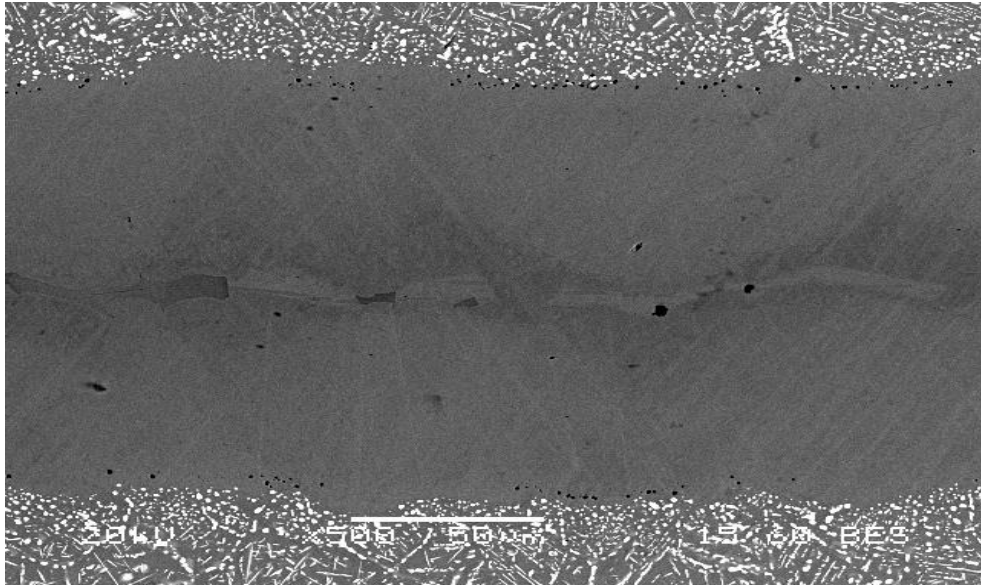
M_6C ή των ορίων των κόκκων, υπό μορφή ασυνεχώς κατακρημνισμένων καρβιδίων, πλούσιων σε μολυβδαίνιο, χρώμιο και νικέλιο όπως προσδιορίζεται βιβλιογραφικά. Πιθανός είναι και ο σχηματισμός ενώσεων Co_2W σε συνδυασμό με τα καρβίδια M_6C στο κρυσταλλικό πλέγμα fcc.

Στην συνέχεια μελετήθηκε πιο αναλυτικά η συμπεριφορά του μετάλλου βάσης καθώς και η μικροδομή της ομάδας δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με την χρήση διαφορετικού μετάλλου πλήρωσης στην εκάστοτε περίπτωση.

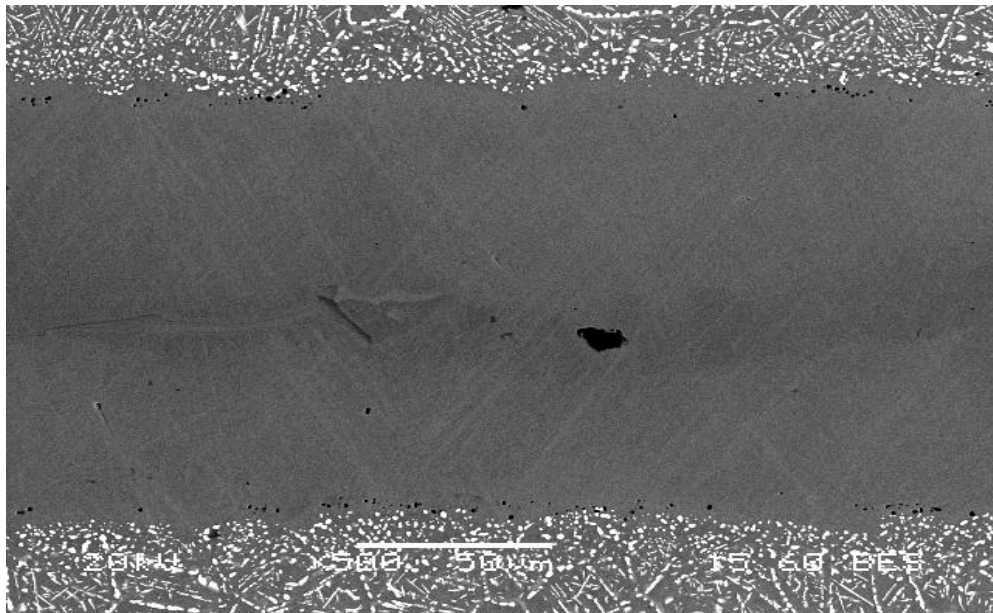
4.1.2. ΔΟΚΙΜΙΟ 1-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4776

A. Ζώνη Συγκόλλησης

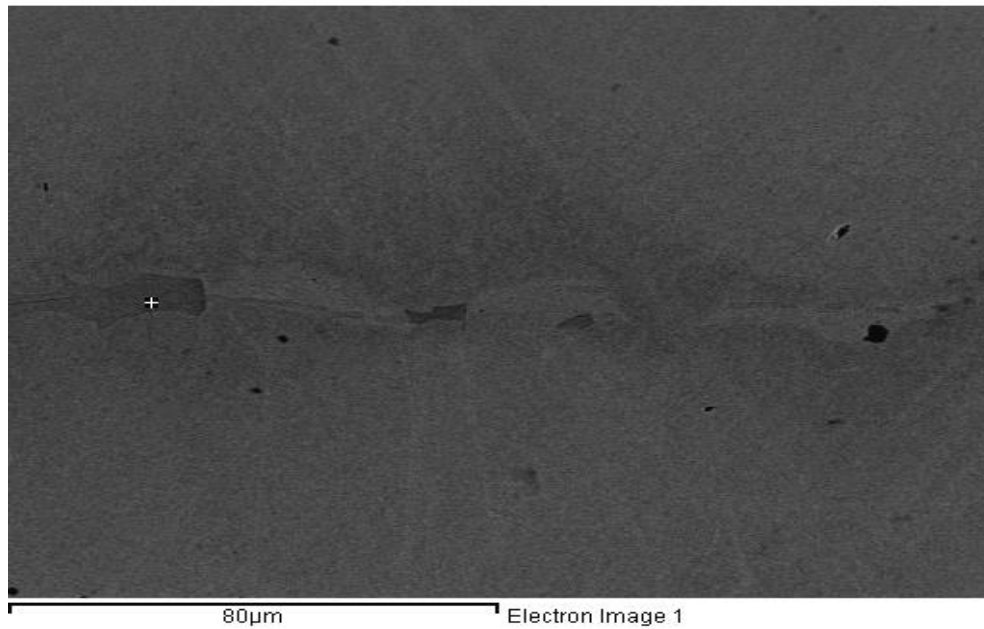
Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες, από την ζώνη συγκόλλησης του πρώτου δοκιμίου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο προσθήκης το μέταλλο πλήρωσης αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4776. Η λήψη των φωτογραφιών πραγματοποιήθηκε στο SEM με την χρήση οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES backscattered electron image).



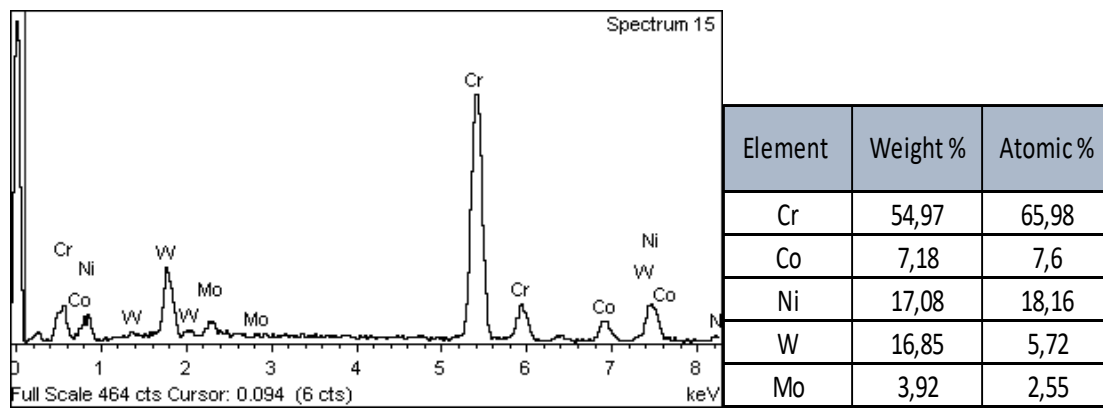
Εικόνα 4.2 Ηλεκτρονική μικρογραφία οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης



Εικόνα 4.3 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



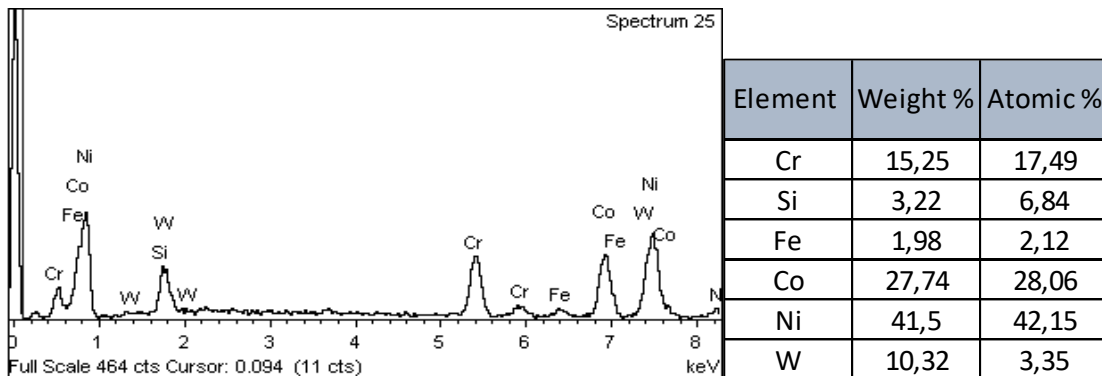
Εικόνα 4.4 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



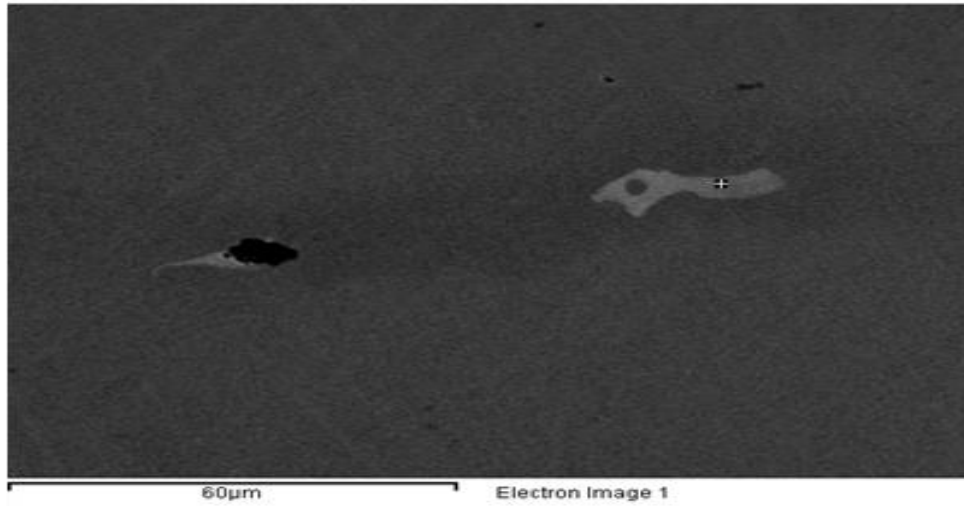
Πίνακας 4.1 Σημειακή χημική ανάλυση φάσης TCP (σημείο σταυρού Εικόνας 4.4).



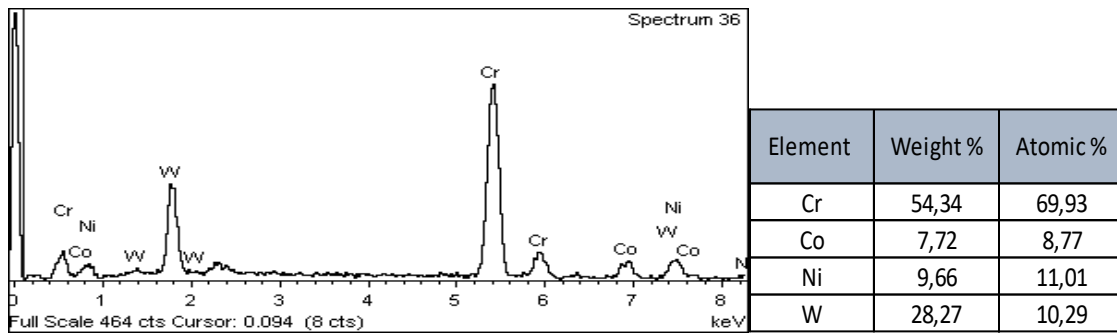
Εικόνα 4.5 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x1000. Οι μαύρες περιοχές αποτελούν πόρους στην συγκόλληση.



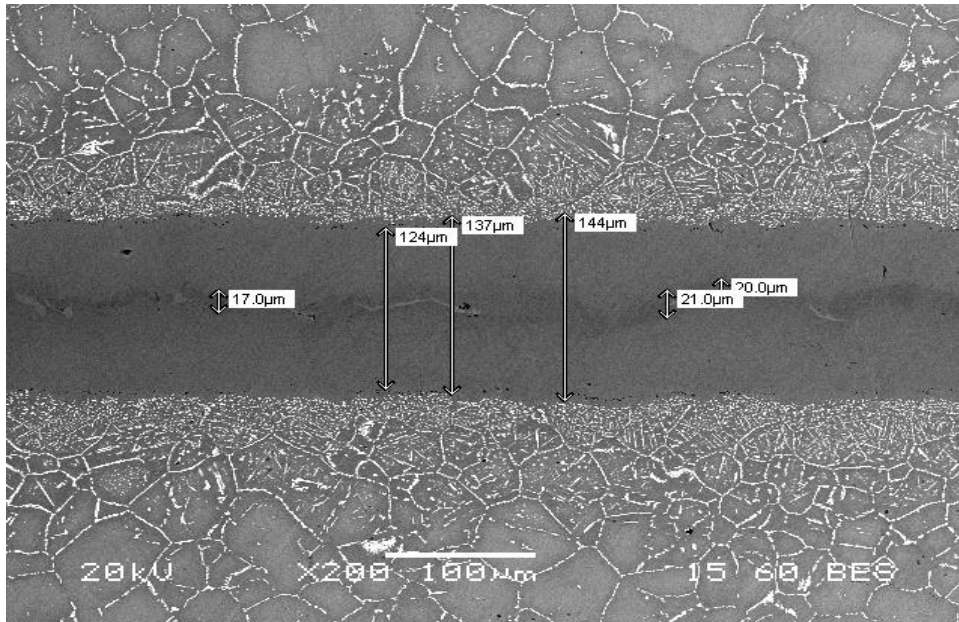
Πίνακας 4.2 Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίων MC και $M_{23}C_6$ (σημείο Εικόνας 4.5).



Εικόνα 4.6 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x1000. Το μαύρο σημείο αποτελεί πόρο της συγκόλλησης.



Πίνακας 4.3 Σημειακή χημική ανάλυση φάσης TCP (σημείο Εικόνας 4.6).



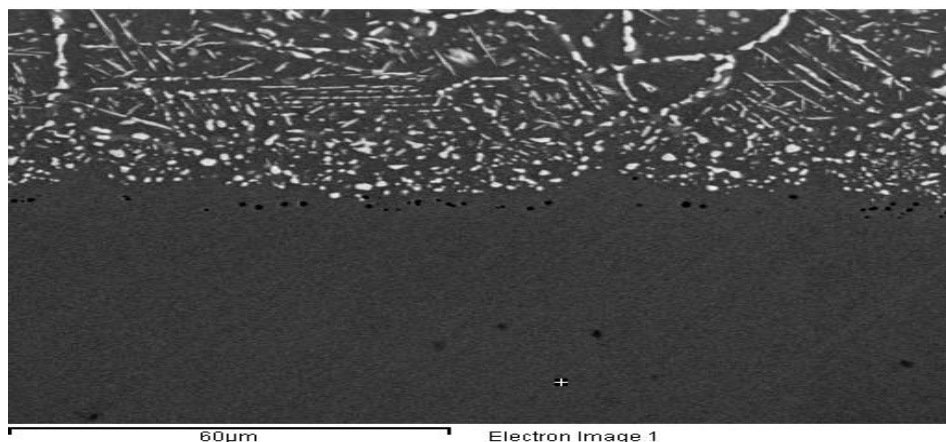
Εικόνα 4.7 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x200 όπου εμφανίζεται η απόσταση (clearance) της ζώνης συγκόλλησης.

Τα συγκολλημένα δείγματα τα οποία εξετάστηκαν δεν είχαν υποστεί περαιτέρω θερμικές κατεργασίες διαλυτοποίησης και γήρανσης. Η μελέτη της ζώνης συγκόλλησης πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ότι αποτελεί ένα ξεχωριστό θερμοδυναμικό σύστημα συγκριτικά με τις υπόλοιπες ζώνες. Στη ζώνη συγκόλλησης, η κινητική της στερεοποίησης είναι αυτή που καθορίζει την διακύμανση της χημικής σύστασης, όσον αφορά τις δενδριτικές και διαδενδριτικές περιοχές, όπως, επίσης και την ακολουθία των μετασχηματισμών φάσεων και την διαμόρφωση μηχανικών ιδιοτήτων όπως μικροσκληρότητα, όριο διαρροής, όριο θραύσης κλπ. Από μεταλλογραφικής άποψης, στη ζώνη συγκόλλησης παρατηρείται εναλλαγή δύο περιοχών ,μία γκρι ανοιχτό και μία πιο σκούρα, ακανόνιστου σχήματος και μεγέθους, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.3 και 4.4, που έχουν διεύθυνση παράλληλη στην ζώνη της συγκόλλησης. Η σκούρα περιοχή της ζώνης συγκόλλησης περιέχει μεγάλα ποσοστά Ni, το οποίο σταθεροποιεί την γ φάση. Στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης εμφανίζεται λεπτομερής μικροδομή. Σύμφωνα με τις στοιχειακές αναλύσεις που συντελέστηκαν στην ζώνη συγκόλλησης, παρατηρούμε ότι δεν υφίσταται γ' φάση λόγω της απουσίας των στοιχείων Al

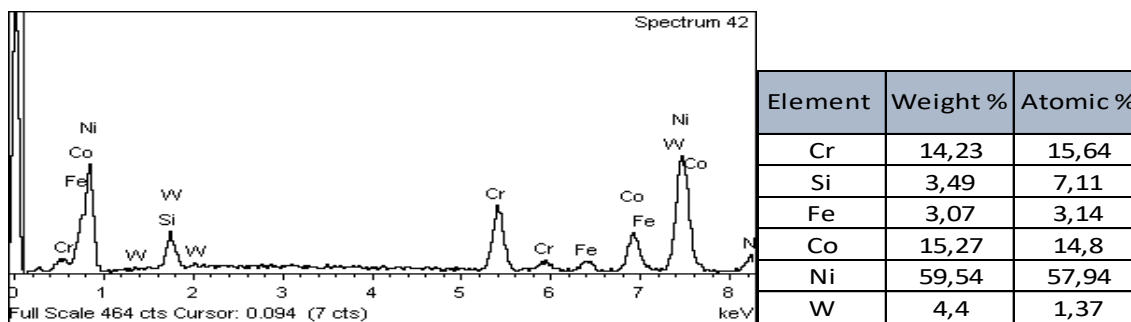
και Ti. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr και W υποδηλώνει την ύπαρξη TCP φάσεων. Παράλληλα, παρατηρούνται κατά σημεία της ζώνης συγκόλλησης κατακρημνισμένα καρβίδια τύπου $M_{23}C_6$ (Εικόνα 4.5), πλούσια σε χρώμιο και βολφράμιο όπως προσδιορίζεται από τις χημικές αναλύσεις. Τα καρβίδια αυτά προσδίδουν στο υλικό υψηλή αντοχή. Ο σχηματισμός καρβιδίου M_6C είναι ανέφικτος καθώς δεν υπάρχει στην ζώνη συγκόλλησης επαρκές ποσοστό μολυβδαινίου $Mo > 6\%$ για τον σχηματισμό του. Τα έντονα μαύρα σημεία που παρατηρούνται κατά μήκος της ζώνης συγκόλλησης υποδηλώνουν περιοχές πορώδους. Βγάζοντας τον μέσο όρο για τις αποστάσεις (clearance) των ζωνών (Εικόνα 4.7), καταλήγουμε ότι το μέσο πάχος της ζώνης συγκόλλησης είναι στα $140.5\mu m$ και της ζώνης diffusion στα $8.25\mu m$.

Β. Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη

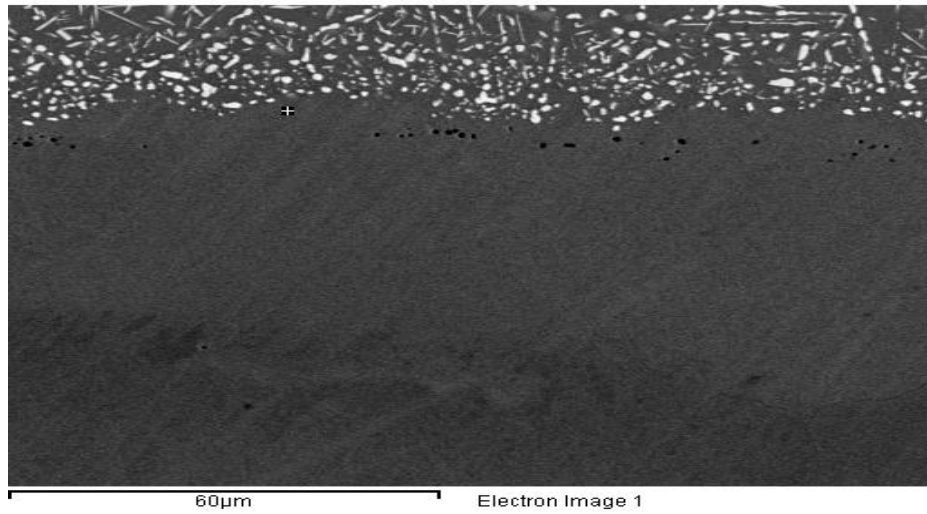
Οι επόμενες εικόνες αφορούν στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης.



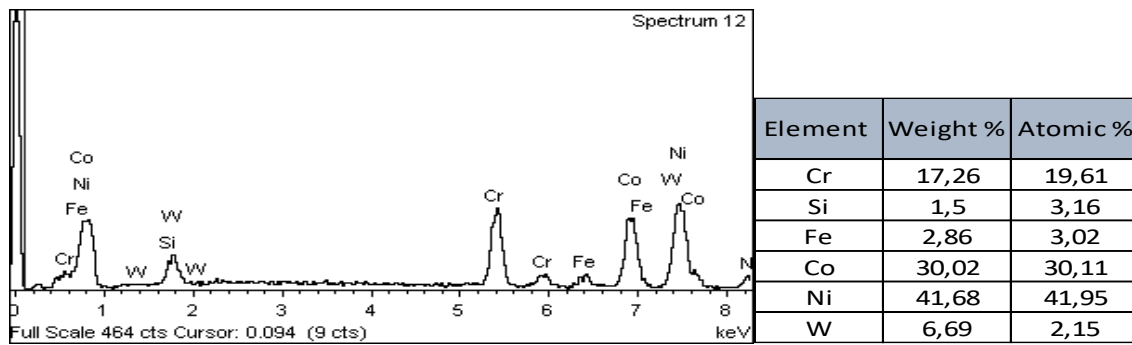
Εικόνα 4.8 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης.



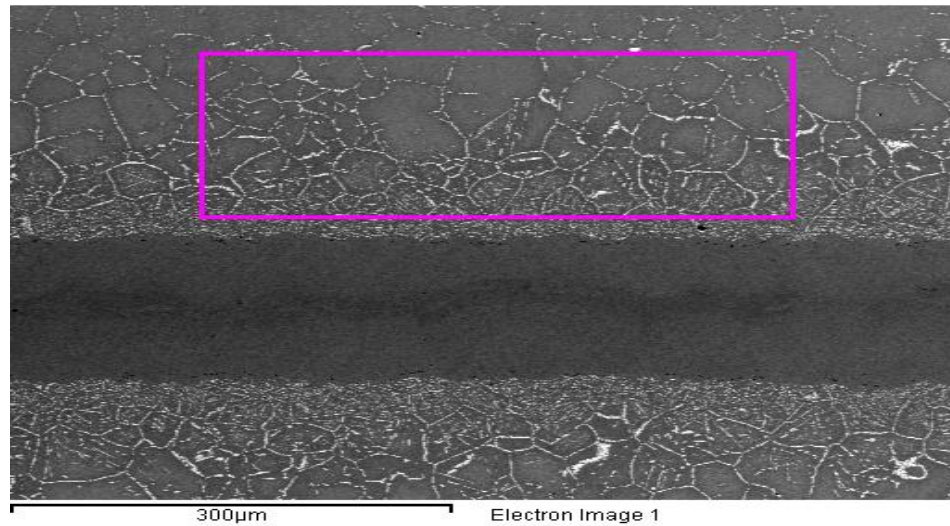
Πίνακας 4.4 Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (σημείο Εικόνας 4.7).



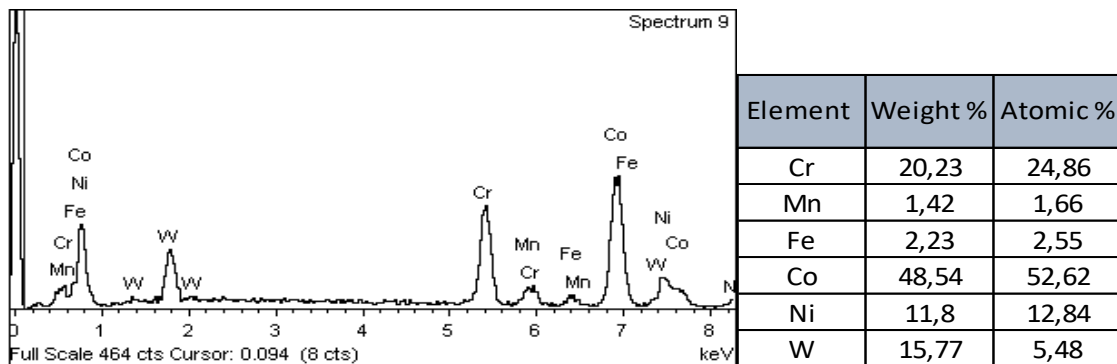
Εικόνα 4.9 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής στην διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ και ΖΣ (κάτω).



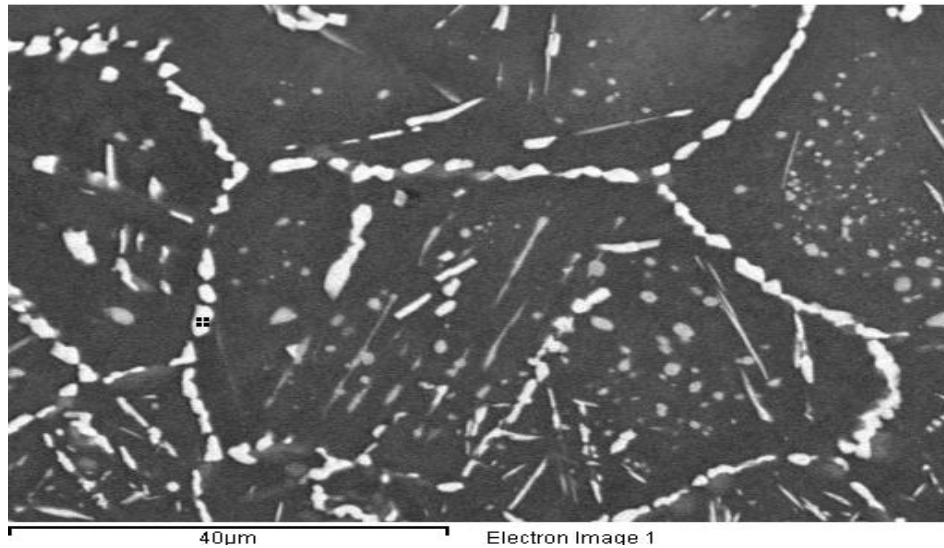
Πίνακας 4.5 Σημειακή χημική ανάλυση διεπιφάνειας μεταξύ ΘΕΖ και ΖΣ (σημείο Εικόνας 4.8).



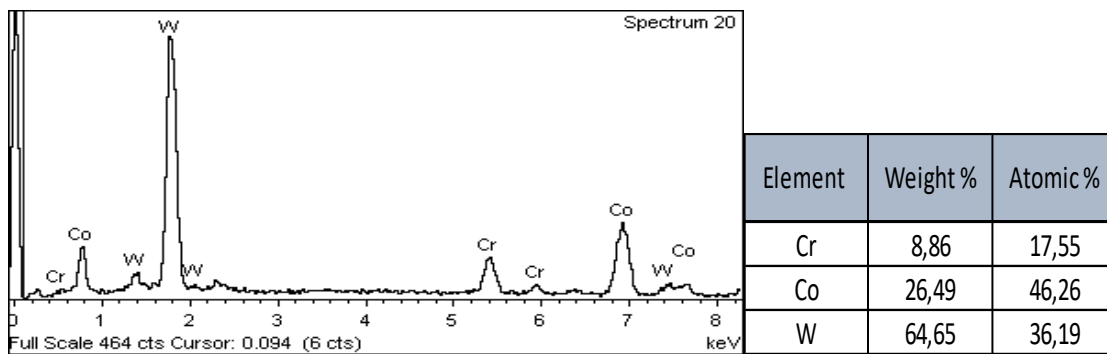
Εικόνα 4.10 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x200 της μικροδομής της ΘΕΖ- ζώνης diffusion.



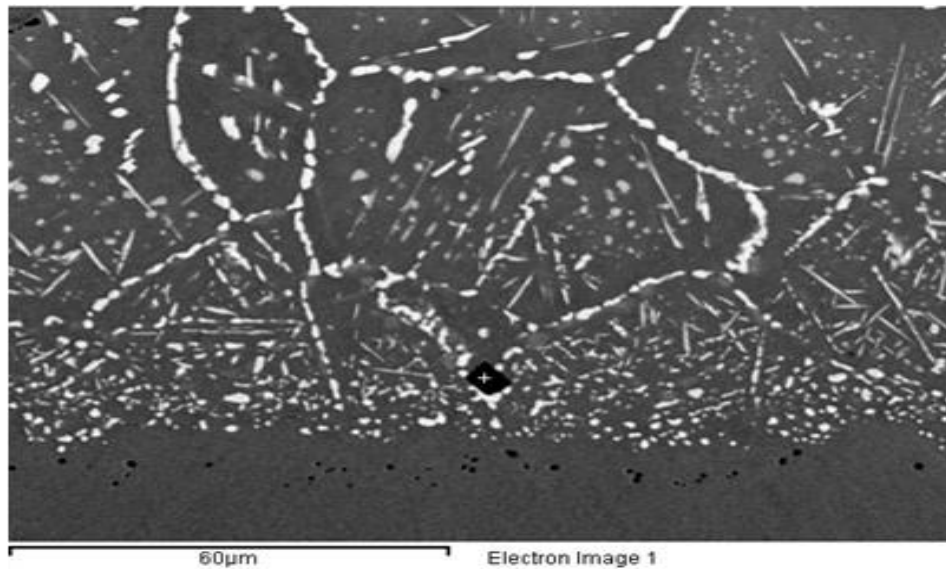
Πίνακας 4.6 Γενικευμένη χημική ανάλυση στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



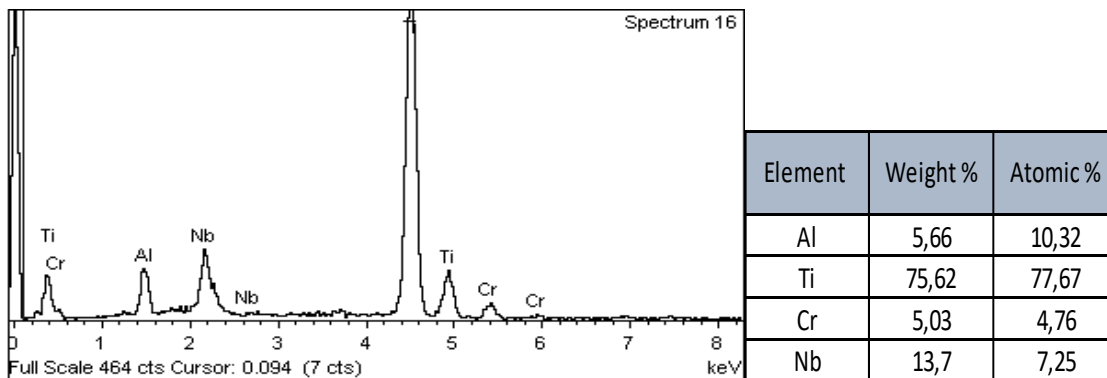
Εικόνα 4.11 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1500 της μικροδομής της ΘΕΖ.



Πίνακας 4.7 Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίων στα όρια των κόκκων (Εικόνα 4.11)



Εικόνα 4.12 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x1000 της μικροδομής της ΘΕΖ.



Πίνακας 4.8 Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίου MC του τιτανίου (Εικόνα 4.12).

Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη αποτελεί το δεύτερο θερμοδυναμικό σύστημα, το οποίο διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό απ' αυτό της ζώνης συγκόλλησης, καθώς η ακολουθία των μετασχηματισμών φάσεων, αλλά και η κινητική των αντιδράσεων διαφοροποιούνται. Από την μεταλλογραφική ανασκόπηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, παρατηρούμε ότι αποτελείται από μεγεθυμένους και ανομοιομόρφους κόκκους. Όσο απομακρυνόμαστε από την ζώνη συγκόλλησης προς την θερμικά επηρεασμένη ζώνη, η χημική σύσταση μεταβάλλεται ώστε να πλησιάζει την χημική σύσταση του μετάλλου βάσης. Έτσι, στην διεπιφάνεια μεταξύ της ΖΣ και της ΘΕΖ, από την πλευρά της ΖΣ, παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση του Co

καθώς και αύξηση της περιεκτικότητας των στοιχείων Cr και W, ενώ σημειώνεται μείωση του ποσοστού Ni.

Μεταβαίνοντας στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη γίνεται αναγνώριση της ύπαρξης ζώνης διάχυσης (diffusion). Στην ζώνη διάχυσης παρατηρείται ότι τα όρια των κόκκων του μετάλλου βάσης είναι πιο ευδιάκριτα. Περικρυσταλλικά των κόκκων βρίσκονται καρβίδια M_6C , πλούσια σε βολφράμιο όπως φαίνεται και από τις στοιχειακές αναλύσεις, τα οποία σε μερικά σημεία εμφανίζονται ως zipperlike. Ταυτόχρονα, καρβίδια M_6C αναγνωρίζονται και διάσπαρτα μέσα στους κόκκους με σφαιρικό ή βελονοειδές σχήμα. Τα καρβίδια $M_{23}C_6$ ίσως δημιουργήθηκαν από την αποσύνθεση των καρβιδίων MC και M_6C κατά τη διαδικασία. Καρβίδια MC αναγνωρίζονται διάσπαρτα μέσα στη ΘΕΖ κοντά σε όρια κόκκων. Τα λευκής απόχρωσης σωματίδια-καρβίδια γίνονται ιδιαίτερα ευδιάκριτα στις Εικόνες 4.10 και 4.11, και παρατηρούνται πιο λεπτομερή στην αρχή της ζώνης διάχυσης. Τέλος, παρατηρείται η σημειακή ύπαρξη καρβιδίου τύπου MC του Ti (Εικόνα 4.11), το οποίο βρίσκεται στα όρια των κόκκων. Η αναγνώρισή του εμφανή από την παρουσία πολύ μεγάλου ποσοστού Ti, καθώς και την ύπαρξη Al και Nb. Ο σχηματισμός γ' φάσης είναι ανέφικτος λόγω της απουσίας Ni.

4.1.3. ΔΟΚΙΜΙΟ 2-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4779

A. Ζώνη Συγκόλλησης

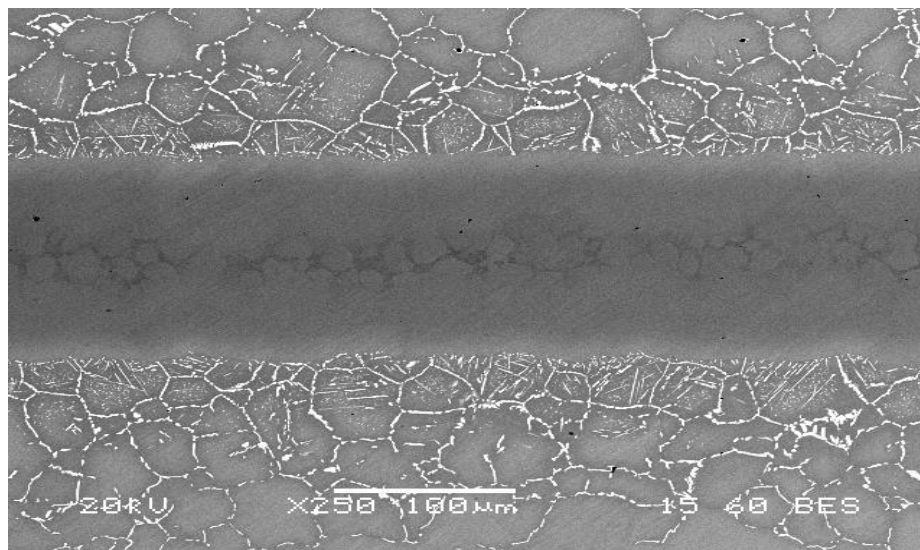
Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες, από την ζώνη συγκόλλησης του δεύτερου δοκιμίου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο προσθήκης το μέταλλο πλήρωσης αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4779.

Από την μεταλλογραφική εξέταση της ζώνης συγκόλλησης για το συγκολλημένο δοκίμιο με μέταλλο προσθήκης AMS 4779, παρατηρήθηκε η χαρακτηριστική δομή της ζώνης συγκόλλησης. Παρατηρούνται πολυάριθμοι χονδρόκοκοι κόκκοι ακανόνιστου σχήματος στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης, με διεύθυνση παράλληλη προς την γραμμή συγκόλλησης (Εικόνα 4.13 και 4.14), ενώ στην υπόλοιπη περιοχή της ζώνης συγκόλλησης παρατηρείται λεπτομερής μικροδομή. Οι κόκκοι είναι πιο ευδιάκριτοι σε σχέση με το προηγούμενο δοκίμιο και υφίσταται και πάλι εναλλαγή φάσεων στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης.

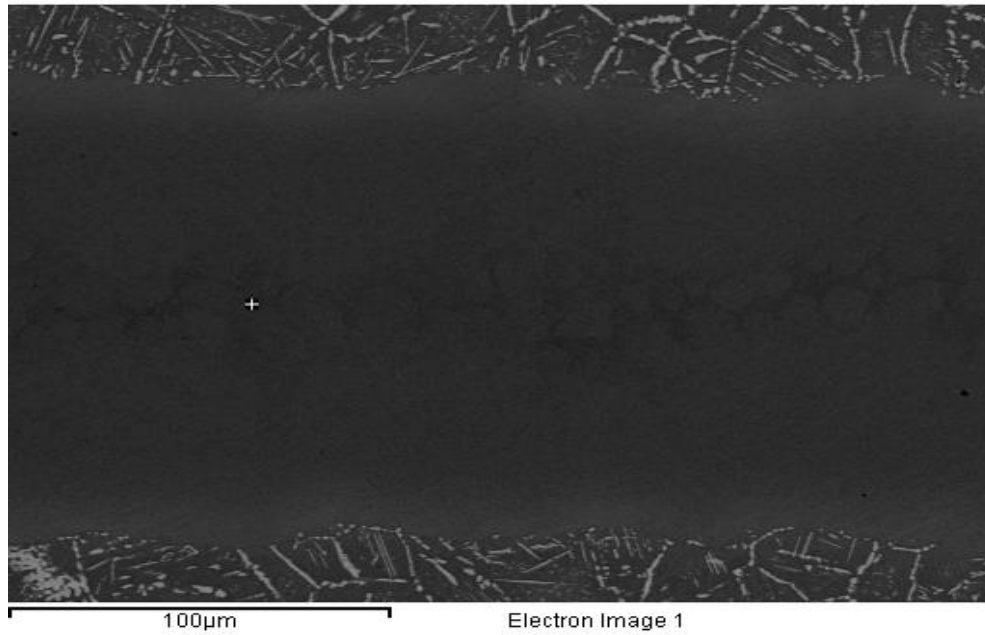
Η περιοχή της συγκόλλησης περιέχει μεγάλα ποσοστά Ni, όπου σε ορισμένα σημεία αγγίζουν το 100%, το οποίο σταθεροποιεί την γ φάση. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε Ni συνδυασμένη σε

ορισμένα σημεία με μικρά ποσοστά Si κάνει εμφανή την ύπαρξη στερεού διαλύματος αντικατάστασης. Κατά την απομάκρυνση από το κέντρο της ζώνης συγκόλλησης παρατηρούμε την σταδιακή αύξηση των στοιχείων Cr, Co και Fe και την μείωση του ποσοστού Si και Ni (ανεπαίσθητα). Σύμφωνα με τις στοιχειακές αναλύσεις που συντελέστηκαν στην ζώνη συγκόλλησης, παρατηρούμε ότι δεν υφίσταται γ' φάση λόγω της απουσίας των στοιχείων Al και Ti.. Παρόλα αυτά, παρατηρείται η σημειακή ύπαρξη οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3 , όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.16. Ο σχηματισμός του οξειδίου συντελέστηκε μέσα σε έναν από τους πόρους που εμφανίζονται κατά περιοχές στην ζώνη συγκόλλησης και σημειακά περιλαμβάνει και μικρά ποσοστά Si (Εικόνα 4.15). Επίσης, δεν παρατηρείται η ύπαρξη καρβιδίων στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης λόγω της απουσίας στοιχείων που ευνοούν τον σχηματισμό τους.

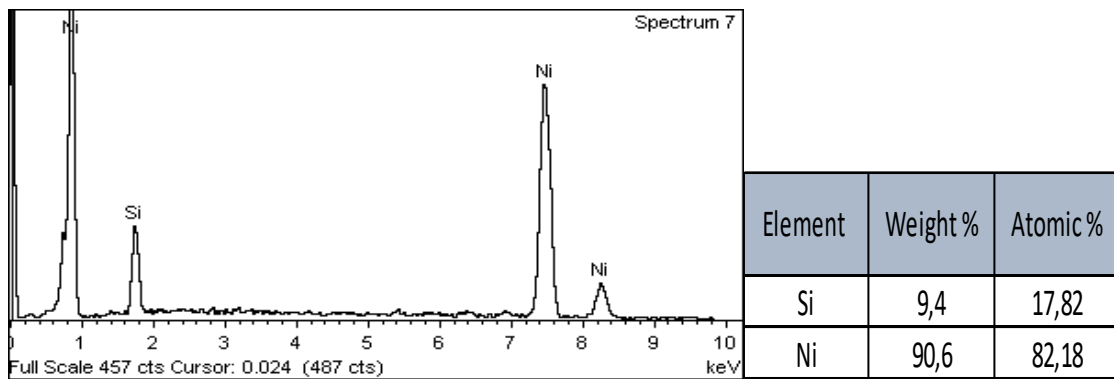
Η Εικόνα 4.18 απεικονίζει το πάχος των ζωνών συγκόλλησης και συγκόλλησης όπως υπολογίστηκαν μέσω του SEM. Βγάζοντας τον μέσο όρο για τις αποστάσεις (clearance) των ζωνών καταλήγουμε ότι το μέσο πλάτος της ζώνης συγκόλλησης εκτιμάται στα 146.7 μm και της περιοχής diffusion στα 10.5 μm .



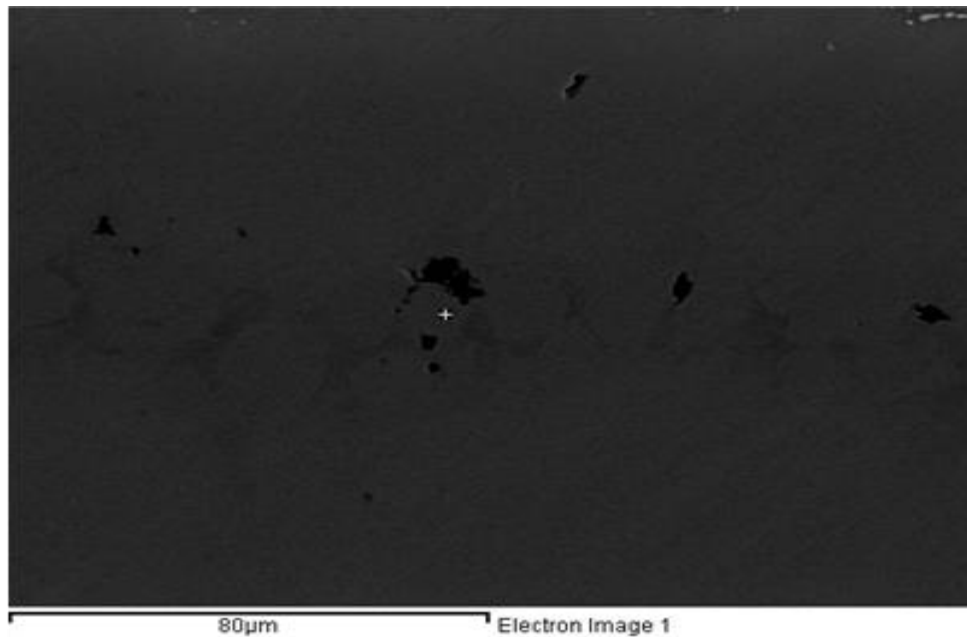
Εικόνα 4.13 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x250 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



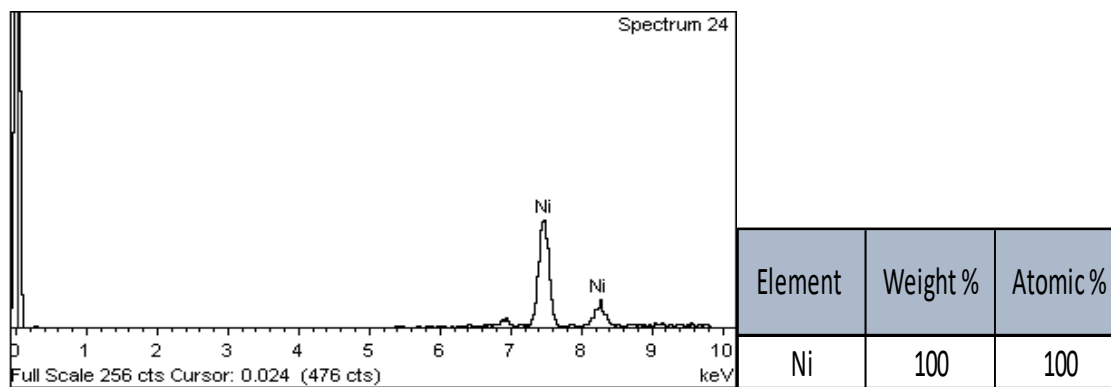
Εικόνα 4.14 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



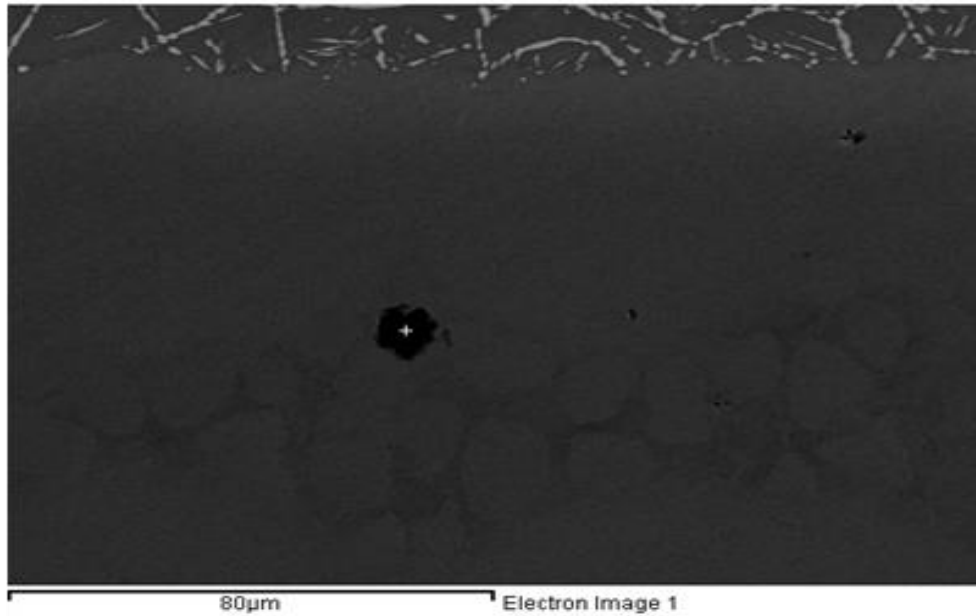
Πίνακας 4.9 Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.14).



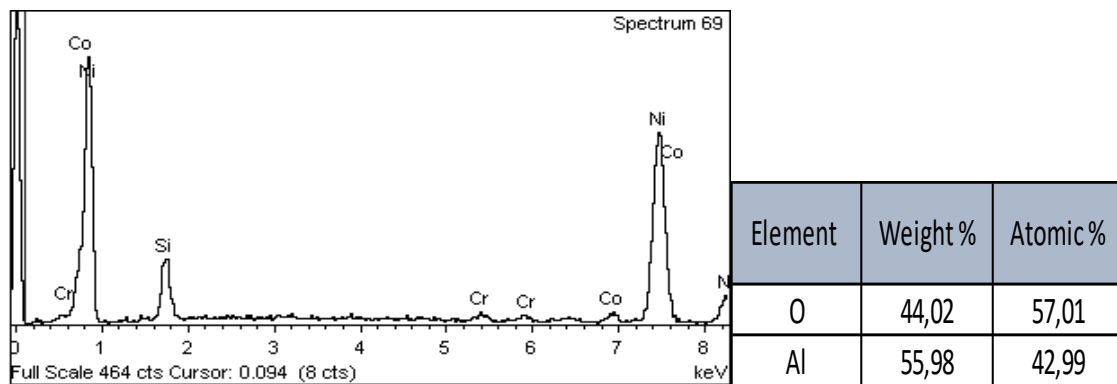
Εικόνα 4.15 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



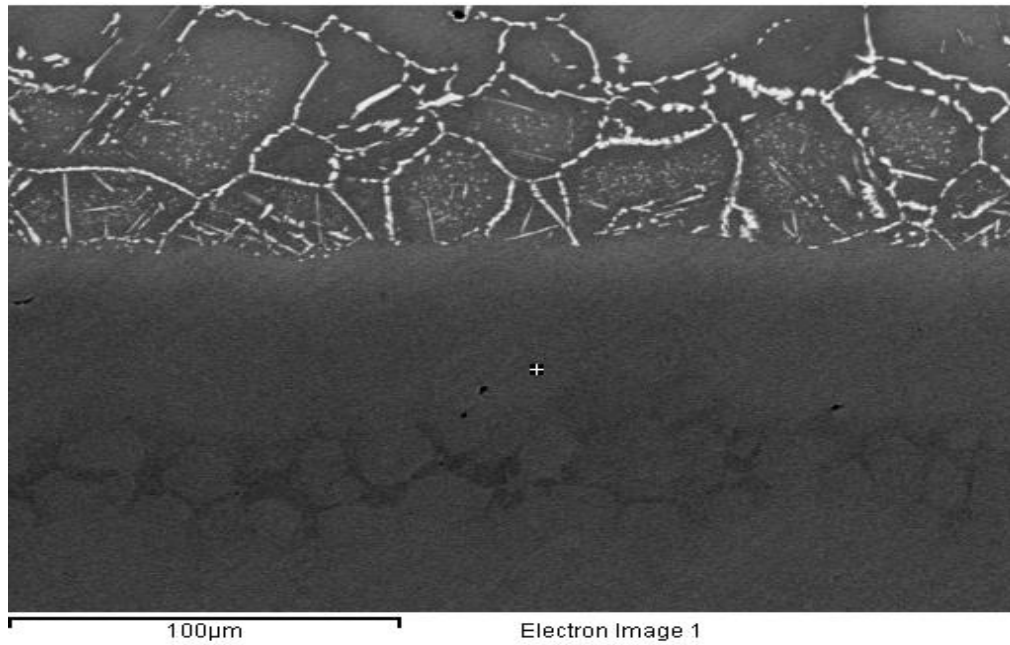
Πίνακας 4.10 Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.15).



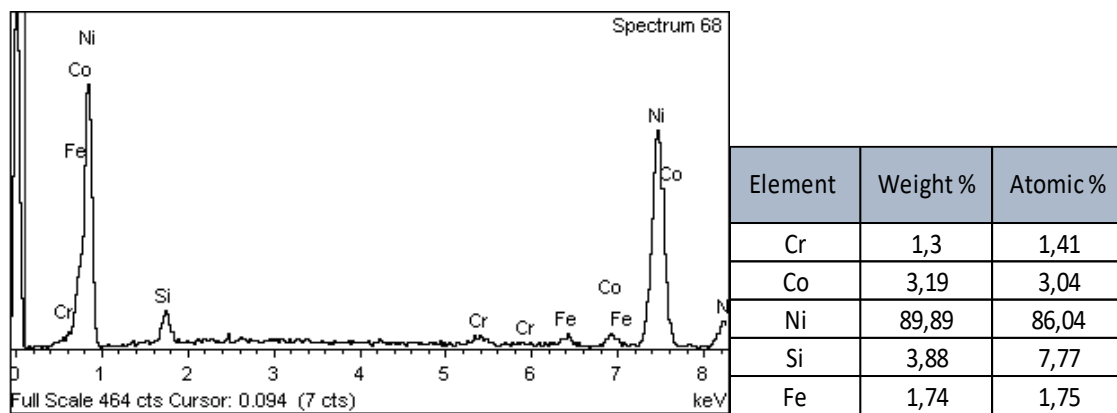
Εικόνα 4.16 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



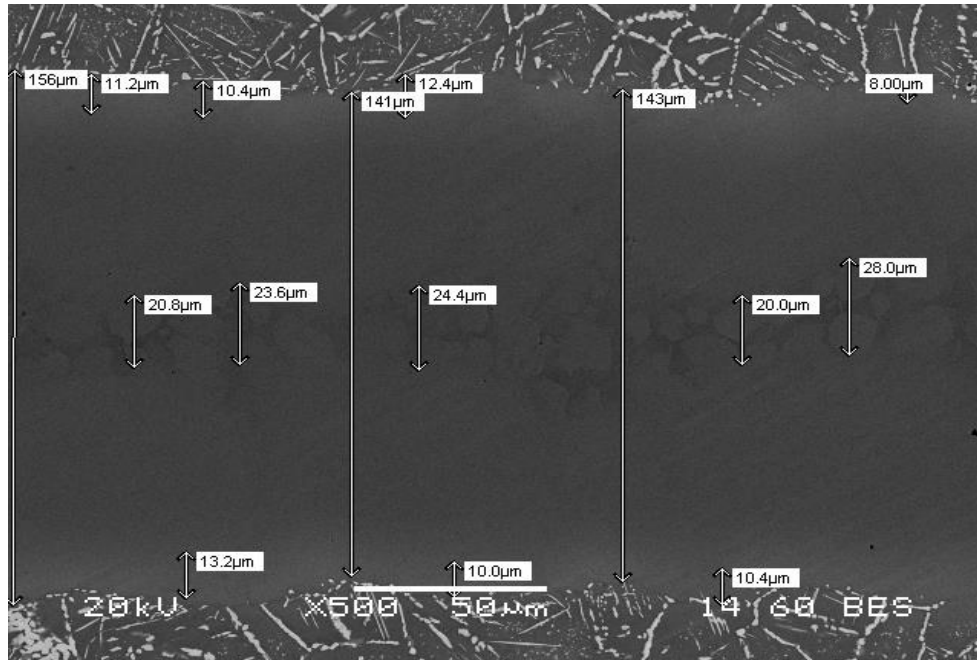
Πίνακας 4.11 Σημειακή χημική ανάλυση οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3 (Εικόνα 4.16).



Εικόνα 4.17 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



Πίνακας 4.12 Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.17).



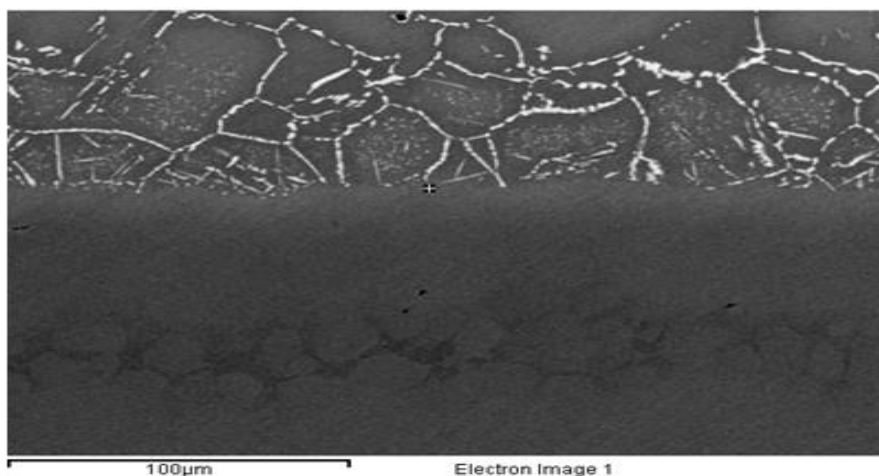
Εικόνα 4.18 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης BES x250 όπου εμφανίζεται η απόσταση (clearance) της ζώνης συγκόλλησης.

B. Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη

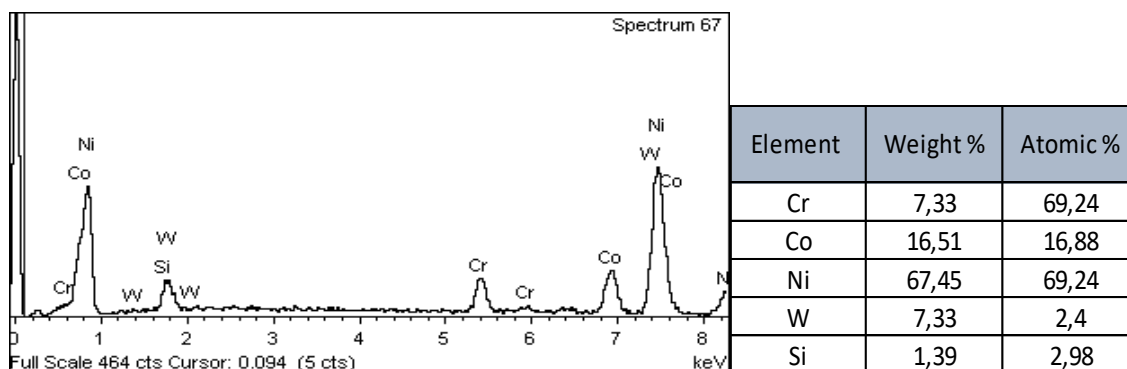
Οι επόμενες εικόνες αφορούν στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης.

Από την μεταλλογραφική ανασκόπηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, παρατηρούμε ότι αποτελείται από μεγεθυμένους και ανομοιομορφους κόκκους του μητρικού υλικού. Όσο απομακρυνόμαστε από την ζώνη συγκόλλησης προς την θερμικά επηρεασμένη ζώνη, η χημική σύσταση μεταβάλλεται ώστε να πλησιάζει την χημική σύσταση του μετάλλου βάσης. Έτσι, στην διεπιφάνεια μεταξύ της ΖΣ και της ΘΕΖ, από την πλευρά της ΖΣ, παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση του ποσοστού Co καθώς και αύξηση της περιεκτικότητας των στοιχείων Cr και W, ενώ σημειώνεται μείωση του ποσοστού Ni, παραμένοντας παρόλα αυτά σε μεγαλύτερο ποσοστό από όλα τα υπόλοιπα στοιχεία (balance). Περνώντας το διαμεταλλικό στρώμα και μεταβαίνοντας στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη γίνεται αναγνώριση της ύπαρξης ζώνης διάχυσης (diffusion) (Εικόνα 4.19). Στην ζώνη διάχυσης παρατηρείται ότι τα όρια των κόκκων του μετάλλου βάσης είναι πιο ευδιάκριτα (Εικόνα 4.20). Σημειώνεται η ύπαρξη λευκής απόχρωσης σωματιδίων στα όρια των κόκκων αλλά και στο εσωτερικό τους, που

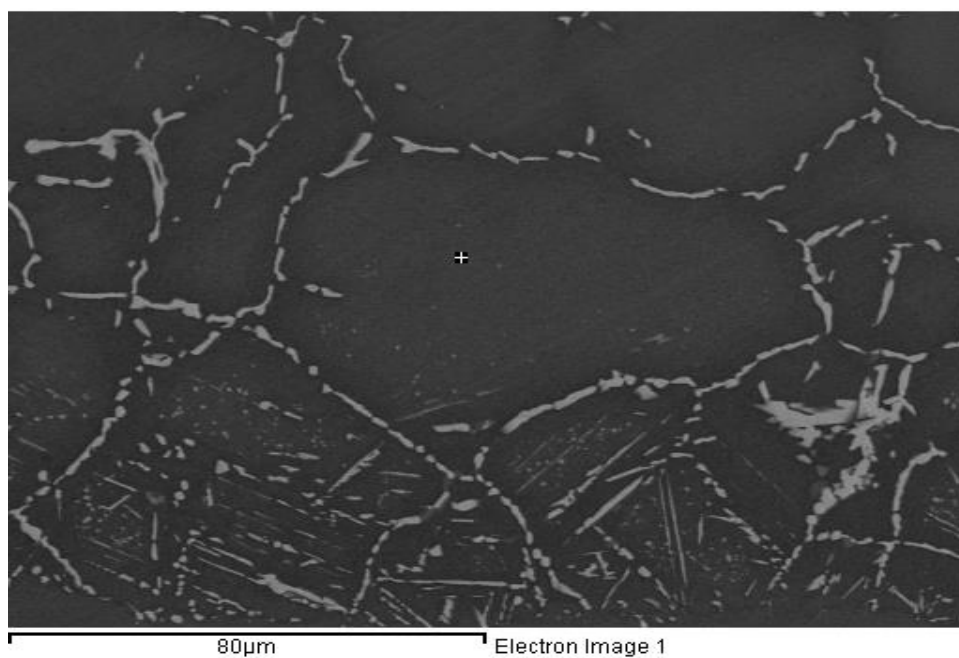
γίνεται ιδιαίτερα ευδιάκριτη στην Εικόνα 4.21. Τα λευκά σωματίδια αποτελούν κατακρημνισμένα καρβίδια τύπου M_6C και $M_{23}C_6$ πλούσια σε βολφράμιο W. Τα καρβίδια M_6C εντοπίζονται κυρίως ενδοκρυσταλλικά, όπως φαίνεται και από τις στοιχειακές αναλύσεις ,διάσπαρτα μέσα στους κόκκους με σφαιρικό ή βελονοειδές σχήμα. Στα όρια των κόκκων σε μορφή zipper like αναγνωρίζονται καρβίδια τύπου $M_{23}C_6$ πλούσια σε βολφράμιο και χρώμιο που πιθανός να έχουν προέλθει από την κατακρήμνιση καρβιδίων MC και M_6C . Περικρυσταλλικά των κόκκων παρατηρείται η ύπαρξη και καρβιδίων τύπου M_6C πάλι υπό μορφή zipper like. Στην αρχή της ζώνης διάχυσης, τα καρβίδια ενδοκρυσταλλικά εμφανίζουν εντονότερα βελονοειδές σχήμα.



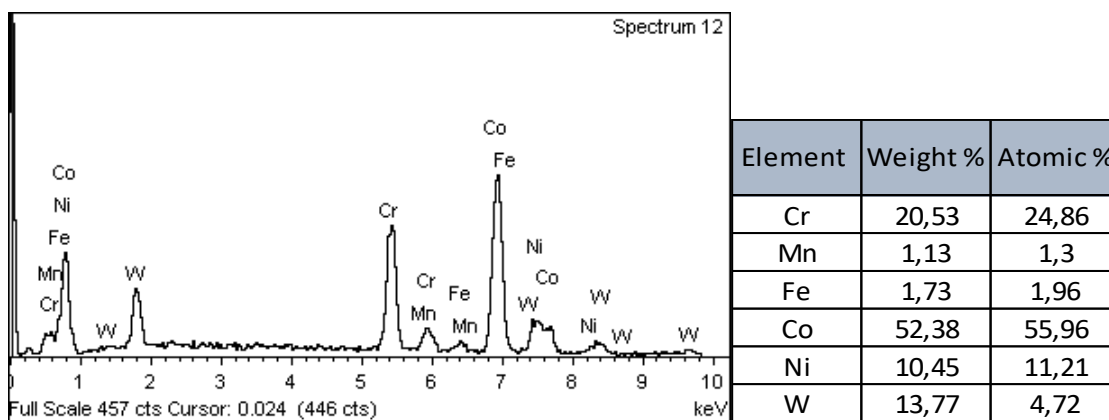
Εικόνα 4.19 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής στην διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ και ΖΣ (κάτω).



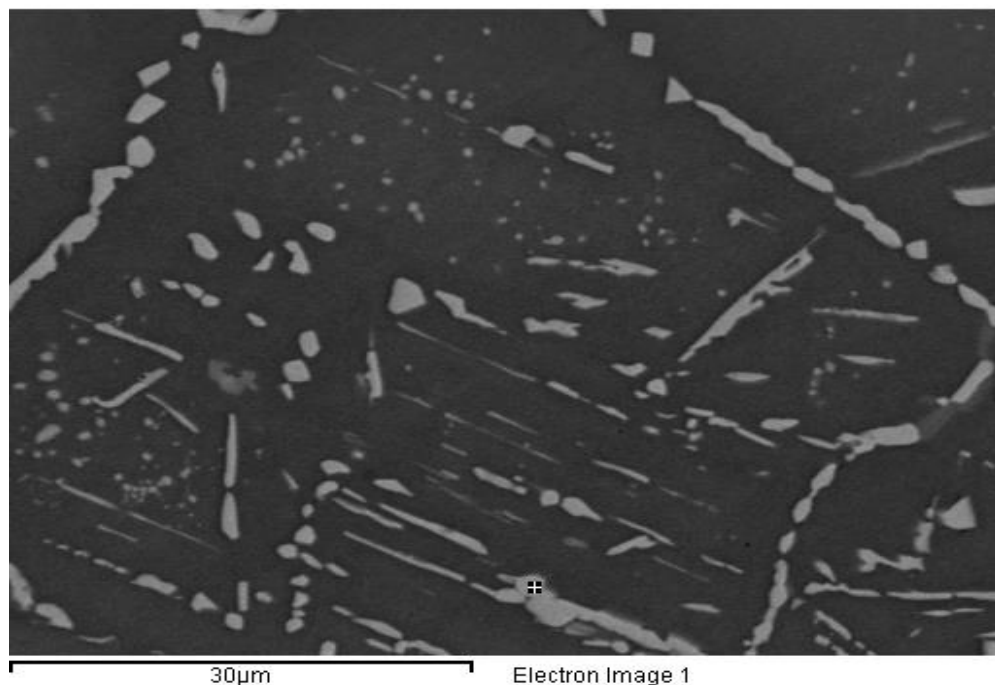
Πίνακας 4.13 Σημειακή χημική ανάλυση σε σημείο διεπιφάνειας μεταξύ ΘΕΖ και ΖΣ (Εικόνα 4.19)



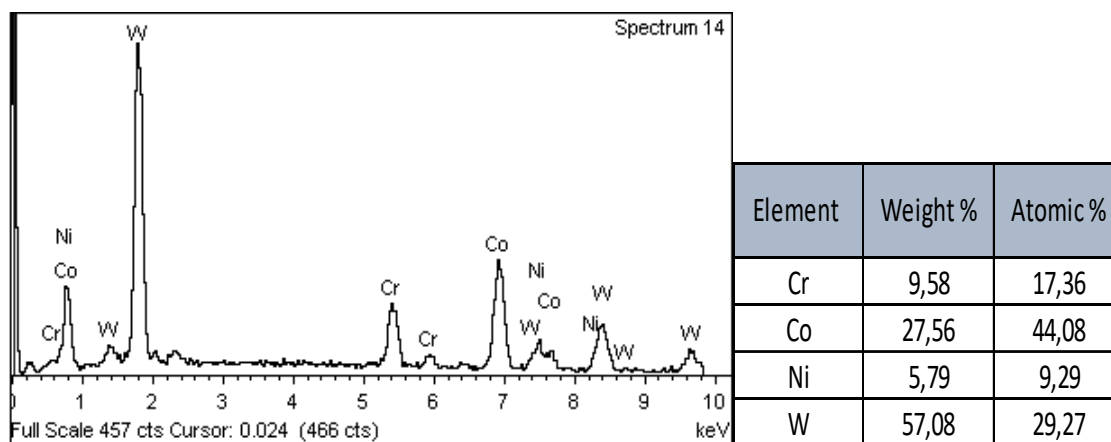
Εικόνα 4.20 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x800 της μικροδομής της ΘΕΖ.



Πίνακας 4.14 Σημειακή χημική ανάλυση σε ενδοκρυσταλλικό σημείο κόκκου του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.20)



Εικόνα 4.21 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x2000 της μικροδομής της ΘΕΖ. Τα λευκά σωματίδια αποτελούν καρβίδια που έχουν σχηματιστεί περικρυσταλλικά και ενδοκρυσταλλικά των κόκκων.

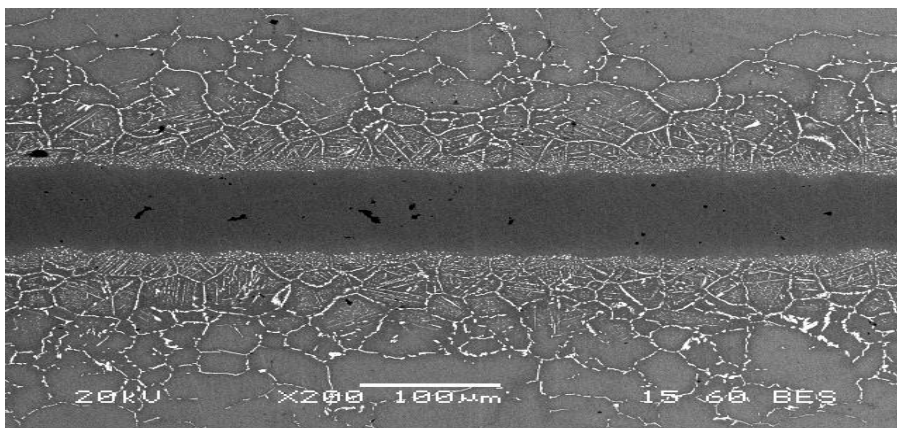


Πίνακας 4.15 Σημειακή χημική ανάλυση καρβιδίων ενδοκρυσταλλικά των κόκκου του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.21)

4.1.4. ΔΟΚΙΜΙΟ 3-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ BNi-9

A. Ζώνη Συγκόλλησης

Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες, από την ζώνη συγκόλλησης του τρίτου δοκιμίου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο προσθήκης το μέταλλο πλήρωσης αεροπορικής προδιαγραφής BNi-9.



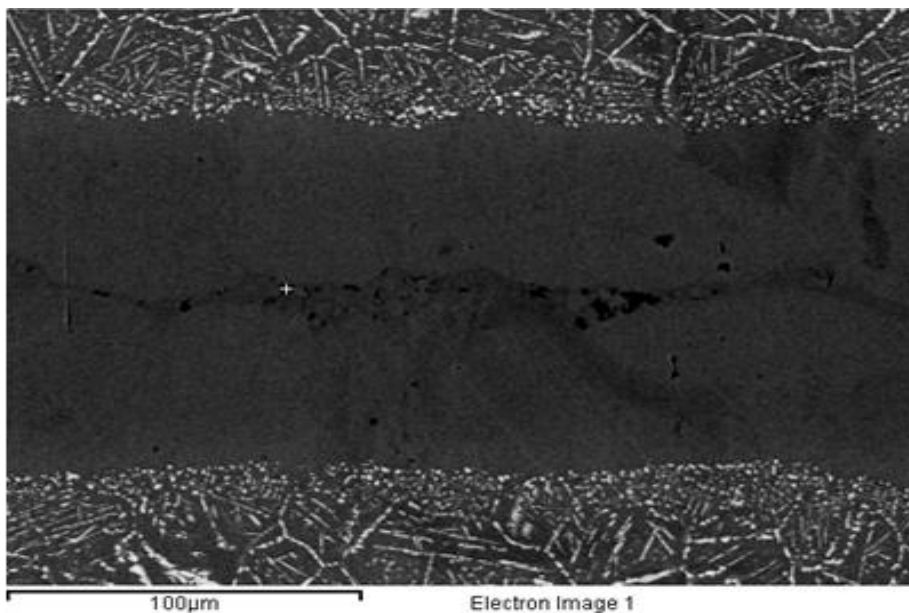
Εικόνα 4.22 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x200 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.

Από την μεταλλογραφική εξέταση της ζώνης συγκόλλησης για το συγκολλημένο δοκίμιο με μέταλλο προσθήκης BNi-9, παρατηρήθηκε η χαρακτηριστική δομή της ζώνης συγκόλλησης. Παρατηρούνται χονδρόκοκκοι κόκκοι δύο φάσεων, ακανόνιστου μεγέθους και σχήματος στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης, με διεύθυνση παράλληλη προς την γραμμή συγκόλλησης (Εικόνα 4.23 και 4.25), ενώ στην υπόλοιπη περιοχή της ζώνης συγκόλλησης παρατηρείται λεπτομερής μικροδομή. Οι κόκκοι είναι λιγότερο ευδιάκριτοι σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια και υφίσταται και πάλι εναλλαγή φάσεων στο κέντρο της ζώνης συγκόλλησης. Η περιοχή της συγκόλλησης περιέχει μεγάλα ποσοστά Ni για την σταθεροποίηση της γ φάσης. Τα μεγάλα ποσοστά Ni συνδυασμένα με μικρότερα ποσοστά Cr και σημειακά Si υποδηλώνουν την ύπαρξη στερεού διαλύματος.

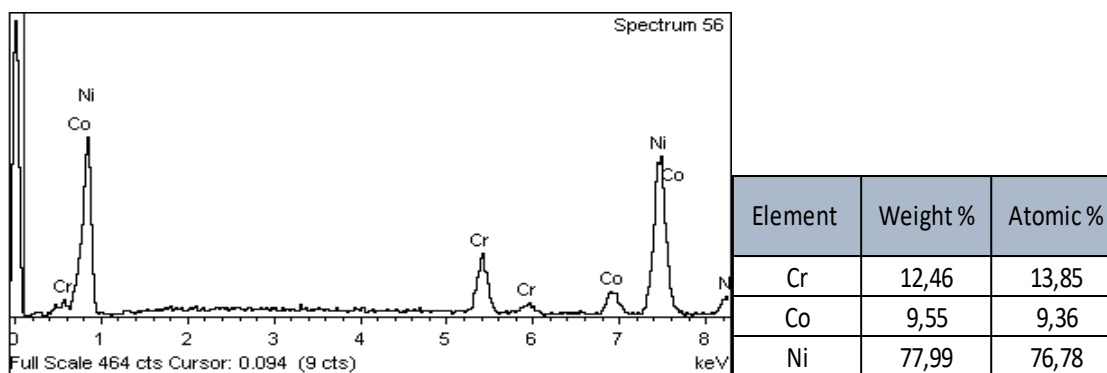
Κατά την απομάκρυνση από το κέντρο της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.24) παρατηρούμε την σταδιακή αύξηση των στοιχείων Cr και W και την μείωση του ποσοστού Si και Ni σε πολύ μικρό ποσοστό. Παρατηρείται η ύπαρξη στερεού διαλύματος αντικατάστασης. Σύμφωνα με τις στοιχειακές αναλύσεις που συντελέστηκαν στην ζώνη συγκόλλησης, παρατηρούμε ότι δεν υφίσταται γ' φάση λόγω της απουσίας των στοιχείων Al και Ti.. Επίσης, δεν παρατηρείται

η ύπαρξη καρβιδίων στην περιοχή της ζώνης συγκόλλησης λόγω της απουσίας στοιχείων που ευνοούν τον σχηματισμό τους.

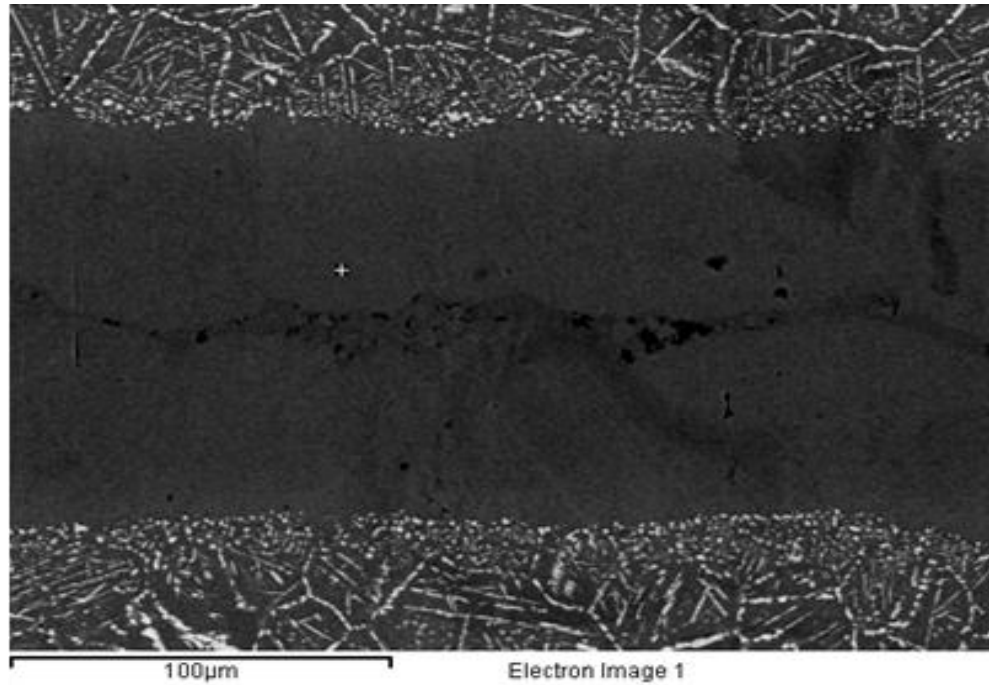
Η Εικόνα 4.26 απεικονίζει το πάχος των ζωνών συγκόλλησης και συγκόλλησης όπως υπολογίστηκαν μέσω του SEM. Βγάζοντας τον μέσο όρο για τις αποστάσεις (clearance) των ζωνών καταλήγουμε ότι το μέσο πλάτος της ζώνης συγκόλλησης εκτιμάται στα 126 μm και της περιοχής diffusion στα 10.25 μm.



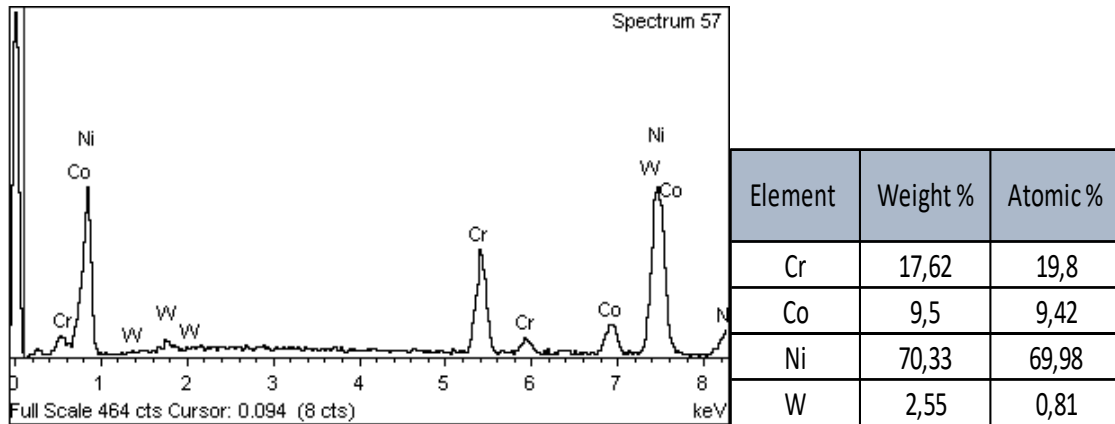
Εικόνα 4.23 Ηλεκτρονική μικρογραφία σε εικόνα BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



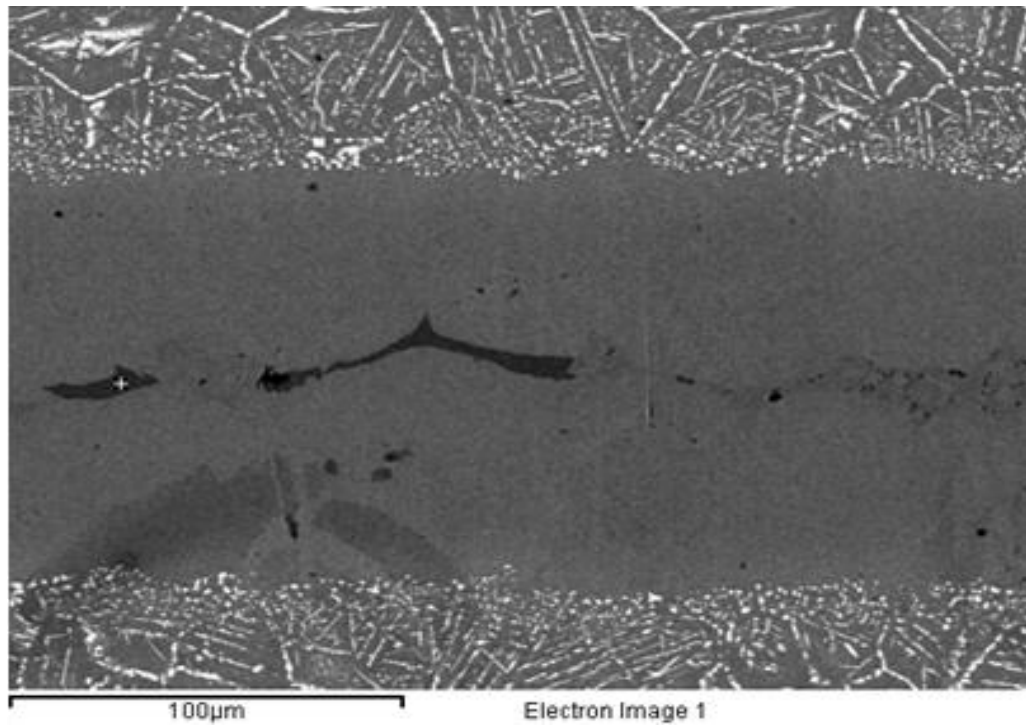
Πίνακας 4.16- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.23)



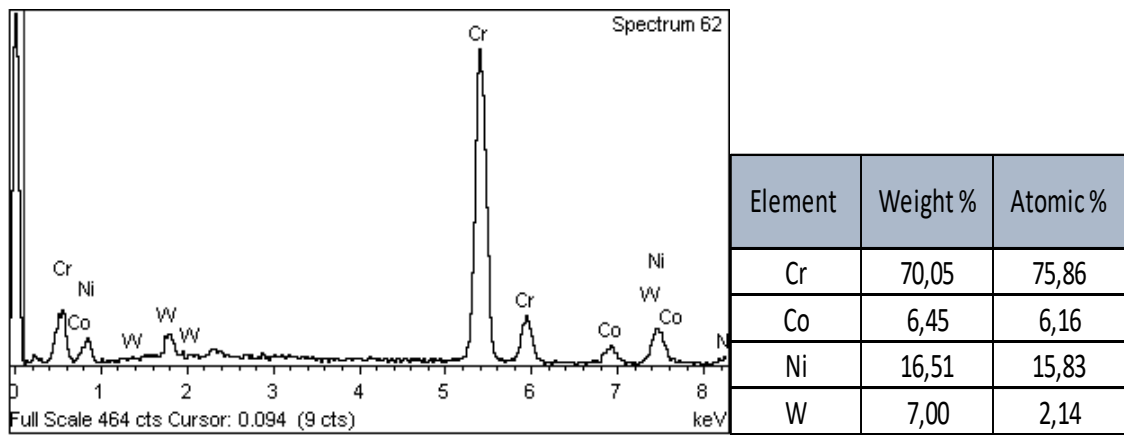
Εικόνα 4.24 Ηλεκτρονική μικρογραφία σε εικόνα BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



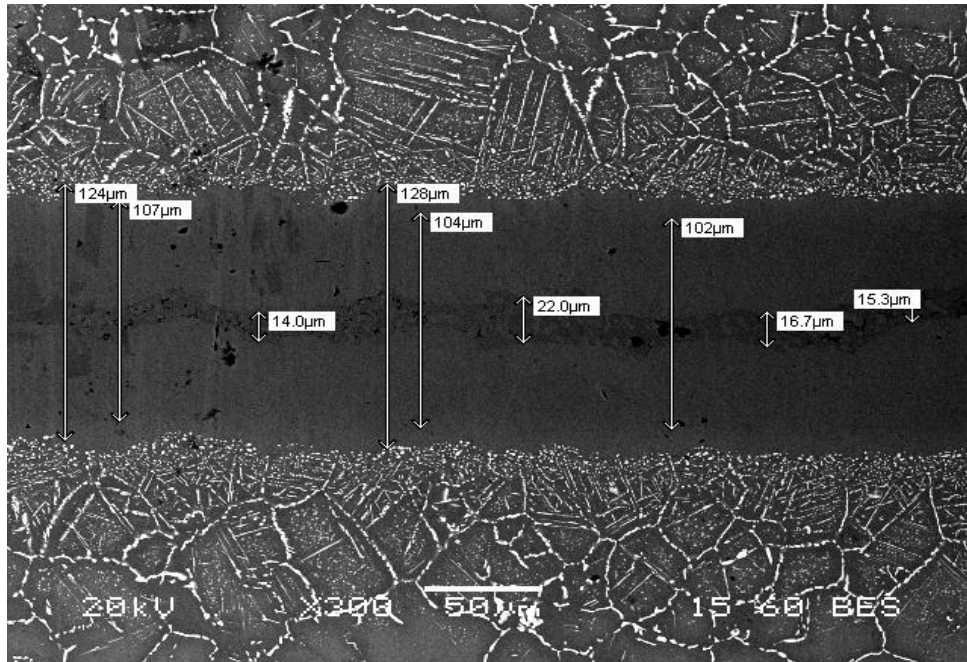
Πίνακας 4.17- Σημειακή χημική ανάλυση της ζώνης συγκόλλησης (Εικόνα 4.24)



Εικόνα 4.25 Ηλεκτρονική μικρογραφία σε εικόνα BES x500 της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης.



Πίνακας 4.18 Σημειακή χημική ανάλυση φάσης TCP (Εικόνα 4.25)



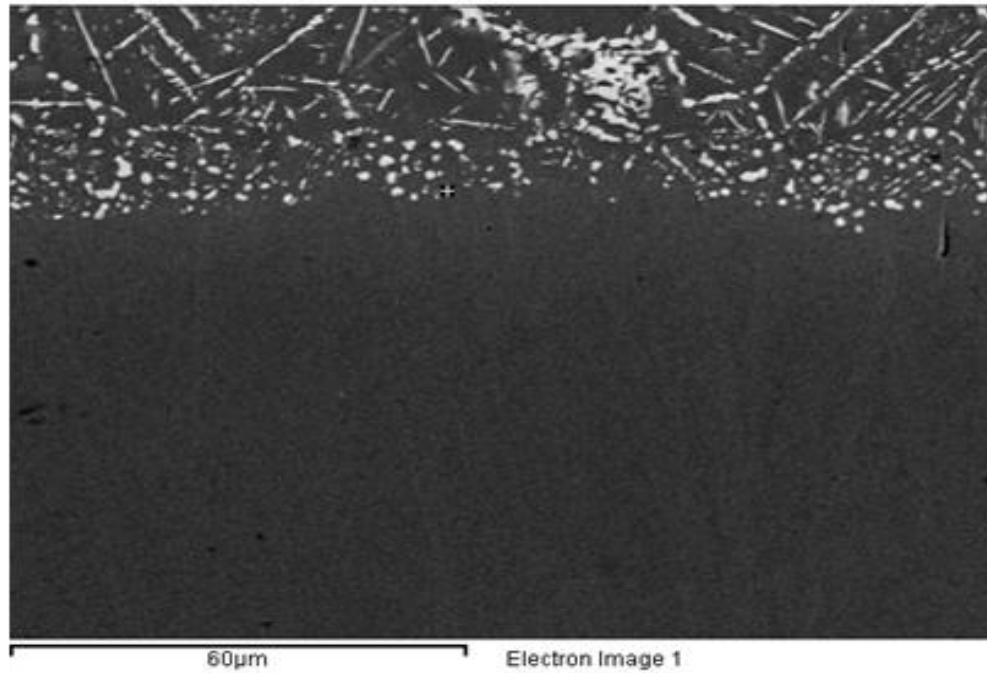
Εικόνα 4.26 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής της ζώνης συγκόλλησης σε εικόνα οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων BES x300 όπου εμφανίζεται η απόσταση (clearance) της ζώνης συγκόλλησης.

B. Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη

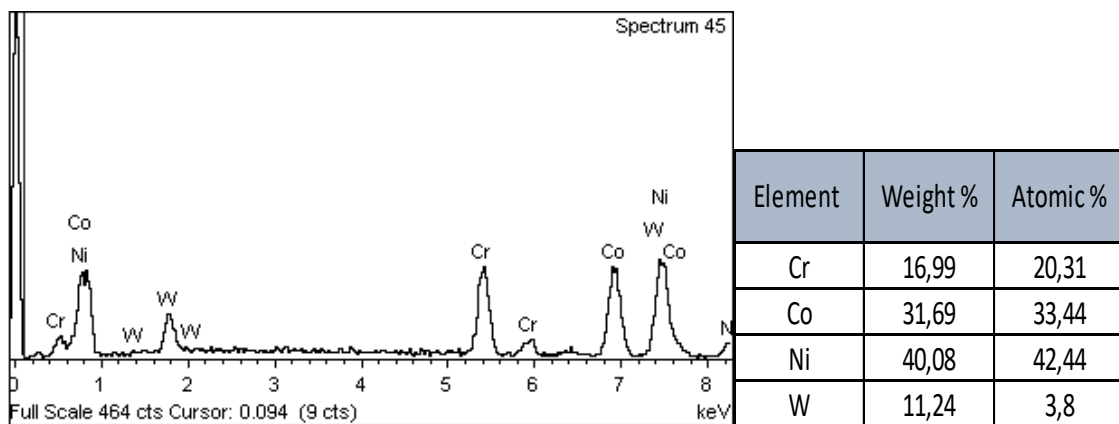
Οι επόμενες εικόνες αφορούν στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη γύρω από την περιοχή της συγκόλλησης.

Από την μεταλλογραφική ανασκόπηση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, παρατηρούμε ότι αποτελείται από μεγεθυμένους και ανομοιομορφους κόκκους του μητρικού υλικού. Όσο απομακρυνόμαστε από την ζώνη συγκόλλησης προς την θερμικά επηρεασμένη ζώνη, η χημική σύσταση μεταβάλλεται ώστε να πλησιάζει την χημική σύσταση του μετάλλου βάσης. Έτσι, στην διεπιφάνεια μεταξύ της ΖΣ και της ΘΕΖ, από την πλευρά της ΖΣ, παρατηρείται αισθητή αύξηση του ποσοστού Co καθώς και αύξηση της περιεκτικότητας των στοιχείων Cr και W>11%, ενώ σημειώνεται μείωση του ποσοστού Ni, παραμένοντας παρόλα αυτά σε μεγαλύτερο ποσοστό από όλα τα υπόλοιπα στοιχεία (balance). Περνώντας το διαμεταλλικό στρώμα και μεταβαίνοντας στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη γίνεται αναγνώριση της ύπαρξης ζώνης διάχυσης (diffusion) (Εικόνα 4.27 και 4.28). Στην ζώνη διάχυσης παρατηρείται ότι τα όρια των κόκκων του μετάλλου βάσης είναι πιο ευδιάκριτα (Εικόνα 4.28). Στο εσωτερικό των

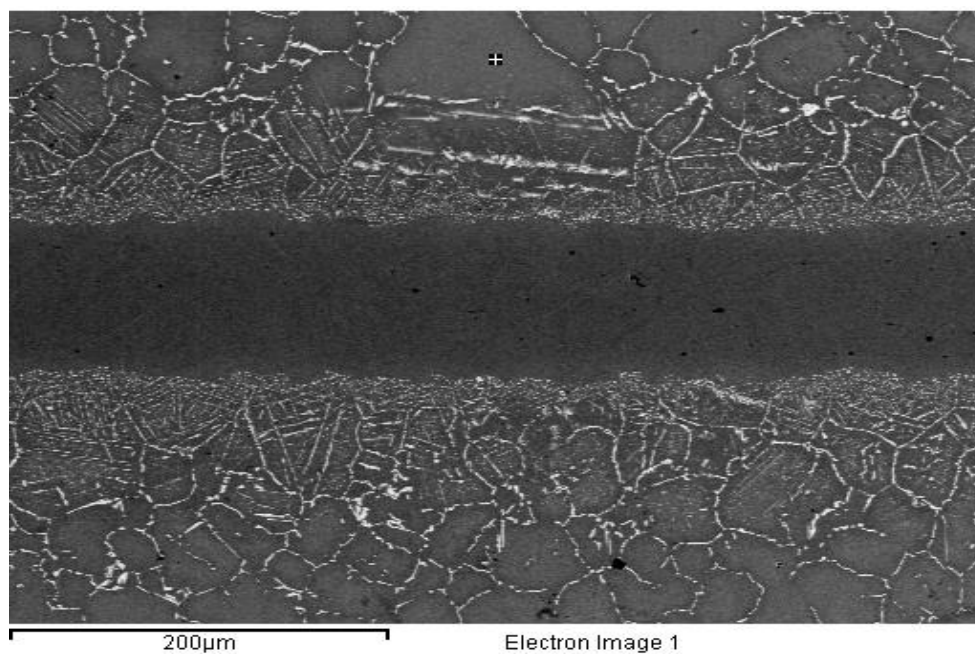
κόκκων η χημική σύσταση είναι σχεδόν πανομοιότυπη με αυτή του μετάλλου βάσης. Παράλληλα, σημειώνεται η ύπαρξη λευκής απόχρωσης σωματιδίων στα όρια των κόκκων αλλά και στο εσωτερικό τους. Τα λευκά σωματίδια αποτελούν κατακρημνισμένα καρβίδια τύπου M_6C και $M_{23}C_6$ πλούσια σε Co, Cr W. Τα καρβίδια M_6C εντοπίζονται κυρίως ενδοκρυσταλλικά ,διάσπαρτα μέσα στους κόκκους με σφαιρικό ή βελονοειδές σχήμα. Στα όρια των κόκκων σε μορφή zipper like αναγνωρίζονται καρβίδια τύπου $M_{23}C_6$ πλούσια σε βολφράμιο και χρώμιο που πιθανός να έχουν προέλθει από την κατακρήμνιση καρβιδίων MC και M_6C . Τα καρβίδια $M_{23}C_6$ μπορούν επίσης να εμφανιστούν υπό την μορφή συσσωματώματος καρβιδίων, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 4.29. Στην αρχή της ζώνης διάχυσης, τα καρβίδια είναι πιο λεπτομερή. Ταυτόχρονα, η εμφάνιση κατακρημνισμένων καρβιδίων βελονοειδούς σχήματος είναι πιο έντονη στην αρχή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης και μειώνεται όσο εισχωρούμε πιο πολύ προς το μέταλλο βάσης.



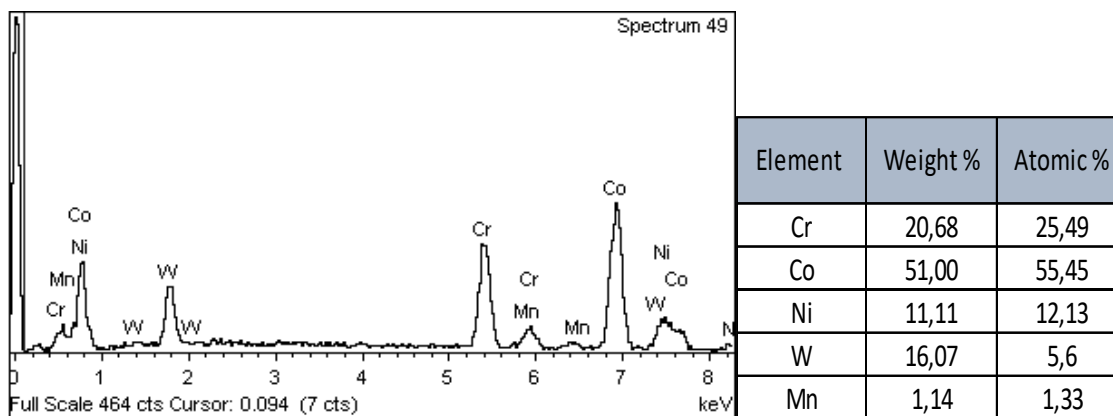
Εικόνα 4.27 Ηλεκτρονική μικρογραφία της μικροδομής BES x1000 στην διεπιφάνεια μεταξύ ΘΕΖ και ΖΣ (κάτω).



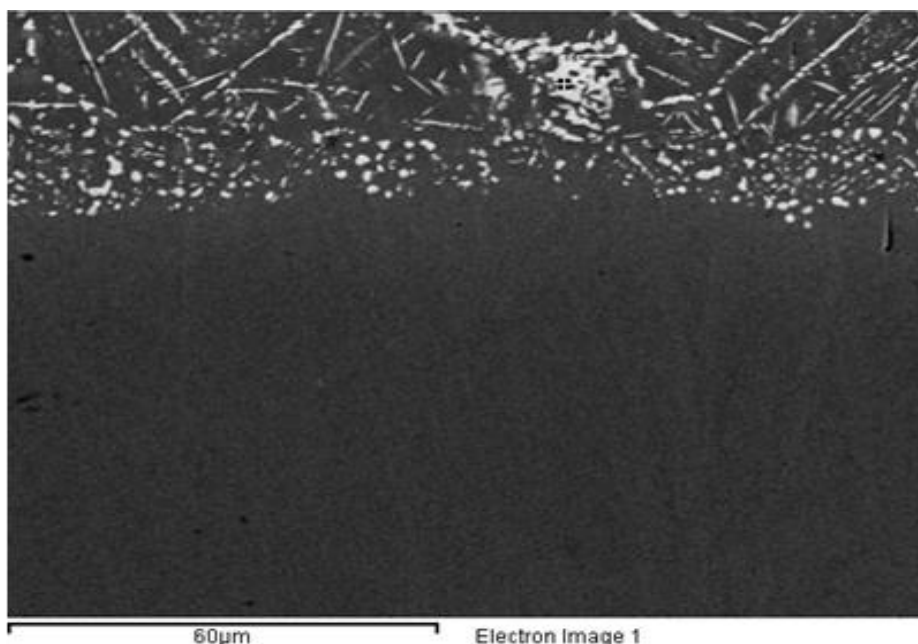
Πίνακας 4.19 Σημειακή χημική ανάλυση σε σημείο διεπιφάνειας μεταξύ ΘΕΖ και ΖΣ (Εικόνα 4.27).



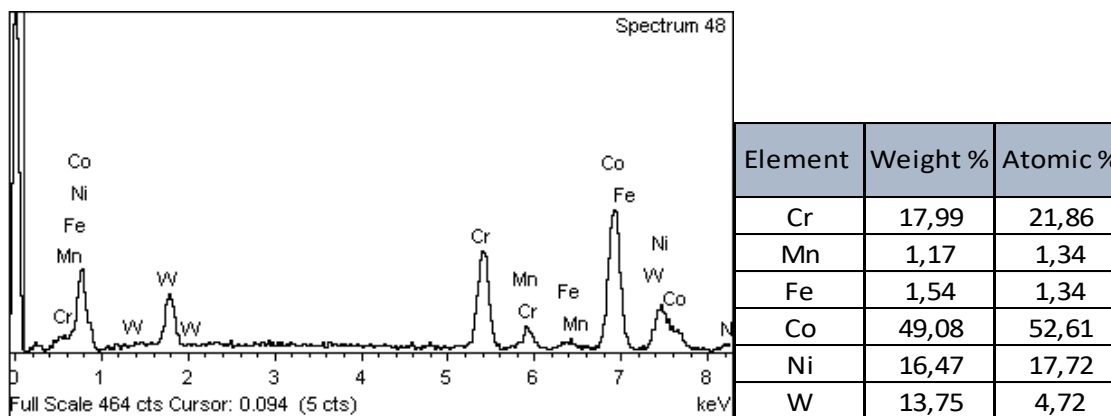
Εικόνα 4.28 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x250 της μικροδομής της ΘΕΖ.



Πίνακας 4.20 Σημειακή χημική ανάλυση σε ενδοκρυσταλλικό σημείο κόκκου του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.28).



Εικόνα 4.29 Ηλεκτρονική μικρογραφία BES x2000 της μικροδομής της ΘΕΖ. Τα λευκά σωματίδια αποτελούν καρβίδια που έχουν σχηματιστεί περικρυσταλλικά και ενδοκρυσταλλικά των κόκκων καθώς και συσσωματώματα καρβιδίων (σημείο σταυρού).



Πίνακας 4.21 Σημειακή χημική ανάλυση συσσωματώματος καρβιδίων περικρυσταλλικά των κόκκων του μητρικού υλικού (Εικόνα 4.29).

4.2. ΟΠΤΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Στη συνέχεια παρατίθενται εικόνες από την παρατήρηση των δοκιμίων σε οπτικό μικροσκόπιο.

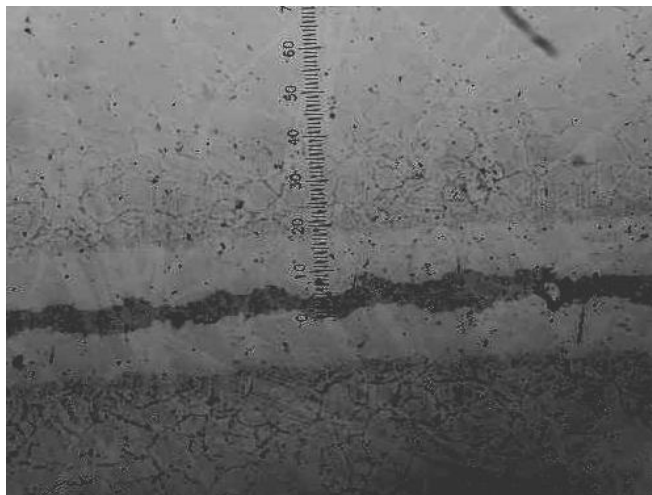
Πραγματοποιήθηκε επίσης μέτρηση στην ζώνη συγκόλλησης, με την βοήθεια κατάλληλης κλίμακας του φακού του μικροσκοπίου (eyepiece graticule) και προσαρμογή (βαθμονόμηση) σε μονάδες μήκους mm (μονάδες SI) ώστε να εκτιμηθεί το πάχος της συγκόλλησης. Η κλίμακα χωρίζεται σε 100 τμήματα (divisions) κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε 0.1 mm. Το πραγματικό μέγεθος της κλίμακας βαθμονομείται ανάλογα με τον μεγεθυντικό φακό.

4.2.1. ΔΟΚΙΜΙΟ 2-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4776

Η παρατήρηση επικεντρώνεται στην ζώνη συγκόλλησης του δεύτερου δοκιμίου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο προσθήκης το μέταλλο πλήρωσης αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4776.



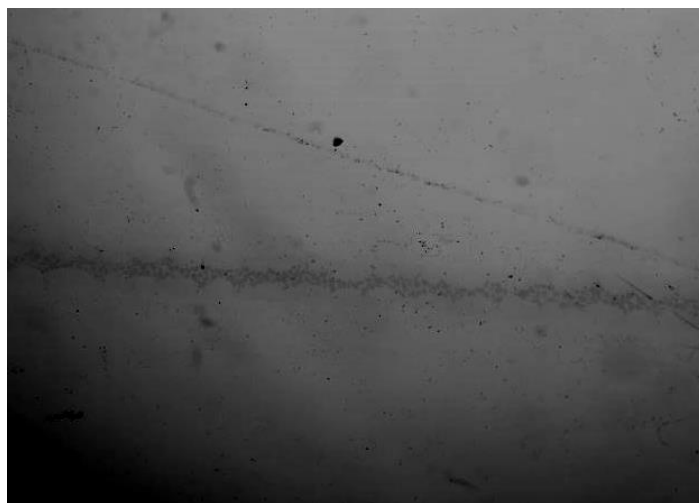
Εικόνα 4.30 Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου για το δοκίμιο που υπέστη συγκόλληση με υλικό πλήρωσης AMS 4776.



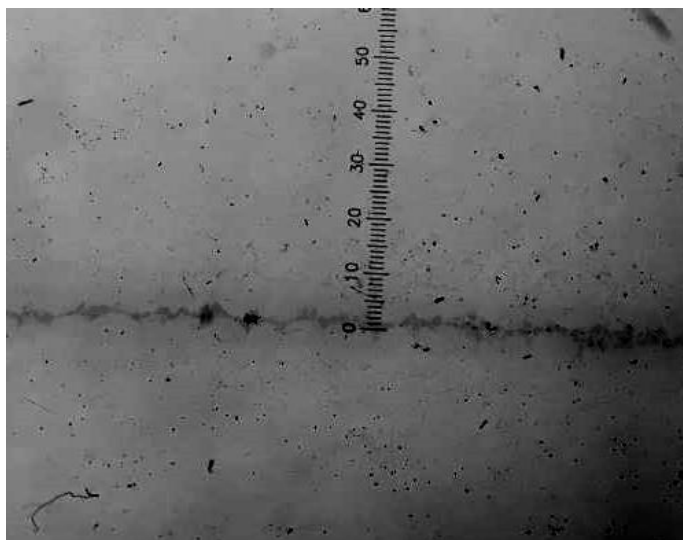
Εικόνα 4.31 Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου με κλίμακα για την εκτίμηση του πάχους της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το πάχος της συγκόλλησης είναι περίπου 150 μm ($\times 200$).

4.2.1. ΔΟΚΙΜΙΟ 1-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ AMS 4779

Η παρατήρηση επικεντρώνεται στην ζώνη συγκόλλησης του πρώτου δοκιμίου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο προσθήκης το μέταλλο πλήρωσης αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4779.



Εικόνα 4.32 Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου για το δοκίμιο που υπέστη συγκόλληση με υλικό πλήρωσης AMS 4779.



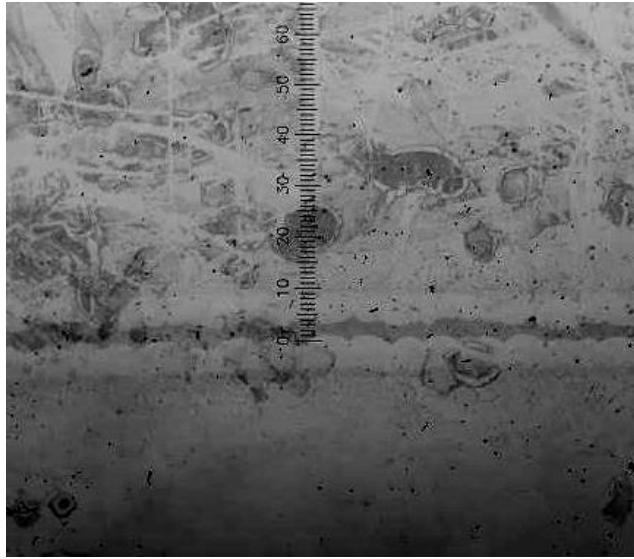
Εικόνα 4.33 Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου με κλίμακα για την εκτίμηση του πάχους της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το πάχος της συγκόλλησης είναι περίπου 100 μm (x100).

4.2.3. ΔΟΚΙΜΙΟ 3-ΜΕΤΑΛΛΟ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ BNi-9

Η παρατήρηση επικεντρώνεται στην ζώνη συγκόλλησης του τρίτου δοκιμίου, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μέταλλο προσθήκης το μέταλλο πλήρωσης αεροπορικής προδιαγραφής BNi-9.



Εικόνα 4.34 Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου για το δοκίμιο που υπέστη συγκόλληση με υλικό πλήρωσης BNi-9



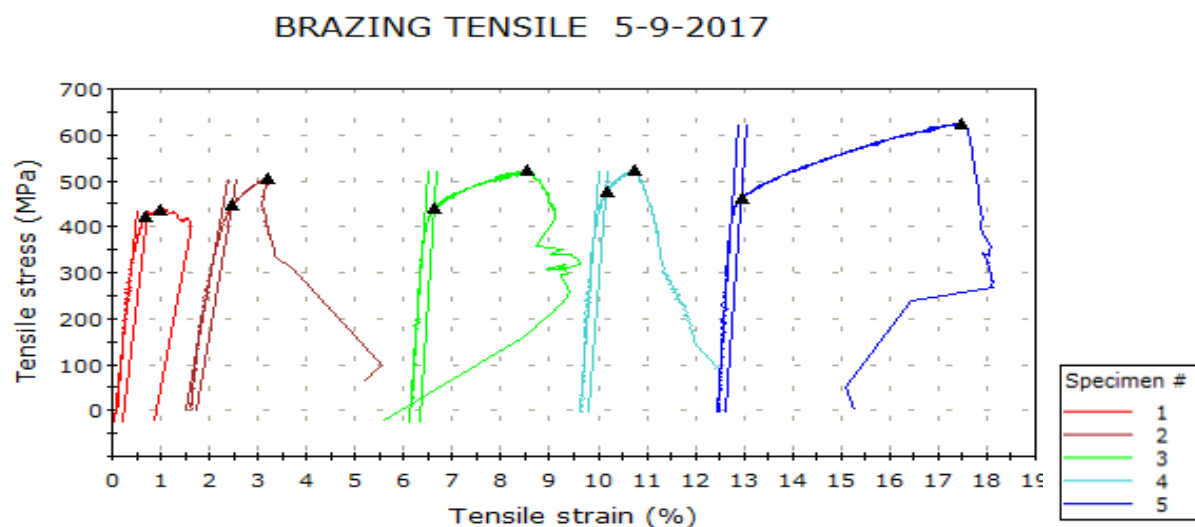
Εικόνα 4.35 Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου με κλίμακα για την εκτίμηση του πάχους της συγκόλλησης. Παρατηρούμε ότι το πάχος της συγκόλλησης είναι περίπου 160 μm (x100).

4.3. ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Μετά την ολοκλήρωση των μεθόδων εξέτασης της μικροδομής, το τελικό στάδιο μελέτης των δοκιμίων αποτέλεσε η δοκιμή εφελκυσμού. Στην συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα μηχανικής καταπόνησης και των 5 δοκιμίων, τα οποία έχουν συγκολληθεί με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού και μέταλλο προσθήκης το AMS 4779 καθώς και δεδομένα που λήφθηκαν υπόψη για την δοκιμή εφελκυσμού όπως το πάχος των δοκιμίων, το πλάτος και ο ρυθμός άσκησης δύναμης εκφραζόμενος σε χιλιοστά ανά λεπτό (mm/min). Το αρχικό μήκος των δοκιμίων ήταν 57 mm.

Company	HELLENIC AEROSPACE INDUSTRY
Laboratory Name	COMPOSITE RESEARCH LAB
Thickness	6.00000 mm
Width	12.70000 mm
Rate 1	3.00000 mm/min

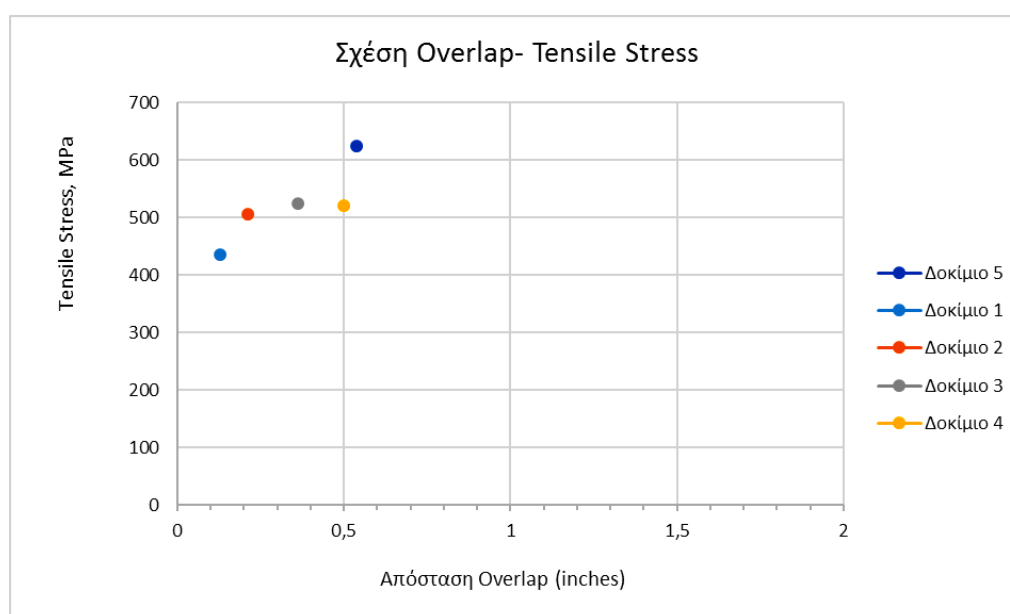
Πίνακας 4.22 Δεδομένα στοιχεία της δοκιμής εφελκυσμού σε μηχανήμα τύπου Instron–Model 4482.



Διάγραμμα 4.1 Η μηχανική καμπύλη τάσης -παραμόρφωσης για τα 5 δοκίμια εφελκυσμού.

Δοκίμια	Συμβατικό Όριο Διαρροής 0,2 % (MPa)	Όριο Θραύσης (MPa)	Ολκιμότητα %
1 ^ο	424,17	436,97	1,25%
2 ^ο	446,92	505,9	1,72%
3 ^ο	440,57	524,28	3,72%
4 ^ο	476,04	522,11	2,04%
5 ^ο	460,6	625,09	8,19%

Πίνακας 4.23 Χαρακτηριστικά μεγέθη από το πέρας της δοκιμής εφελκυσμού για τα πέντε δοκίμια.



Διάγραμμα 4.2 Σχέση μεταξύ απόστασης overlap (inches) και συμβατικού ορίου διαρροής (MPa).

Από τις δοκιμές μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων μέσω εφελκυστικής καταπόνησης, καταγράφηκαν τα παραπάνω δεδομένα. Παρατηρήθηκε ότι όλα τα δοκίμια έσπασαν από τη πλευρά του μετάλλου βάσης Haynes 25 και μακριά από την θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Το γεγονός αυτό θεωρείται ικανοποιητικό, όσον αφορά την ποιότητα της συγκόλλησης, διότι φαίνεται, εκ πρώτης όψεως, ότι η συγκόλληση αποκρίθηκε με επιτυχία έναντι της μηχανικής καταπόνησης. Το δοκίμιο 5 με επικάλυψη 6T, δηλαδή 13.70 mm, παρουσίασε το μέγιστο όριο θραύσης καθώς και ποσοστό ολκιμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συγκόλληση του υπερκράματος Haynes 25 με την μέθοδο μεσαίων θερμοκρασιών σε φούρνο κενού (Vacuum Furnace Brazing). Χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά νικελιούχα κράματα ως μέταλλα προσθήκης προδιαγραφής AMS 4776, AMS 4779 και AWS BNi-9 και οι συγκολλήσεις μελετήθηκαν συγκριτικά ως προς την μικροδομή τους, ενώ συγκολλήσεις με το υλικό πλήρωσης AMS 4779 υποβλήθηκαν και σε μηχανικές δοκιμές με σκοπό την εκτίμηση της αντοχής τους.

Από την μελέτη της μικροδομής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δεν προκύπτουν δυσμενείς φάσεις σε καμία από τις τρεις περιπτώσεις. Η περιοχή της συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από λεπτομερή μικροδομή ενώ δεν ταυτοποιήθηκαν επιβλαβείς κρυσταλλικές δομές. Παρατηρήθηκε η ύπαρξη περικρυσταλλικών ευτηκτικών φάσεων όπως MC, M₆C και M₂₃C₆ κυρίως στην περιοχή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Η δομή θεωρείται χαρακτηριστική για αντίστοιχες συγκολλήσεις αυτής της μεθόδου και θεωρείται ότι η χρήση και των τριών υλικών πλήρωσης ήταν επιτυχής.

Συγκριτικά, από την χρήση του κράματος αεροπορικής προδιαγραφής AMS 4779 ως μέταλλο προσθήκης προκύπτει λίγο καλύτερο αποτέλεσμα ως προς την μικροδομή από μεταλλογραφικής άποψης, όπως προσδιορίστηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Επίσης από τα αποτελέσματα της μικροσκοπίας προέκυψε ότι η ζώνη διάχυσης εμφάνιζε αμελητέες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό έρχεται να ενισχύσει και η μελέτη μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκε.

Κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών εφελκυσμού για τις διάφορες τιμές επικάλυψης (overlap) 2T έως 6T (όπου T το πάχος του ελάσματος), τα δοκίμια έσπασαν στο μέταλλο βάσης, δηλαδή η συγκόλληση αποκρίθηκε επιτυχώς από μηχανικής άποψης.

Συμπερασματικά αναφέρουμε ότι η συγκόλληση θεωρείται άρτια και στις τρεις περιπτώσεις με διαφορετικά μέταλλα προσθήκης ενώ η μηχανική αντοχή της συγκόλλησης με αυτή την μέθοδο αποδείχτηκε ικανοποιητική.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. STICKLER, R., Phase stability in superalloys (1974), in: High Temperature Materials in Gas Turbines, ed. By Sahn, P.R. and Speidel, M. P. Elsevier Scientific Publishing Amsterdam, Holland.
2. DOUGLAS, D. L. (1971). Fundamentals of the reactions between metals and their environment at high temperatures, SAMPE 16th National Symposium, Anaheim, California, USA.
3. AEROSPACE MATERIALS HANDBOOK (2012) in Superalloys for Super Jobs, ed. By San Zhang and Dongliang Zhao.
4. NASH, P. 1992. *ASM Handbook Vol. 3 Alloy Phase Diagrams*, p. 692, ASM International: USA.
5. M53-P2 modules from website: www.commons.wikimedia.org (Licensed under the Creative Commons Attribution Alike 4.0 International, 2014)
6. ASM Metals Handbook Volume 06- Welding, Brazing and Soldering (ASM International 1993)
7. ASM Specialty Handbook – Nickel, Cobalt and Their Alloys, J.R.Davis (ASM International 2000)
8. SUPERALLOYS – A Technical Guide (ASM International 2002) by J.Donachie
9. Vacuum Furnace Brazing από την ιστοσελίδα: www.tav-vacuumfurnaces.com
10. DECKER, R.F. (1969). Strengthening mechanisms in nickel base superalloys, Climax Molybdenum Co, Zurich, 5-6 May 1969.
11. BETTERIDGE, W. and HESLOP, j. (Eds.) (1974). The Nimonic Alloys, E. Arnold, London.
12. LUND, C. H. et al. (1969), German Offen 1921359.
13. HANES, H. D. (1973), 5th Nat. SAMPE Technical Conf., 9 – 11 Oct. 1973, AZUSA, California, USA, p.460.
14. BOESCH, W. J. and SLANEY, J. S. (1964). Metal Progress, 86, p. 109.
15. Y. Han, Master's Thesis, University of Manitoba, Canada, 1982
16. WOODYATT, L. R., SIMS, C. T. and BEATTIE, H. J. JR. (1986). Trans. AIME, 236 , P. 519.
17. SINHA, A. K. (1972), Progress Mat. Sci., 15.
18. KOTVAL, P. S. et al. (1972), Met. Trans., 3, p.453.

19. WALLACE, W. (1975). *Met. Sci. J.*, 9, P. 547.
20. J. P. Dennison, R. J. Llewellyn and B. Wilshire, *J. Inst. Met.*, 95 (1967) 115.
21. Liu Wenchang, Xiao Furen and Chen Zonglin, *Scripta Met. Et Mater.*, submittes (1996).
22. W. Betteridge, *Cobalt and its Alloys*, Ellis Horwood Limited, 1982
23. *Cobalt Facts*, Cobalt Development Institute, 2000
24. MAXWELL, D. H., BALDWIN, J. F., and RADAVIDICH, J. F. (1975), *Metallurgia and Metal Forming*, Oct., p. 332
25. A. Oradei – Basile and J. F. Radavich, in E. A. Lotia (ed.), *Proc. Int. Symp. On the Metallurgy and Applications of Superalloys 718, 625 and Various Derivatives*, Pittsburgh , PA , June 23 – 26 , 1991 , p. 326 .
26. *Superalloys: Alloying and Performance*, ASM International 2010, by B.Geddes, H.Leon and X.Huang.
27. Sims CT. *Superalloys*, vol. 2. New York: John Wiley; 1987. Chapter 8.
28. TCP phase predictions in Ni-based superalloys: Structure maps revisited (*Acta Materialia* 59 (2011) 749–763) by B. Seiser, R. Drautz, and D.G. Pettifor
29. MITCHELL, W. I. (1966). *Z. Metalik.* , p. 586.
30. MEDDINGS, B., KUNDA, W. and MACKIW, V. N. (1960), *Powder metallurgy, Proc. An Int. Conf.*, 1960, ed. By Lezynski, W., New York.
31. SHAW, S. W. K. (1979). *Metal Progress*, March, p. 47.
32. N. J. Grant, in D. Peckner (ed.). *The Strengthening of Metals*, Reinhold, New York, 1964, p. 163.
33. G.S. Nakayama and J. S. Gibeling, *Acta Metall*, 38 (10) (1990) 2023.
34. U. Heubner, *Nickel Alloys*, *Mechanical Engineering*, No 129, Dec. 2000, Marcel Dekker (pub.).
35. Documents concerning M53-P2 engine (Thin Strut), provided by H.A.I.- Work Instruction number 72-53-20-65B-666B/ 30/4/01.
36. Archived Report for SNECMA M53 Aviation Gas Turbine-July 2007
http://www.forecastinternational.com/archive/disp_pdf.cfm?DACH_RECNO=379

37. FRASER , R. W. , MEDDINGS , B. , EVANS , D. J. I. and MACKIW , V. N. (1965), In :
Modern Developments in Powder Metallurgy , 2 , ed. by Hausner, H. H. , Plenum Press,
New York.
38. C. Carry and J. L. Strudel, *Acta Metall*, 25, (1977) 767.
39. M. J. Donachie (ed.), *Superalloys: Source Book*, March 1984, Materials Park, OH,
ASM Int.
40. RESTALL, J. E. and TOULSON, E. C. (1973). *Metals and Materials*, 7 p. 134 and p.
187.
41. D. A. Porter and K.E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys*
(London: Chapman & Hall , 1992) .
42. GIBBONS, T. B. and HOPKINS, B. E. (1971). *Met. Sci. J.* , 5 , p. 233.
43. E. LIEBERMAN, *MODERN SOLDERING AND BRAZING TECHNIQUES*,
BUSINESS NEWS PUBLICATIONS, 1988
44. *BRAZING HANDBOOK, 4TH ED.*, AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991
45. *THE BRAZING BOOK*, HANDY & HARMAN/LUCAS-MILHAUPT, INC., 1991
46. M.M. SCHWARTZ, *BRAZING*, ASM INTERNATIONAL, 1987
47. *MANUFACTURING TECHNIQUES IN BRAZING*, YOUSETSU SHINBUN SHA,
1982 (IN JAPANESE)
48. *INTRODUCTION TO FURNACE BRAZING* by Air Products and Chemicals, Inc.,
2001 (40636) 330-0018-Apr17
49. *SPECIALITY ALLOY WELDING* by Rolled Alloys- Heat and Corrosion Resistant
Specialists, September 2002
50. *Introduction to BRAZING TECHNOLOGY*, P.M.ROBERTS, CRC Press, Taylor and
Francis Group, LLC, 2016
51. *Diffusion Welding of Nickel-based Superalloys* by Hossein Rezaei, Malek-e-ashtar
University, Tehran, Iran. The Open-Access Journal for the Basic Principles of Diffusion
Theory, Experiment and Application/ diffusion-fundamentals.org
52. Chester T. Sims, *A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgists*,
General Electral Company, Schenectady, New York.
53. S.L. Semiatin and T.R. Bieler, *Microstructural Evolution during the Hot Working of*
Superalloys, JOM, January 1999.
54. *ALLVAC 718 Plus™*, *Superalloys for Aircraft Engine Applications*, Melih Cemal
Kushan, Sinem Cevik Uzgur, Yagiz Uzunonant and Fehmi Diltemiz, Turkey.

55. R. E. Smallman, R. J. Bishop. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering, 6th Edition, 1999, p. 305 – 308.
56. SAE Aerospace Technical Standards Board Rules- AMS 5537- Copyright 2012 SAE International Group.
57. ASM Metals Handbook Volume 09- Metallography and Microstructures (ASM International 2004).
58. F.C. Hagen et al., Mechanical Properties of New Higher Temperature Multiphase Superalloy, *Superalloys 1984*, Metallurgical Society of AIME, 1984, p 621–630
59. S. Takeda and N. Yukawa, Nippon Kinz. Gakkai-ho, Vol 6 (No. 11, 12), 1967, p 784–802, 850–855.
60. S.T. Wlodek, Embrittlement of a Co-Cr-W (L-605 Alloy), Trans. ASM, Vol 56 1963, p 287–303
61. C.T. Sims, The Occurrence of Topologically Close-Packed Phases, The Superalloys, John Wiley, 1972
62. R.B. Herchenroeder, S.J. Matthews, J.W. Tackett, and S.T. Wlodek, Haynes Alloy No. 188, Cobalt, Vol 54, March 1972, p 3–13
63. SAE Aerospace Technical Standards Board Rules- AMS 4776- Copyright 2010 SAE International Group.
64. SAE Aerospace Technical Standards Board Rules- AMS 4779- Copyright 2012 SAE International Group.
65. BRAZING FILLER METAL SELECTION CHART – NICROBRAZ (nickel-bases). Wall Colmonoy Corporation (USA) 2013.
66. Brazing with Nickel Based Filler Metals – Lucas Milhaupt Inc.2008, A Handy & Harman Company