



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΞΥΓΙΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Ιωάννης Κολλιόπουλος Α.Μ:02115204

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος

ΑΘΗΝΑ 2018

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1°.....	1
Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.1.1 Ψευδοελαστικότητα.....	3
1.1.2 Επίδραση της μνήμης σχήματος.....	3
1.1.3 Καταπόνηση που προκαλείται από μετασχηματισμό.....	4
1.2 Τύποι κραμάτων μνήμης σχήματος.....	6
Βιβλιογραφία.....	8
Κεφάλαιο 2°.....	9
Κατεργασίες αποβολής υλικού στα κράματα μνήμης σχήματος.....	9
2.1 Εισαγωγή.....	9
2.2 Προηγμένες (μη συμβατικές) κατεργασίες αποβολής υλικού των κραμάτων μνήμης σχήματος.....	11
2.2.1 Ηλεκτροδιάβρωση.....	11
2.2.2 Κοπή με δέσμη λέιζερ και δέσμη ύδατος με λειαντικούς κόκκους.....	15
2.3 Αειφορική επεξεργασία των κραμάτων μνήμης σχήματος.....	19
2.4 Σύνοψη.....	33
Βιβλιογραφία.....	36
Κεφάλαιο 3°.....	38
Συγκόλληση και σύνδεση των κραμάτων μνήμης σχήματος.....	38
3.1 Εισαγωγή.....	38
3.2 Κατεργασίες συγκόλλησης με τηξη και δέσμη.....	38
3.2.1 Συγκόλληση TIG.....	39
3.2.2 Συγκόλληση με πλάσμα.....	42
3.2.3 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ.....	43
3.2.4 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων.....	46
3.3 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση.....	48
3.4 Συγκόλληση στερεάς κατάστασης.....	50
3.4.1 Συγκόλληση με τριβή.....	50
3.4.2 Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση.....	52
3.4.3 Συγκόλληση με υπερήχους.....	53
3.4.4 Εκρηκτική συγκόλληση.....	54
3.5 Κόλληση πρόσφυσης.....	55

3.6 Μπρουτζοκόλληση και ασημοκόλληση	56
3.7 Σύνοψη	58
References	59
Κεφάλαιο 4°	61
Κατεργασιμότητα των κραμάτων μνήμης σχήματος.....	61
4.1 Εισαγωγή	61
4.2 Κατεργασίες κονιομεταλλουργίας.....	61
4.2.1 Συμβατική πυροσυσσωμάτωση	62
4.2.2 Θερμή ισοστατική συμπίεση	64
4.2.3 Χύτευση με έγχυση μετάλλου	66
4.2.4 Αυτόματη σύνθεση υψηλών θερμοκρασιών.....	66
4.2.5 Πυροσυσσωμάτωση με σπινθήρες πλάσματος.....	67
4.3 Προσθετικές Κατεργασίες.....	69
4.3.1 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και επιλεκτική τήξη με λέιζερ	70
4.3.2 Διαμόρφωση ακριβείας με λέιζερ.....	72
4.3.3 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων	73
4.4 Θερμομηχανικές κατεργασίες	74
4.4.1 Κατεργασία τριβής με ανάδευση.....	74
4.4.2 Θερμή σφυρηλάτηση.....	76
4.4.3 Θερμή έλαση	77
4.5 Μηχανική κατεργασία.....	77
4.5.1 Γωνιακή εξώθηση ίσων καναλιών.....	77
4.5.2 Ψυχρή σφυρηλάτηση.....	78
4.5.3 Ψυχρή έλαση και ψυχρή ολκή.....	78
4.6 Σύνοψη	79
References	80

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Τα Κράματα Μνήμης Σχήματος (SMAs) αποτελούν μία ειδική κατηγορία έξυπνων υλικών και μπορούν να αλλάξουν το σχήμα ή το μέγεθός τους και ακολούθως να επιστρέψουν στην αρχική τους μορφή με τη βοήθεια ενός θερμικού, τασικού ή μαγνητικού πεδίου. Έχουν επίσης την ικανότητα να ασκήσουν πολύ μεγάλη παραμόρφωση και τάση ενεργοποίησης, και να παράγουν έργο λόγω του αντιστρεπτού μαρτενσιτικού μετασχηματισμού των φάσεων που αναπτύσσουν [1-4]. Τα κράματα μνήμης σχήματος είναι συμπαγή, ανθεκτικά, ελαφρά, χωρίς τριβή, αθόρυβα, βιοσυμβατά, φιλικά προς το περιβάλλον και διαθέτουν ανώτερες ιδιότητες ως επενεργητές, στην απόσβεση κραδασμών και ως αισθητήρες.

Τα SMAs ανακαλύφθηκαν από τον Σουηδό φυσικό Arne Ölander το 1932 [5]. Δύο ερευνητές του εργαστηρίου υλικού πολέμου του αμερικάνικου πολεμικού ναυτικού, ο William Buehler και ο Frederick Wang παρατήρησαν το χαρακτηριστικό της μνήμης σχήματος (SME) σε ένα κράμα νικελίου-τιτανίου (NiTi) το 1962 [6]. Τη δεκαετία του 1970, SMAs άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε εμπορικά προϊόντα και συσκευές. Από τότε στον τομέα έχει υπάρξει πολύ μεγάλη ανάπτυξη.

Χάρη στις προαναφερόμενες μοναδικές ιδιότητες, η ζήτηση για SMAs έχει αυξηθεί για εφαρμογές σε μικρο-ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα (MEMS), ρομποτική, καταναλωτικά και βιομηχανικά προϊόντα, αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική και σε πολλά πεδία της βιοϊατρικής (Εικόνα 1).

Τα SMAs χρησιμοποιούνται σαν επενεργητές σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής. Μαζί με τους επενεργητές, τις δομικές συνδέσεις, τους αποσβεστήρες κραδασμών, τους ρομποτικούς βραχίονες και τις εφαρμογές ευρέσεως τροχιάς, στον τομέα της αεροδιαστημικής αναπτύσσουν επίσης και SMAs. Μία από τις πολλές εφαρμογές των SMAs είναι η χρήση τους σαν micro-επενεργητές και macro-επενεργητές στην ρομποτική για τεχνητά άκρα αλλά και στον έλεγχο ιπτάμενων robot [3]. Τα NiTiSMAs είναι πολύ χρήσιμα και σε βιοϊατρικές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων, οδοντικών εμφυτευμάτων, προσθετικών εμφυτευμάτων, stents και άλλο ιατρικό εξοπλισμό.

Κατά την κατασκευή εξαρτημάτων και διατάξεων που περιλαμβάνουν SMAs και χρησιμοποιούνται στους τομείς που αναφέρθηκαν, τα υλικά πριν φτάσουν στην τελική τους μορφή πρέπει να περάσουν από εκτεταμένες τεχνικές κατασκευής και κατεργασίας.



Εικόνα 1. Εφαρμογές κραμάτων με μνήμη σχήματος

Στην πράξη, τα SMAs μπορούν να υπάρξουν σε δύο διαφορετικές φάσεις με τρεις διαφορετικές κρυσταλλικές δομές και έξι δυνατούς μετασχηματισμούς [3]. Κατά την διάρκεια της θέρμανσης, το SMA ξεκινά να μετασχηματίζεται από μαρτενσίτης σε ωστενίτη. Στη θερμοκρασία A_s (θερμοκρασία έναρξης σχηματισμού ωστενίτη) αρχίζει ο μετασχηματισμός του υλικού, ο οποίος ολοκληρώνεται στη θερμοκρασία A_f (θερμοκρασία τερματισμού σχηματισμού ωστενίτη). Μόλις η θερμοκρασία του SMA υπερβεί την A_s , το υλικό μετατρέπεται σε ωστενιντική δομή, δηλαδή επανέρχεται στην αρχική του μορφή. Αυτός ο μετασχηματισμός είναι εφικτός ακόμα και όταν το υλικό βρίσκεται σε υψηλή φόρτιση και, ως εκ τούτου, έχει ως αποτέλεσμα υψηλή πυκνότητα ενέργειας ενεργοποίησης [3]. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, το υλικό αρχίζει να μετατρέπεται σε μαρτενσίτη σε θερμοκρασία M_s (θερμοκρασία έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη) και ολοκληρώνεται μόλις φτάσει στη θερμοκρασία M_f (θερμοκρασία πέρας σχηματισμού μαρτενσίτη). Η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία ο μαρτενσίτης δεν μπορεί να δεχτεί μεγαλύτερη ένταση, είναι η M_d . Στην M_d και πάνω από αυτή το SMA είναι μόνιμα παραμορφωμένο όπως οποιοδήποτε άλλο κοινό μέταλλο [3]. Παρακάτω αναφέρονται τρία πιθανά φαινόμενα που δημιουργούνται λόγω της αλλαγής σχήματος.

1.1.1 Ψευδοελαστικότητα

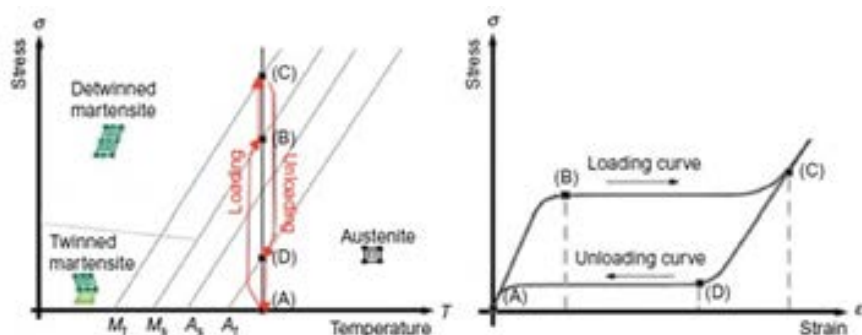
Λόγω της ψευδοελαστικότητας (συχνά αναφέρεται και ως υπερελαστικότητα), το SMA επανέρχεται στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρεθεί η εφαρμοζόμενη τάση παραμόρφωσης [4]. Αυτό επιτυγχάνεται από την επακολουθούσα ελαστική επαναφορά μετά την απομάκρυνση της επιβαλλόμενης τάσης. Το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2) απεικονίζει το μηχανισμό ψευδοελαστικότητας, όπου το υλικό από το σημείο "Α" υφίσταται εντατική καταπόνηση σε σταθερή θερμοκρασία, ενώ βρίσκεται σε ευσταθή ωστενιτική φάση. Η προκύπτουσα παραμόρφωση είναι ελαστική μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο "Β", όπου το υλικό φτάνει στην κατάσταση που αρχίζει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Από αυτό το σημείο και μετά, ο μετασχηματισμός που λαμβάνει χώρα ολοκληρώνεται υπό σταθερή τάση, ενώ η παραμόρφωση συνεχίζει να αυξάνεται, μέχρι μία μέγιστη τιμή (σημείο "C"). Το μέγιστο επίπεδο καταπόνησης ποικίλλει ανάλογα με το υλικό. Το τμήμα της καμπύλης μεταξύ των σημείων (Β) και (C) ονομάζεται τάση "πλατώ". Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται ο μετασχηματισμός της ωστενιτικής φάσης σε μαρτενσιτική και η καμπύλη που περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού είναι διαφορετική. Αυτή η νέα συμπεριφορά παρουσιάζει συνήθως μια μικρή θερμοκρασιακή υστέρηση ($\Delta T = A_f - M_s$), ενώ οι αρχικές διεπιφάνειες του μαρτενσίτη παρουσιάζουν κάποια κινητικότητα. Περαιτέρω φόρτιση του υλικού πάνω από το σημείο (C) θα οδηγήσει μόνο σε ελαστικές παραμορφώσεις του αποδιδυσμένου μαρτενσίτη. Τέλος, μετά την αφαίρεση της τάσης, το υλικό αρχίζει να επιστρέφει στη σταθερή του ωστενιτική φάση, μέχρι να μετασχηματιστεί πλήρως αυτή η φάση (σημείο "D"), οπότε ο κύκλος μπορεί να επαναληφθεί.

1.1.2 Επίδραση της μνήμης σχήματος

Η επίδραση μνήμης απλής (μονόδρομης) κατεύθυνσης διατηρεί μια παραμορφωμένη κατάσταση μετά την αφαίρεση μιας εξωτερικής δύναμης και, στη συνέχεια, ανακτάται το αρχικό της σχήμα με θέρμανση. Κατά το φαινόμενο αμφίδρομης ή αναστρέψιμης μνήμης σχήματος μπορεί να ανακαλείται το σχήμα του τόσο σε υψηλή όσο και σε χαμηλή θερμοκρασία, αλλά η δυνατότητα αυτή εφαρμόζεται σε περιορισμένο βαθμό εμπορικά. Το αποτέλεσμα της μνήμης σχήματος συναρτηθεί της μικροδομής και των σταδίων του μηχανισμού φαίνεται στο σχήμα 3. Το SMA έχει διδυμική μαρτενιτική δομή σε χαμηλή θερμοκρασία και μπορεί να μετατραπεί σε αποδιδυσμένη μικροδομή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3a με αναπροσανατολισμό των μαρτενσιτικών κόκκων. Αυτή η εναλλαγή διατηρεί το σχήμα του υλικού μετά την αποφόρτιση, καθώς επηρεάζει τη μακροσκοπική μεταβολή σχήματος. Κατά συνέπεια, η θέρμανση του SMA οδηγεί σε αντίστροφο μετασχηματισμό φάσης όταν θερμαίνεται πάνω από την θερμοκρασία A_f , δηλαδή η μη διδυμική μαρτενσιτική δομή μετασχηματίζεται σε ωστενιτική δομή, η οποία στη συνέχεια αποκαθιστά την ανάκτηση σχήματος του υλικού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3b.

Περαιτέρω, η ψύξη SMA κάτω από τη θερμοκρασία M_f προκαλεί διδυμική μαρτενσιτική δομή χωρίς αλλαγή σχήματος. Αυτό ονομάζεται *φαινόμενο μνήμης σχήματος*. Η έναρξη μη

διδυμικής δομής που προκαλείται υπό ελάχιστη τάση καταγράφεται ως τάση εκκίνησης μη διδυμικής δομής (σ_s), ενώ η τάση ολοκλήρωσης της δομής αυτής (σ_f) αντιστοιχεί στην πλήρη μη διδυμική μαρτενσιτική δομή που προκύπτει από σημαντικά υψηλότερο φορτίο [2].

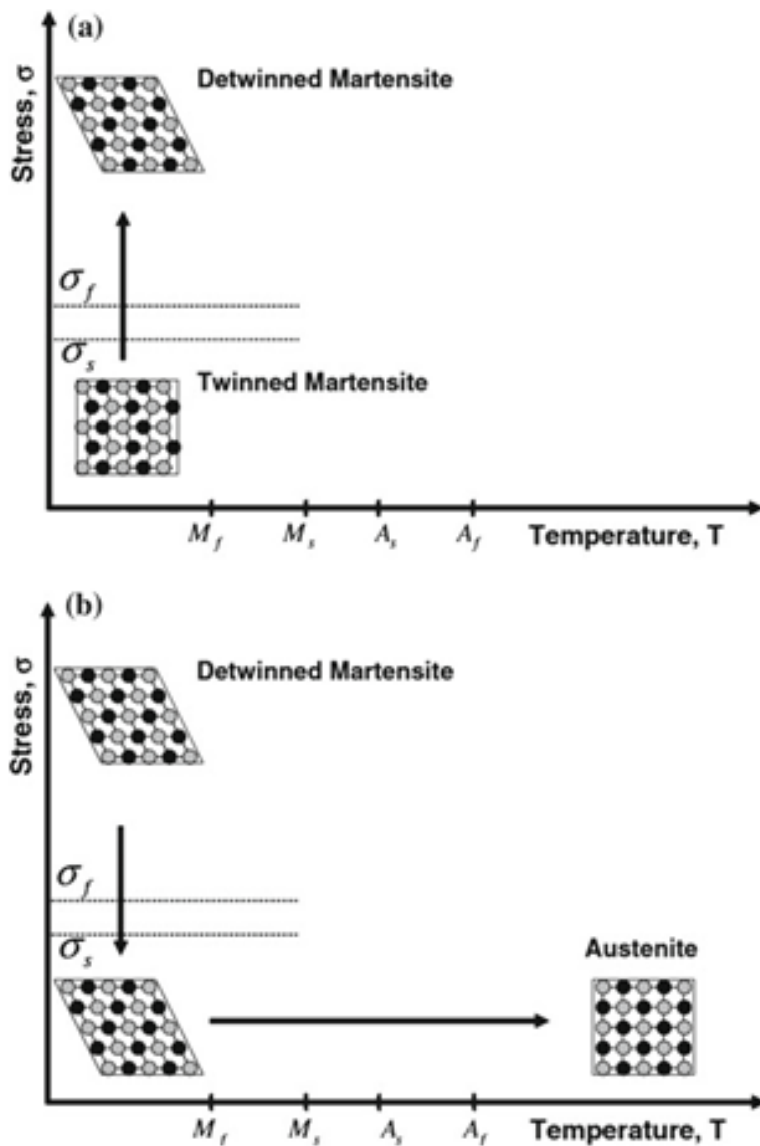


Εικόνα 2. Καμπύλες τάσης θερμοκρασίας- τάσης και παραμόρφωσης-τάσης που περιγράφουν την εκδήλωση υπερελαστικότητας [4]

1.1.3 Καταπόνηση που προκαλείται από μετασχηματισμό

Το SMA έχει μοναδικά χαρακτηριστικά μνήμης σχήματος, ψευδοελαστικότητας και θερμικού μετασχηματισμού φάσεων. Η επανάληψη αυτής της κυκλικής διαδικασίας θερμομηχανικής ανάλυσης μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη παραμόρφωση υπό συνθήκες φόρτισης μετά από ορισμένο αριθμό κύκλων και ονομάζεται *πρόωρη κόπωση* του SMA. Αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής (για παράδειγμα, προσθετική κατεργασία, κονιομεταλλουργία, συγκόλληση, θερμική κατεργασία, διαμόρφωση και χύτευση κ.λπ.), οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υγρασία και θερμοκρασία κ.λπ.), μεταβολές μικροδομής κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού και οι συνθήκες λειτουργίας (όπως τάση, παραμόρφωση κ.λπ.)[2-4]. Οι μικροδομικές αλλαγές αναμένονται με κυκλική φόρτιση λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές και θερμικές μεταβολές που εφαρμόζονται. Στη συνέχεια, η ικανότητα της μνήμης σχήματος υποβαθμίζεται εξαιτίας αυτής της μεταβολής μικροδομής που επιβάλλεται μηχανικά ή/και θερμικά[2-3].

Η διάρκεια ζωής έναντι κόπωσης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον αριθμό των κύκλων που εκτελούνται ανάλογα με το μέτρο της εφαρμοζόμενης τάσης εντός της ελαστικής περιοχής, όπου ο μετασχηματισμός φάσης μπορεί να ολοκληρωθεί μηχανικά, όπως κατά τον πλήρη μετασχηματισμό από μαρτενσιτική σε ωστενιτική δομή ή/και τον μερικώς ολοκληρωμένο μετασχηματισμό, όπου η αρχή ή το πέρας του μετασχηματισμού βρίσκεται μέσα σε συγκεκριμένη δομή.



Εικόνα 3. Εκδήλωση της ιδιότητας μνήμης σχήματος, (α) αποδιδρυμισμός του υλικού με εφαρμογή τάσης, (β) αποφόρτιση και θέρμανση προς μετασχηματισμό σε ωστενίτη

Σε περίπτωση θερμικής φόρτισης, υπολογίζεται η διάρκεια ζωής έναντι κόπωσης με βάση την παραμόρφωση μετασχηματισμού που παρατηρείται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου (παρόμοια με αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως ως πλήρης ή μερική). Περαιτέρω, ο κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός των κόκκων και ο σχηματισμός κατακρημνισμάτων στην μικροδομή είναι επίσης υπεύθυνα για τη διάρκεια ζωής των SMA σε κόπωση. Επιπροσθέτως, οξείδωση και διάβρωση οδηγούν στην ταχεία υποβάθμιση των κρυστάλλων που προφανώς επηρεάζουν δυσμενώς τη διάρκεια ζωής έναντι κόπωσης. Θερμικές κατεργασίες μπορούν επίσης να εφαρμοστούν, για να μεταβληθεί η διάρκεια ζωής των SMAs έναντι κόπωσης [2].

1.2 Τύποι κραμάτων μνήμης σχήματος

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά και άλλα υλικά που παρουσιάζουν αποτελέσματα μνήμης σχήματος. Τα κράματα μνήμης σχήματος (μέταλλα) διατίθενται σε ευρεία κλίμακα, όπως παρουσιάζεται παρακάτω[3-4]:

- Κράμα σιδήρου Fe-Mn-Si;
- SMA με βάση το χαλκό όπως Cu-Zn-Al; Cu-Al-Ni, Cu-Al-Ni-Mn και Cu-Sn.
- Κράματα με βάση νικέλιο-τιτάνιο όπως NiTi, NiTiCu, NiTiPd, NiTiFe, NiTiNb, NiFeGa και NiTiCo.
- Kovar (29% Ni, 17% Co, 0.3% Si, 0.1% C και Fe ισοζύγιο).
- Κράματα μνήμης μορφής υψηλής θερμοκρασίας όπως TiNiPd, TiNiPt, NiTiHf, NiTiZr, ZrRh, ZrCu, ZrCuNiCo, ZrCuNiCoTi, TiMo, TiNb, TiTa, TiAu, UNb, TaRu, NbRu και FeMnSi.
- Κράματα μνήμης μαγνητικού σχήματος, συγκεκριμένα NiMnGa, FePd, NiMnAl, FePt, Dy, Tb, LaSrCuO, ReCu, NiMnIn και CoNiGa.

Τα κράματα NiTi αναπτύσσουν τη μεγαλύτερη παραμόρφωση μνήμης σχήματος (έως 8% έναντι 4-5% για τα κράματα χαλκού και σιδήρου). Αν και τα κράματα NiTi είναι ακριβά, έχουν εξαιρετική βιοσυμβατότητα και αντοχή στη διάβρωση και είναι πιο σταθερά θερμικά σε σύγκριση με τα άλλα κράματα με βάση το χαλκό. Επομένως, τα κράματα μνήμης σχήματος NiTi βρίσκουν ευρείες βιοϊατρικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οδοντικών και ορθοπεδικών εμφυτευμάτων, καρδιαγγειακών stents και χειρουργικών εργαλείων και οργάνων. Οι σωληνωτοί σύνδεσμοι για σωλήνες από χάλυβα και ελάσματα σύνδεσης σιδηροτροχιών γερανογέφυρας κ.λπ. είναι μερικές σημαντικές περιοχές εφαρμογής, όπου χρησιμοποιούνται σιδηρούχα SMAs. Τα SMA με βάση το χαλκό έχουν υψηλότερη θερμοκρασία ενεργοποίησης, οπότε χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών και σε ενεργοποιητές για πολλές αυτοκινητοβιομηχανικές, ρομποτικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Παρά τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά και τις σημαντικές εφαρμογές τους, τα SMAs, θεωρούνται υλικά που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν και να υποστούν κατεργασίες, λόγω της υψηλής ολκιμότητάς τους, της τυπικής συμπεριφοράς τάσης-παραμόρφωσης, της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και του υψηλού βαθμού εργοσκλήρυνσης που οδηγούν σε ατελή μηχανισμό σχηματισμού αποβλίττου, ανάπτυξη απομένουτος γρεζιού (burr) και προοδευτική φθορά των κοπτικών εργαλείων, ανάπτυξη ελαττωμάτων συγκόλλησης και χαμηλή αντοχή ραφής συγκόλλησης, ανομοιόμορφη τήξη και ελαττωματική μικροδομή σε άλλες κατεργασίες [7-14]. Όλα αυτά τα σφάλματα συνεπάγονται κακή ομοιομορφία της κατεργασμένης επιφάνειας, πολύ υψηλή κατανάλωση ενέργειας και πόρων, κλιμακούμενο κόστος κατασκευής και κατεργασίας και μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα.

Για να ξεπεραστούν οι προαναφερθείσες δυσκολίες, όσον αφορά στην κατασκευή και στην κατεργασία των SMAs, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες στον τομέα της καινοτομίας, της έρευνας και ανάπτυξης, που στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας των SMA, τη μείωση του κόστους και την ενίσχυση της ασφάλειας και της βιωσιμότητας.

Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας αναλύονται διάφορες σημαντικές πτυχές των τεχνολογιών κατασκευής και κατεργασίας όπως συμβατικές, προηγμένες και βιώσιμες κατεργασίες κοπής, συγκολλήσεις, συνδέσεις, προσθετικές κατεργασίες, σφυρηλάτηση και έλαση, και κονιομεταλλουργία των κραμάτων μνήμης σχήματος.

Βιβλιογραφία

1. K. Otsuka, C.M. Wayman (eds.), *Shape memory materials* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999)
2. P.K. Kumar, D. Lagoudas, Introduction to shape memory alloys. in *Shape Memory Alloys*, (Springer, Boston, MA, 2008) pp. 1–51
3. J.M. Jani, M. Leary, A. Subic, M.A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Mater. Des.* **56**, 1078–1113 (2014)
4. A.P. Markopoulos, I.S. Pressas, D.E. Manolakos, Manufacturing processes of shape memory alloys. in *Materials Forming and Machining* (Research and Development, 2016) p. 155
5. A. Ölander, An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. *J. Am. Chem. Soc.* **54**(10), 3819–3833 (1932)
6. W.J. Buehler, J.V. Gilfrich, R.C. Wiley, Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *J. Appl. Phys.* **34**(5), 1475–1477 (1963)
7. Y. Guo, A. Klink, C. Fu, J. Snyder, Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* **62**(1), 83–86 (2013)
8. M.H. Sadati, Y. Javadi, Investigation of mechanical properties in welding of shape memory alloys. *Procedia Eng.* **149**, 438–447 (2016)
9. O. Akselsen, Joining of shape memory alloys, in *Shape Memory Alloys*, ed. by O. Akselsen (InTech, USA, 2010)
10. Y. Wang, S. Jiang, Y. Zhang, Processing map of NiTiNb Shape memory alloy subjected to plastic deformation at high temperatures. *Metals* **7**(9), 328 (2017)
11. M.H. Elahinia, M. Hashemi, M. Tabesh, S.B. Bhaduri, Manufacturing and processing of NiTi implants: a review. *Prog. Mater Sci.* **57**(5), 911–946 (2012)
12. J.P. Oliveira, R.M. Miranda, F.B. Fernandes, Welding and joining of NiTi shape memory alloys: a review. *Progress in Materials Science* **88**, 412–466 (2017)
13. M. Elahinia, N.S. Moghaddam, M.T. Andani, A. Amerinatanzi, B.A. Bimber, R.F. Hamilton, Fabrication of NiTi through additive manufacturing: a review. *Prog. Mater Sci.* **83**, 630–663 (2016)
14. Y. Zhou, Micro-welding of shape-memory alloys. in *Joining and Assembly of Medical Materials and Devices* (2013) pp. 133–153

Κεφάλαιο 2°

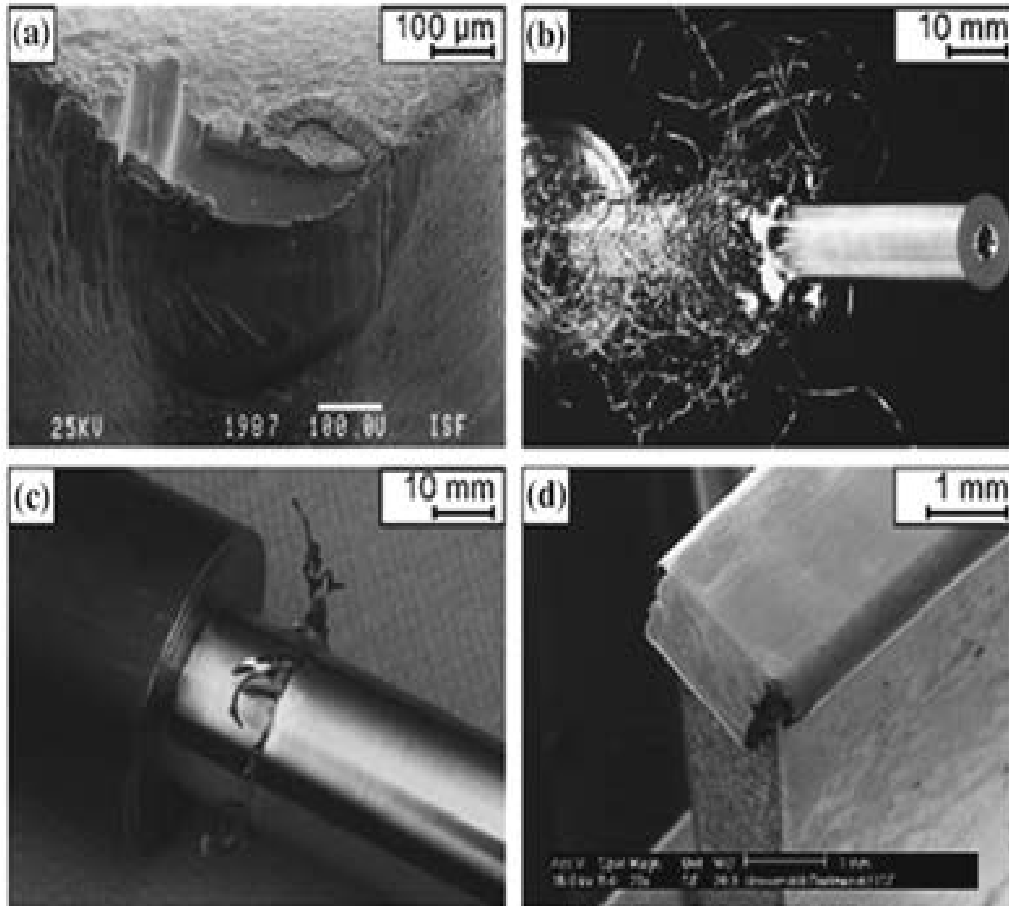
Κατεργασίες αποβολής υλικού στα κράματα μνήμης σχήματος

2.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε στο Κεφ. 1, τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA) θεωρούνται δυσκατέργαστα υλικά (DTM: difficult-to-machine). Με άλλα λόγια, τα SMAs χαρακτηρίζονται από κακή κατεργασιμότητα που οδηγεί σε προβλήματα όπως: η προοδευτική φθορά των εργαλείων, η υποβάθμιση της ποιότητας της επιφάνειας, ο σχηματισμός ρωγματώσεων και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και πόρων που συνδέονται στις κατεργασίες αποβολής υλικού [1-3]. Για παράδειγμα, η Εικόνα 4 παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα κατά την κατεργασία του Nitinol (NiTi) SMA σε συμβατικές κατεργασίες τórνευσης και λείανσης.

Ο βιομηχανικός τομέας αγωνίζεται για την τεχνολογική εξέλιξη όσον αφορά τη διευκόλυνση της κατεργασίας δυσκατέργαστων υλικών (DTM) συμπεριλαμβανομένων και των SMA, λόγω έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων για την κατεργασία τους. Δύο σημαντικές πτυχές της κατεργασιμότητας, όπως είναι η καλύτερη ποιότητα και το μειωμένο κόστος, αποτελούν τους πρωταρχικούς παράγοντες που προωθούν την έρευνα και την ανάπτυξη στον βιομηχανικό τομέα. Οι παρακάτω στρατηγικές και τεχνικές θα μπορούσαν να υιοθετηθούν για την επίτευξη βελτιωμένης κατεργασιμότητας σε υλικά DTM [4-5]:

- Χρησιμοποίηση προηγμένων (ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με δέσμη λέιζερ και ειδικές μέθοδοι υδροκοπής με λειαντικούς κόκκους) και υβριδικών κατεργασιών κοπής (κοπή με συνδυασμό θερμότητας και ταλάντωσης κ.λπ.), προκειμένου να μειωθούν οι φάσεις κατεργασίας, με την απομάκρυνση της ανάγκης για δευτερογενείς κατεργασίες φινιρίσματος.
- Επιλογή βέλτιστων συνθηκών κατεργασίας για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μείωση του κόστους.
- Επιλογή κατάλληλων υλικών εργαλείων-γεωμετρίας-επικαλύψεων για την ελαχιστοποίηση της φθοράς του εργαλείου και τη βελτίωση της ποιότητας του τεμαχίου, διατηρώντας έτσι την αποδοτικότητα των πόρων.
- Υιοθέτηση προηγμένων τεχνικών λίπανσης / ψύξης, όπως είναι η ελάχιστη ποσότητα λιπαντικού (MQL: minimum quantity lubrication) και η κρουγονική ψύξη κ.λπ., προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο ρυθμός φθοράς του εργαλείου, να βελτιωθεί η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, να μεγιστοποιηθεί η παραγωγικότητα και να μειωθεί το κόστος που συνδέεται με τη χρήση λιπαντικών με εξαιρετικά χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο.



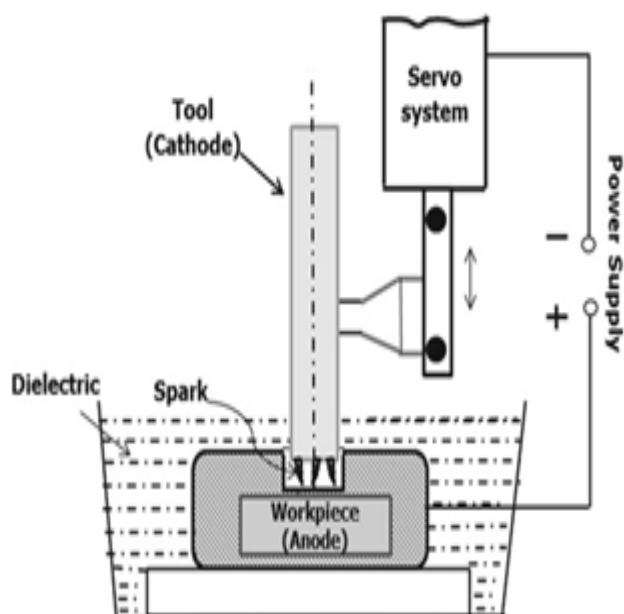
Εικόνα 4. Προβλήματα κατά την επεξεργασία SMA Nitinol (NiTi) (α) υψηλή φθορά εργαλείων, (β) αντίθετη μορφή αποβλίττου, (γ) σχηματισμός γρεζιού μετά την τórνευση και (δ) μετά από λείανση

Χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες στρατηγικές και τις αντίστοιχες τεχνικές, έγιναν αρκετές προσπάθειες για να βελτιωθεί η κατεργασιμότητα των SMAs. Οι επόμενες ενότητες περιγράφουν εκτενώς την κατεργασιμότητα των SMA σε μηχανικές κατεργασίες σε διαφορετικά περιβάλλοντα κατεργασιών αποβολής υλικού.

2.2 Προηγμένες (μη συμβατικές) κατεργασίες αποβολής υλικού των κραμάτων μνήμης σχήματος

2.2.1 Ηλεκτροδιάβρωση

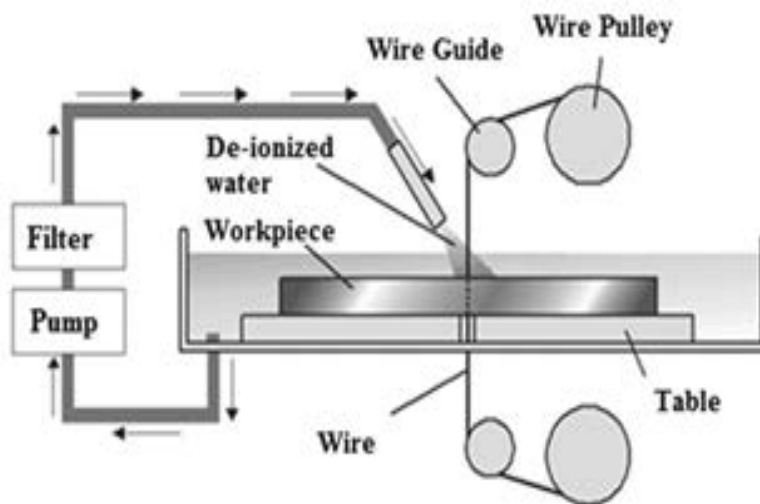
Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM:Electric discharge machining), γνωστή και ως κατεργασία αποβολής υλικού με σπινθήρες εκκένωσης (spark erosion machining), είναι μια θερμικής φύσης μη συμβατική κατεργασία κοπής, όπου η αφαίρεση του υλικού γίνεται με τήξη και εξάτμιση που προκαλείται από μια σειρά επαναλαμβανόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων. Αυτές οι ηλεκτρικές εκκενώσεις λαμβάνουν χώρα μεταξύ του ηλεκτροδίου-καθόδου (εργαλείο) και του ηλεκτροδίου-ανόδου (κατεργαζόμενο τεμάχιο) μέσα σε κατάλληλο διηλεκτρικό υγρό που κυκλοφορεί στο διάκενο μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, όταν το σύστημα τροφοδοτείται με παλμική DC-ισχύ (βλέπε σχήμα 5)[6]. Μετά την εμφάνισή της το 1878, η EDM ξεκίνησε να χρησιμοποιείται ως κατεργασία αποβολής υλικού για εμπορικούς σκοπούς το 1930. Η ηλεκτροδιάβρωση αποτελεί την πρώτη επιλογή των κατασκευαστών για κατασκευή μητρών και καλουπιών πολύ κοντά στην τελική γεωμετρία τους (near-net-shape), για αντικείμενα πολύ μικρών διαστάσεων, στην κατεργασία υπερκραμάτων, βιοϋλικών και άλλων δυσκατέργαστων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία και αεροδιαστημική, πυρηνική τεχνολογία και βιοϊατρικές εφαρμογές [6-7].



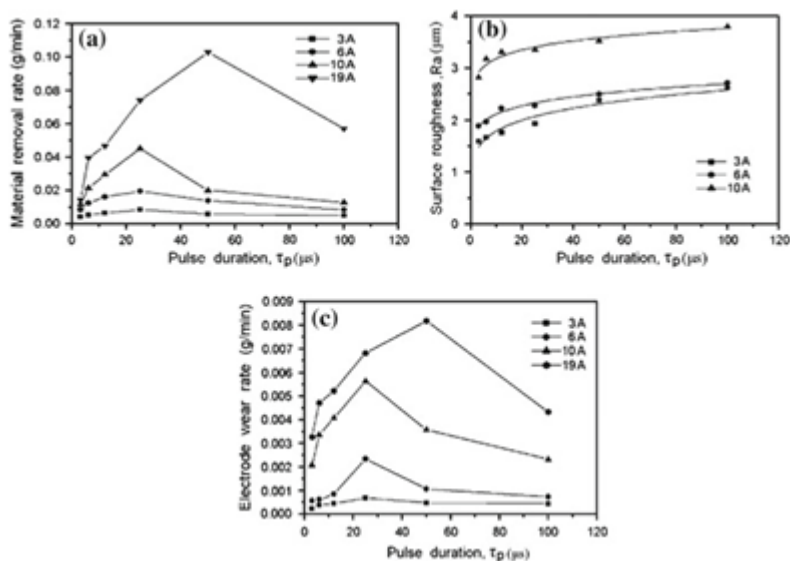
Εικόνα 5. Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης

Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (WEDM: Wire electric discharge machining ή wire-EDM) είναι μια σημαντική και ευρύτερα χρησιμοποιούμενη παραλλαγή της EDM, όπου ένα συνεχώς κινούμενο λεπτό σύρμα (που λειτουργεί ως κάθοδος) χρησιμοποιείται ως εργαλείο για να αποτμήσει ή να κατεργαστεί το τεμάχιο (ανόδος) υπό την ταυτόχρονη συνεχή ροή διηλεκτρικού υγρού (βλ. εικόνα 5) [8]. Τα χρονικά χαρακτηριστικά του τασικού παλμού, η εφαρμοζόμενη τάση, το ρεύμα που διαρρέει το σύστημα, η ταχύτητα πρόωσης του ηλεκτροδίου-εργαλείου και ο τύπος του διηλεκτρικού κλπ. αποτελούν τις σημαντικές παραμέτρους των κατεργασιών EDM και WEDM. Υπάρχει πλούσιο ιστορικό με δυσκατέργαστα υλικά που έχουν διαμορφωθεί κατεξοχήν με τη βοήθεια αυτών των κατεργασιών. Οι βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας, ο υβριδισμός και η χρήση βιώσιμων τεχνικών κ.λπ. είναι οι βασικοί παράγοντες που επιτυγχάνουν χαρακτηριστικά υψηλής ομοιομορφίας (πιστότητας) κατεργασμένης επιφάνειας, όπως είναι: η εξαιρετική γεωμετρική ακρίβεια, η πολύ μικρή τραχύτητα επιφάνειας, η επιθυμητή μικροδομή και τα καλά τριβολογικά χαρακτηριστικά και μειωμένη φθορά, κατά την κατεργασία δυσκατέργαστων υλικών με κατεργασίες EDM και WEDM.

Έχει γίνει μια λεπτομερής μελέτη σχετικά με την EDM των κραμάτων NiTi με ηλεκτρόδιο Cu, όπου ο τύπος ενέργειας εκκένωσης σε συνάρτηση με το παλμικό ρεύμα και τη διάρκεια παλμού αποτελεί τη βασική παράμετρο για κατεργασία ακριβείας[9]. Μεγαλύτερη διάρκεια παλμού και χαμηλότερο παλμικό ρεύμα προτείνονται για επίτευξη καλύτερου ρυθμού αποβολής υλικού και μικρού πάχους τηγμένου στρώματος. Μια παρόμοια μελέτη πάνω στην EDM του NiAlFe αναδεικνύει τη σημασία της ενέργειας και συνιστά μικρές τιμές δαπανούμενης ενέργειας για επίτευξη ελάχιστου πάχους στρώματος τηγμένου υλικού και μέγιστου ρυθμού αποβολής υλικού [10]. Οι επιδράσεις των δύο σημαντικότερων παραμέτρων EDM, κυρίως του ρεύματος εκκένωσης και της διάρκειας παλμού, στα χαρακτηριστικά του κράματος $Ni_{60}Al_{24.5}Fe_{15.5}$ έχουν διερευνηθεί λεπτομερώς. Η εικόνα 6 απεικονίζει την μεταβολή του ρυθμού αποβολής υλικού, της τραχύτητας επιφάνειας και του ρυθμού φθοράς του ηλεκτροδίου με τη διάρκεια και το ρεύμα παλμού. Φαίνεται ότι υψηλός ρυθμός αποβολής υλικού, λόγω εντονότερης τήξης-εξάτμισης και υψηλής κρουστικής φόρτισης από το διογκωμένο διηλεκτρικό μέσο, παρατηρείται σε υψηλό ρεύμα εκκένωσης που προφανώς παρέχει υψηλή πυκνότητα ρεύματος. Υποβάθμιση της τραχύτητας επιφάνειας έχει παρατηρηθεί σε συνθήκες κατεργασίας με αυξημένα ρεύμα εκκένωσης και διάρκεια παλμού. Πιο εκτεταμένα χαρακτηριστικά μηχανικής διάβρωσης λόγω έντονης εκκένωσης με υψηλό ρεύμα και δημιουργία μεγαλύτερων και βαθύτερων κρατήρων με μεγαλύτερη διάρκεια παλμού είναι οι κύριοι λόγοι γι' αυτή την αύξηση της τραχύτητας [10].



Εικόνα 6. Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος



Εικόνα 7. Επίδραση της διάρκειας παλμού σε (α) ρυθμό αποβολής υλικού, (β) ρυθμό φθοράς ηλεκτροδίων και (γ) τραχύτητα της επιφάνειας κατά τη διάρκεια της EDM του κράματος $Ni_{60}Al_{24.5}Fe_{15.5}$

Οι Abidi et al. [11] διεξήγαγαν μια έρευνα πάνω στις επιδράσεις των παραμέτρων μικρο-EDM διάτρησης, και πιο ειδικά: της χωρητικότητας του συστήματος πυκνωτών, της τάσης τροφοδοσίας και του υλικού του εργαλείου, στην κατεργασιμότητα του SMA κράματος NiTi. Η πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση της μικρο-EDM εξασφαλίζει τις βέλτιστες τιμές τους (475 pF, 80 V και χρήση ηλεκτροδίου ορείχαλκου) για καλή γεωμετρική ακρίβεια, μικρότερη υπερκοπή και καλή ποιότητα επιφάνειας της διανοιχθείσας οπής. Συστηματική μελέτη πάνω στην επίδραση των παραμέτρων EDM και τη βελτιστοποίησή τους κατά τη διάρκεια της κατεργασίας κράματος NiTi καταλήγει στη θετική επίδραση του παλμικού ρεύματος και του παλμικού χρόνου επί του ρυθμού αποβολής υλικού, αλλά ταυτόχρονα

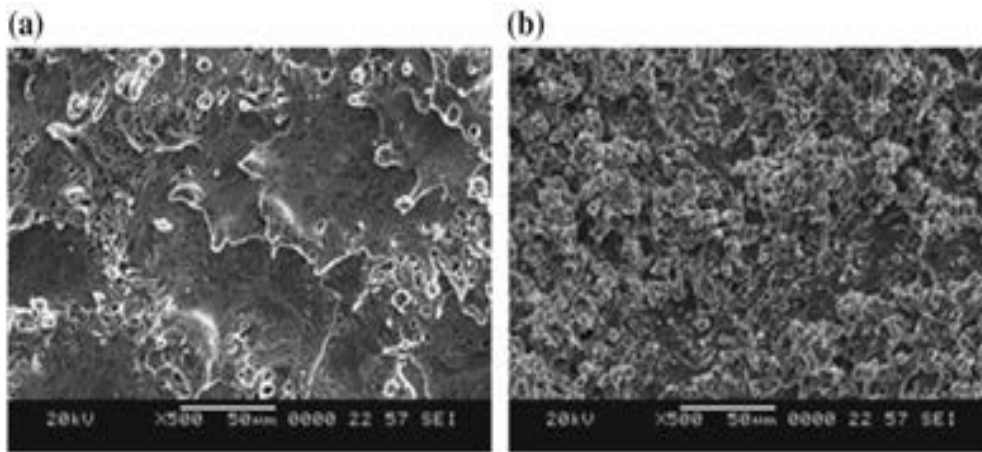
επιδεινώνεται η ποιότητα της επιφάνειας και μειώνεται η διάρκεια ζωής του ηλεκτροδίου-εργαλείου. Επομένως, για τον κατάλληλο συνδυασμό των παραμέτρων της EDM, απαιτείται πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση [12-13].

Περιστρεφόμενο εργαλείο EDM από υλικό κονιομεταλλουργίας αποδείχτηκε πολύ αποτελεσματικό στη μείωση φθοράς των εργαλείων και στη βελτίωση της παραγωγικότητας [14]. Ο συνδυασμός αυτής της τεχνικής EDM με τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων κατεργασίας (ειδικά με την ταχύτητα περιστροφής εργαλείου) ρυθμίζει την κίνηση ιόντων, την ένταση σπινθήρων και τη διεύθυνση, που οδηγεί σε μείωση της φθοράς εργαλείου, αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού και μείωση της τραχύτητας επιφάνειας.

Ένας ερευνητής, ονόματι Mallaiiah M., διεξήγαγε συστηματική και λεπτομερή έρευνα πάνω στην EDM-σύρματος των κράματων μνήμης σχήματος NiTi [15-19]. Μελετήθηκαν ο ρυθμός αποβολής υλικού και η τραχύτητα της επιφάνειας κατά την WEDM του κράματος μνήμης σχήματος Ti₅₀Ni₄₀Cu₁₀ [15]. Παρατηρήθηκε αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού κατά το ενεργό τμήμα παλμού και βελτίωση της τραχύτητας κατά το μη ενεργό τμήμα. Οι αιτίες γι' αυτή τη συμπεριφορά ήταν η υψηλή ενέργεια εκκένωσης και η ένταση σπινθήρων σε μεγάλο ενεργό χρονικό διάστημα παλμού και η επαρκής έκπλυση στη ζώνη κατεργασίας λόγω του μεγαλύτερου μη ενεργού χρόνου παλμού.

Αργότερα, πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση εξασφάλισε βέλτιστες παραμέτρους WEDM για καλύτερη κατεργασιμότητα του SMA με μέση τραχύτητα 1,83 μm και ρυθμό αποβολής υλικού 7,6 mm³ / min. Επιπλέον, η μελέτη XRD εντόπισε την ύπαρξη θερμικής βλάβης, καθώς ο σχηματισμός οξειδίων και άλλων φάσεων έλαβε χώρα σε μεγαλύτερο ενεργό χρόνο παλμού [16]. Χαμηλός ενεργός χρόνος παλμού υπό υψηλή τάση έχει προταθεί για βελτιωμένη ποιότητα επιφάνειας. Μια άλλη έρευνα για το κράμα Ti₅₀Ni₄₀Cu₂₀ αναφέρει επίσης τις ίδιες παρατηρήσεις και επιπλέον υψηλότερη σκληρότητα με μεγαλύτερο ενεργό χρόνο παλμού, εξαιτίας της έντονης τήξης κατά την εκκένωση και της ταχείας στερεοποίησης του τετηγμένου υλικού που πιθανώς αύξησαν το ποσοστό καρβιδίων στην κατεργασμένη επιφάνεια του SMA [17]. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενεργού χρόνου παλμού και τάσης έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν στην κατεργασία WEDM των SMAs. Ο σχηματισμός κρατήρων, κορυφών και κοιλάδων λόγω της αυξημένης τραχύτητας επιφάνειας σε υψηλά μέγιστα του ρεύματος αιχμής και σε μεγαλύτερους ενεργούς χρόνους παλμού παρουσιάζονται στην εικόνα 8 [18].

Η κατεργασία SMA με επικαλυμμένο σύρμα ορείχαλκου οδήγησε σε χαμηλό MRR σε σύγκριση με το απλό ορειγάλκινο σύρμα [19]. Είναι ενδιαφέρον ότι η κοπή με αυξημένη ταχύτητα σύρματος προκάλεσε υψηλότερο ρυθμό αποβολής υλικού καθώς, το τετηγμένο υλικό απλώνεται άτακτα γύρω από την επιφάνεια, μέσω της πίεσης έκπλυσης του διακένου και η απομάκρυνση των παραγομένων αερίων από την περιοχή τήξης αυξάνει τον ρυθμό αποβολής υλικού [19].



Εικόνα 8. SEM μικρογραφήματα της κατεργασμένης επιφάνειας του $Ti_{50}Ni_{40}Cu_{10}$ SMA (a) σε μέγιστο ρεύμα 2A, (b) σε μέγιστο ρεύμα 12A [18]

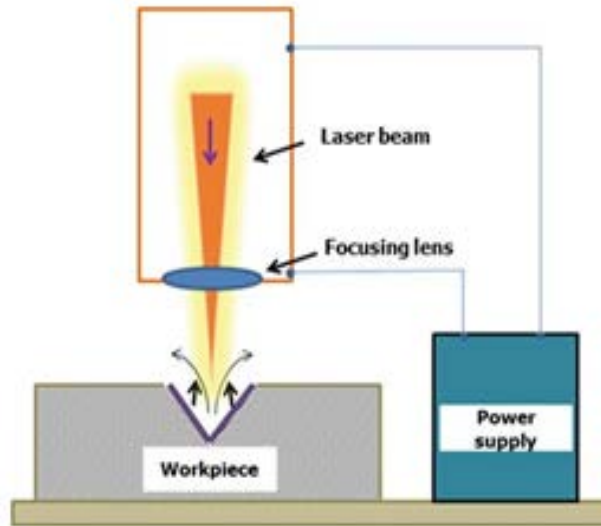
2.2.2 Κοπή με δέσμη λέιζερ και δέσμη ύδατος με λειαντικούς κόκκους

Η βασική ιδέα του LASER (light amplification by stimulated emission of radiation: ενίσχυση φωτός με διέγερση εκπομπής ακτινοβολίας) αποδίδεται στον Albert Einstein το 1917. Στη συνέχεια, το 1960, ο Theodore H. Maiman δημιούργησε το πρώτο εργαστήριο LASER στις Ηνωμένες Πολιτείες [20]. Έκτοτε, σημειώθηκε συνεχής ανάπτυξη στον τομέα της τεχνολογίας λέιζερ που διευκολύνει τη χρήση της σε διάφορους τομείς της επιστήμης, της μηχανικής, της ιατρικής, της επεξεργασίας τροφίμων και άλλων δραστηριοτήτων.

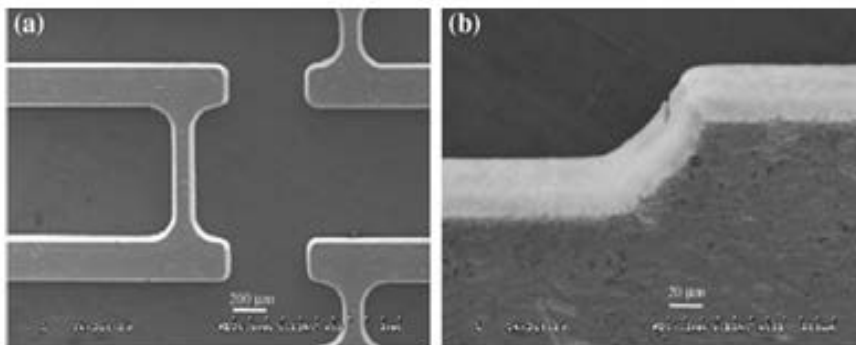
Το σχήμα 9 απεικονίζει την αρχή λειτουργίας της κοπής με δέσμη λέιζερ (LBM: laser beam machining). Πρόκειται για μια διαδικασία όπου μια ακτίνα λέιζερ υψηλής πυκνότητας ενέργειας (έντασης) χρησιμοποιείται για να θερμάνει γρήγορα την κατεργαζόμενη επιφάνεια-στόχο, και ακολούθως να τήξει και/ή εξατμίσει το υλικό-στόχο μέχρι ένα προβλεπόμενο βάθος κοπής, και να αποδώσει την απαιτούμενη γεωμετρία ή σχήμα ή να αφαιρέσει την απαιτούμενη ποσότητα υλικού [20, 21]. Το "Laser" ως εργαλείο χωρίς μάζα δεν υπόκειται σε φθορά και προσφέρει μεγάλη ευελιξία. Τα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα, τα λέιζερ Nd: YAG, ίνας και τα υπερβραχείος παλμού (femtosecond) λέιζερ είναι τα πιο κοινά λέιζερ που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αποβολής υλικού. Οι σημαντικές παράμετροι του λέιζερ, όπως η ισχύς του λέιζερ, η παλμική ενέργεια, η ταχύτητα σάρωσης, η εστιακή απόσταση και η πίεση του αερίου κ.λπ., επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας [21].

Όπως και με την κοπή δυσκατέργαστων υλικών, τη απόδοση ειδικών χαρακτηριστικών σε μικρο- και μέσο-κλίμακα, έτσι και τα κράματα μνήμης σχήματος επιδέχονται κοπής ακριβείας με χρήση δέσμης λέιζερ. Η κοπή με δέσμη Nd: YAG λέιζερ ενός κράματος NiTi πρέπει να γίνει με χαμηλή παλμική ενέργεια για να επιτευχθεί υψηλή γεωμετρική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας, και, επιπλέον, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί η βέλτιστη τιμή της απόστασης του ακροφυσίου (η οποία καθορίζει την ταχύτητα του αερίου) για την αποφυγή σχηματισμού σκουριάς και διαπλάτυνσης του πλάτους εγκοπής (kerf) [22]. Η ταχύτητα κοπής

ελέγχεται από την παλμική ενέργεια και η παλμική ενέργεια από την ισχύ της δέσμης λέιζερ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παλμική ενέργεια μπορεί να μεταβληθεί μεταβάλλοντας την μέγιστη ισχύ, ενώ διατηρείται σταθερό το πλάτος του παλμού. Με την υψηλή ταχύτητα κοπής επιτυγχάνεται μείωση της ενέργειας στη ζώνη κατεργασίας και έτσι παράγεται χαμηλός ρυθμός αποβολής υλικού (μείωση του kerf). Αντίθετα, σε υψηλή ταχύτητα, η έντονη απομάκρυνση του υλικού λόγω πρόσδοσης υψηλής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή τραχύτητα και έντονο kerf.



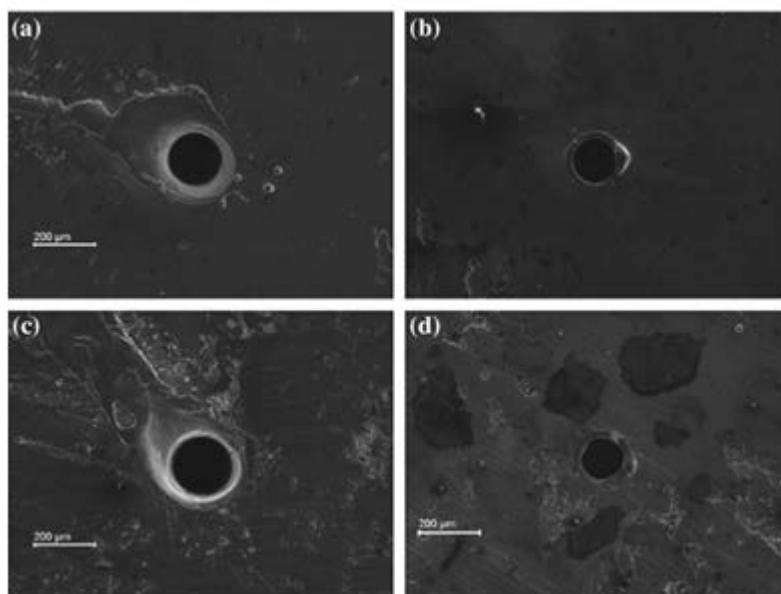
Εικόνα 9. Αρχή λειτουργίας της κατεργασίας με ακτίνες λέιζερ



Εικόνα 10. Μια αυτο-διαστελλόμενη ιατρική μικρο-συσκευή NiTi που κατασκευάστηκε με αποβολή υλικού με χρήση femtosecond λέιζερ (a) τυπικό μικρογράφημα, (b) μεγέθυνση μικρογραφήματος [24]

Μικροκοπή σωλήνων νικελίου-τιτανίου που χρησιμοποιούνται σε ιατρικές συσκευές έχει γίνει επίσης με χρήση δέσμης femtosecond λέιζερ [23]. Διάφορες στρατηγικές πάνω στη διαδρομή (πορεία) της κοπής με λέιζερ έχουν ερευνηθεί και η κοπή με πορεία ζιγκ-ζαγκ βρέθηκε να είναι πιο αποδοτική, διότι μειώνει δραστικά τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, τη συσσώρευση κονιοποιημένου αποβλήτου (debris) και το χρόνο κατεργασίας και βελτιώνει την απόδοση κατεργασίας και το κόστος παραγωγής [23].

Σε μια παρόμοια μελέτη, συνιστάται υψηλή ταχύτητα σάρωσης/κοπής για την επίτευξη χαμηλής θερμικής βλάβης και πιο λείας επιφάνειας, κατά τη κατεργασία με λέιζερ κράματος μνήμης NiTi για την κατασκευή μικροσκοπικών συσκευών ακριβείας [24]. Με βέλτιστη τιμή ταχύτητας σάρωσης 60 mm/min και θερμικής παροχής δέσμης 40 J/cm², κατασκευάστηκαν μερικά τμήματα ιατρικής μικρο-συσκευής (βλ. Σχήμα 10). Αυτά τα μέρη είναι απαλλαγμένα από τηγμένο στρώμα υλικού και χαρακτηρίζονται από υψηλή ποιότητα επιφάνειας.

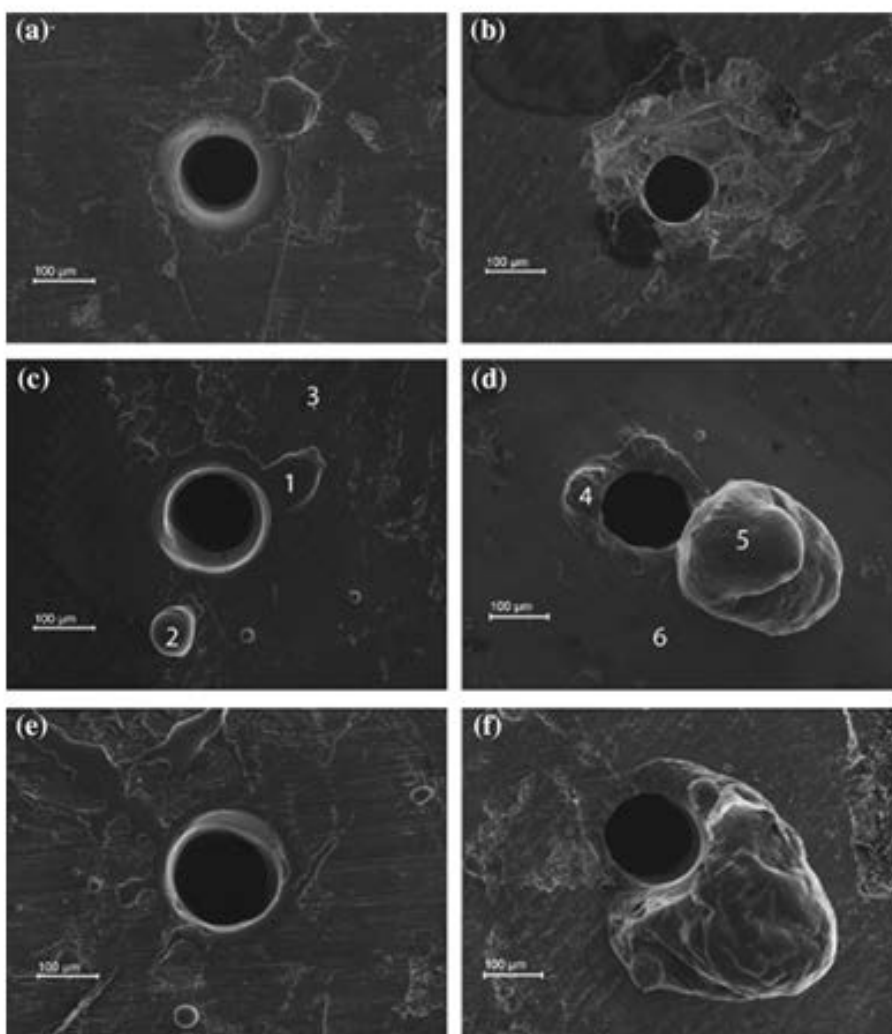


Εικόνα 11. Μικρογραφήματα SEM όπών στη διάτρηση με λέιζερ σε Ni₄₆Mn₂₇Ga₂₇ SMA σε ισχύ 500 W (είσοδος οπής αριστερά και εξόδου δεξιά), διάρκεια παλμού (a, b) 10 ms και (c, d) 25 ms [25]

Κράμα με μνήμη μορφής έχει επίσης υποστεί διάτρηση ακριβείας χρησιμοποιώντας fiber-laser [25]. Διανοίχθηκαν οπές σε φερρομαγνητικό κράμα μνήμης σχήματος Ni₄₆Mn₂₇Ga₂₇ με διάφορες τιμές διάρκειας παλμού και μέγιστης ισχύος. Εικόνες SEM της εισόδου και εξόδου των οπών που έχουν διανοιχθεί με λέιζερ φαίνονται στα Σχ. 11 και 12.

Παρατηρείται ότι αύξηση της διάρκειας παλμού αύξησε τον ρυθμό αποβολής υλικού καθώς και τη διάμετρο της οπής. Οι οπές με λέιζερ έχουν υψηλή γεωμετρική ακρίβεια, δηλ. εξαιρετική κυκλικότητα.

Η υδροκοπή με λειαντικούς κόκκους (AWJM) είναι επίσης μία από τις ευτύτερα χρησιμοποιούμενες μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού. Δέσμη νερού υψηλής ταχύτητας που μεταφέρει αποκεστικούς κόκκους χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο [26]. Η κινητική ενέργεια της εκτοξευόμενης δέσμης νερού υψηλής ταχύτητας μεταφέρεται στα λειαντικά σωματίδια και το μείγμα προσκρούει στο κατεργαζόμενο τεμάχιο εργασίας, για να αφαιρέσει την απαιτούμενη ποσότητα υλικού ή για να σχηματίσει ένα συγκεκριμένο σχήμα/γεωμετρία. Η πίεση εκτόξευσης της δέσμης, ο τύπος των λειαντικών κόκκων, το μέγεθος και η παροχή μάζας τους και η απόσταση stand-off είναι οι σημαντικότερες παράμετροι της κατεργασίας AWJM. Η κατεργασία αυτή προσφέρει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως: μειωμένες απώλειες, απουσία θερμικά επηρεασμένης ζώνης, χαμηλή περιβαλλοντική ρύπανση και απουσία υγρού κοπής κλπ. Η κατεργασία έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην κατασκευή μηχανικών εξαρτημάτων υψηλής ακριβείας, και στην κοπή δυσκατέργαστων υλικών [26-28].



Εικόνα 12. SEM μικρογραφήματα οπών στη διάτρηση με λέιζερ σε $Ni_{46}Mn_{27}Ga_{27}$ SMA σε ισχύ 1000 W (είσοδος οπής αριστερά και εξόδου δεξιά), διάρκεια παλμού (a, b) 1 ms, (c, d) 10 ms, (e, f) 25 ms [25]

Οι Kong et al. [29] διεξήγαγαν σε $Ni_{49.8}Ti_{50.2}$ επίπεδο φρεζάρισμα και φρεζάρισμα με δέσμη νερού με λειαντικούς κόκκους garnet. Κατά το επίπεδο φρεζάρισμα στις μαρτενσιτικής δομή NiTi προκλήθηκε υπερβολική παραμόρφωση και σκλήρυνση του υλικού που οδήγησε στη δυσκολία ελέγχου του βάθους κοπής και της επιπεδότητας στο τεμάχιο. Η κατεργασία με δέσμη ύδατος με λειαντικούς κόκκους βρέθηκε πιο κατάλληλη για τον έλεγχο του βάθους διείδυσης και των παραμέτρων της πιστότητας επιφάνειας. Παρατηρήθηκε μόνο μερική ενσωμάτωση λειαντικών κόκκων που θα μπορούσε εύκολα να αποφευχθεί διατηρώντας την ταχύτητα χαμηλή ή εφαρμόζοντας στη συνέχεια επίπεδη waterjet ως τεχνική μετεπεξεργασίας.

Η κατεργασία με δεσμη ύδατος με λειαντικούς κόκκους σε NiTi πλάκες διαφορετικού πάχους έχει διεξαχθεί με διάφορες παραμέτρους διεργασίας, όπως πίεση εκτόξευσης νερού 70-345 MPa, ταχύτητα μετακίνησης 1-500 mm / min, παροχής μάζας αποξεστικού υλικού - 0.1-0.76 kg / min και απόστασης ακροφυσίου 1-5 mm [30]. Έχει επιτευχθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός ταχύτητας κοπής 5 mm / min και πίεσης 345 MPa, παροχής μάζας 0,26 kg / min με stand-off απόσταση 3 mm για κατεργασία ακριβείας NiTi και την επίτευξη μικρών τιμών kerf. Η έκταση ενσωμάτωσης των κόκκων έχει διαπιστωθεί ότι αυξάνεται από τη μεσαία περιοχή προς άκρα, λόγω του χρόνου παραμονής της δέσμης και της καθυστέρησης εκτόξευσης νερού. Η ελάχιστη παγίδευση σωματιδίων και δέσμης στην μεσαία περιοχή μείωσε προφανώς την ενσωμάτωση κόκκων.

Συνολικά, συνιστάται η AWJM για κοπής ακριβείας κραμάτων μνήμης σχήματος ακολουθούμενη από υδροκοπή ως δευτερεύουσα τεχνική φινιρίσματος.

2.3 Αειφορική επεξεργασία των κραμάτων μνήμης σχήματος

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι προηγμένες ή μη συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού, όπως η ηλεκτροδιάβρωση, η κοπή με δέσμη laser, και η υδροκοπή με λειαντικούς κόκκους, έχουν καταδείξει με επιτυχία την ικανότητά τους να βελτιώνουν την κατεργασιμότητα των SMAs. Λαμβάνοντας όμως υπόψη την οικονομική αποδοτικότητα, τις ειδικές γεωμετρικές και διαστατικές απαιτήσεις, την ποιότητα του τελικού προϊόντος και την ευκολία διαθεσιμότητάς του, οι συμβατικές κατεργασίες αποβολής υλικού εξακολουθούν να διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο για την κατασκευή μεγάλης γκάμας εξαρτημάτων από SMAs. Η κατεργασία στις βέλτιστες παραμέτρους και η χρήση αποτελεσματικών υλικών εργαλείων, γεωμετριών και επικαλύψεων, έχουν οδηγήσει επιτυχώς στη βελτίωση της κατεργασιμότητας των SMAs.

Επιλέγοντας τις βέλτιστες παραμέτρους κοπής, οι Lin et al. [31] βελτίωσαν με επιτυχία την κατεργασιμότητα των κραμάτων NiTi κατά τη διάτρηση και τη μηχανική κοπή. Η βέλτιστη ικανότητα διάτρησης, όσον αφορά τις βέλτιστες τιμές των δυνάμεων κοπής, του χρόνου κατεργασίας και της διάρκειας ζωής του εργαλείου παρατηρήθηκαν με το ελικοειδές τρυπάνι καρβιδίου βολφραμίου με περιστροφική ταχύτητα 163 rpm και ταχύτητα πρόωσης 0,07 mm / rev.

Μια σειρά πειραματικών εργασιών που πραγματοποιήθηκαν από τους Weinert et al. [32-34] επικεντρώθηκε στην τόννευση, τη διάτρηση και το φρεζάρισμα των κραμάτων μνήμης NiTi.

Οι δυνάμεις κοπής, η φθορά εργαλείων και η σκλήρυνση της κατεργασμένης επιφάνειας αποτελέσαν τα κύρια κριτήρια για την αξιολόγηση της αντίστοιχης κατεργασίας. Μετά την τόνρευση των κραμάτων NiTi σε διαφορετικές ταχύτητες κοπής (χαμηλή-μέση-υψηλή), οι Weinert και Petzoldt [3] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα κοπής των 100 m / min ταιριάζει καλύτερα στις βέλτιστες τιμές των δυνάμεων κοπής, της φθοράς εργαλείων και του σχηματισμού τελικού γρεζιού (burr) . Επιπλέον, οι χαμηλές ταχύτητες πρόωσης βρέθηκαν ότι ευνοούν το σχηματισμό burr και τη φθορά εργαλείων, οπότε συνιστάται αυστηρά να μην επιλέγονται. Αντίθετα, για τη διάτρηση με μέση ταχύτητα κοπής SMA (30-60 m / min) και με υψηλότερες ταχύτητες πρόωσης βρέθηκαν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Μια άλλη πειραματική μελέτη που διεξήχθη από τους Weinert et al. [32] συνιστά τη χρήση επικαλυμμένων (πολλαπλών στρώσεων) εργαλείων καρβιδίου για την ελαχιστοποίηση της φθοράς του εργαλείου κατά την τόνρευση του κράματος NiTi. Με την επιλογή των βέλτιστων πρακτικών κοπής όπως είναι η χρήση επικαλυμμένων εργαλείων και η κατεργασία σε βέλτιστες συνθήκες, κλπ. οι Weinert et al κατεργάστηκαν με επιτυχία ένα σύνδεσμο σωλήνων από NiTiNb για τη σύνδεση υδραυλικών γραμμών.

Για την παραγωγή σωλήνα NiTi που χρησιμοποιείται σε ιατρικές εφαρμογές. το υλικό πρέπει να υποβληθεί σε διάτρηση μεγάλου βάθους. Σε μια σημαντική μελέτη, χρησιμοποιώντας τρυπάνια απλής κόπης (single-lip), από συγκολλημένο καρβίδιο, κατασκευάστηκαν επιτυχώς σωλήνες NiTi υψηλής γεωμετρικής ακρίβειας και εξαιρετικής ποιότητας επιφάνειας [34].

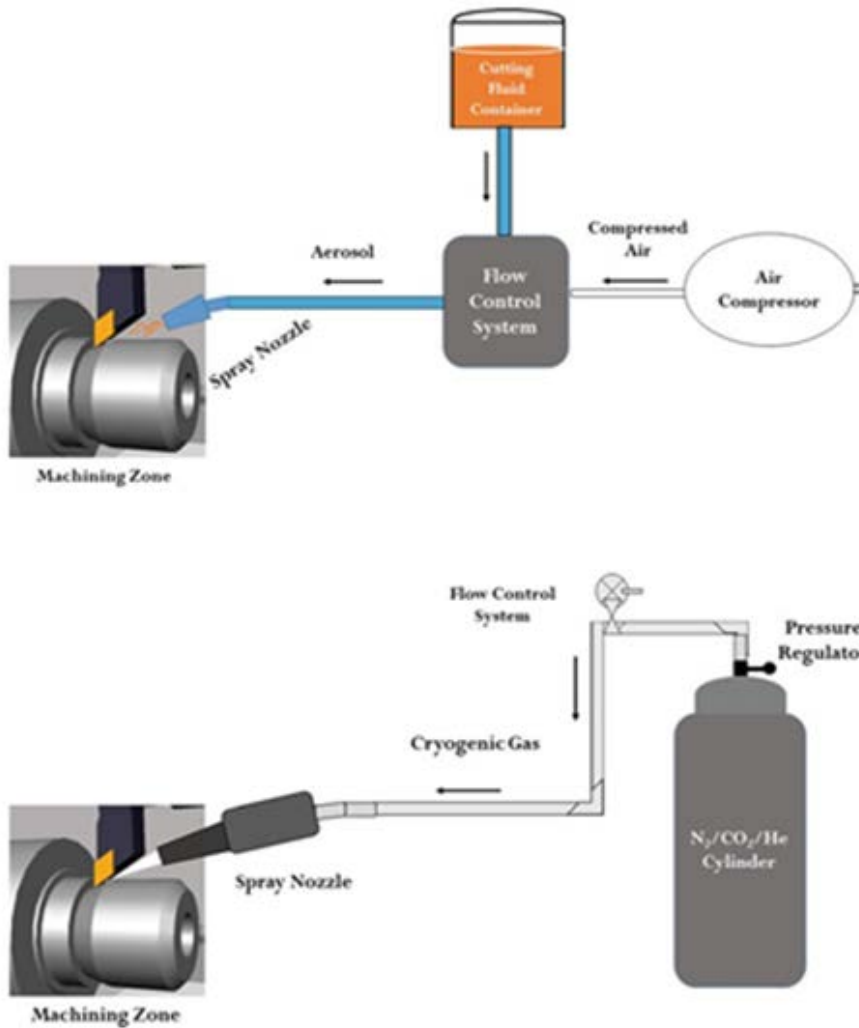
Οι στρατηγικές βιώσιμης κατεργασίας, ιδιαίτερα η χρήση οικολογικών λιπαντικών και προηγμένες τεχνικές ψύξης και λίπανσης, έχουν συναντήσει σημαντική προτεραιότητα και έχουν διευκολύνει τη συμβατική κοπή με υψηλά επίπεδα κατεργασιμότητας. Ο συνδυασμός των βέλτιστων παραμέτρων, επικαλύψεων εργαλείων κ.λπ., με βιώσιμες τεχνικές, έχει πιο έντονες επιπτώσεις στην κατεργασιμότητα.

Η λίπανση ελάχιστης ποσότητας (MQL: Minimum quantity lubrication) είναι μια τεχνική μικρο-λίπανσης όπου παρέχεται μικρή ποσότητα οικολογικού λιπαντικού στη ζώνη κατεργασίας [4]. Διευκολύνει την σχεδόν-ξηρή κατεργασία και παρέχει ομοιόμορφη λίπανση στη διεπιφάνεια εργαλείου/αποβλίττου καλύτερα από ό,τι με την ψύξη. Η τεχνική MQL διαχειρίζεται τη θερμότητα μειώνοντας την τριβή μεταξύ του αποβλίττου και του εργαλείου και έτσι εμποδίζει τη θερμότητα να παραχθεί και προστατεύει το εργαλείο και την κατεργασμένη επιφάνεια από τις δυσμενείς επιδράσεις της υψηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον, βελτιώνει τη διάρκεια ζωής εργαλείου, ενισχύει την πιστότητα επιφάνεια του τεμαχίου, διευκολύνει την απομάκρυνση των αποβλίτων και διασφαλίζει την ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος. Στην MQL, στη ζώνη μηχανικής κατεργασίας εξαιρετικά βιοδιασπώμενα και φιλικά προς το περιβάλλον οικολογικά λιπαντικά, όπως λιπαρά οξέα, συνθετικοί εστέρες, φυτικά έλαια κλπ., αναμιγνύονται με πεπιεσμένο αέρα σε παροχές μεταξύ 10 και 300 ml / h, σε αντίθεση με την υψηλή κατανάλωση υγρού (μερικά λίτρα ανά λεπτό) κατά τη συμβατική ψύξη [35, 36].

Η συμβατική υγρή ψύξη χρησιμοποιεί βλαβερά υγρά κοπής με βάση υδρογονάνθρακες που μπορεί να επηρεάσουν την υγεία του χειριστή, προκαλούν έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οδηγούν σε υψηλό κόστος παραγωγής. Επιπλέον, η αναποτελεσματική ψύξη προκαλεί ακραία έντονη φθορά εργαλείων, υποβάθμιση της ποιότητας της κατεργασμένης επιφάνειας και αναποτελεσματικότητα ενέργειας και πόρων [35, 36].

Το Σχήμα 13 απεικονίζει ένα σύστημα MQL το οποίο αποτελείται από μια δεξαμενή υγρού κοπής / λιπαντικού, μια πηγή παροχής πεπιεσμένου αέρα, ακροφύσιο και δίκτυο σωληνώσεων. Στο σύστημα ελέγχου ροής, ο ψεκασμός του υγρού κοπής λαμβάνει χώρα και αλληλεπιδρά με τον ισχυρά πεπιεσμένο αέρα. Το ψεκαζόμενο υγρό κοπής με τη μορφή "μικρο-σταγονιδίων" φέρεται στη ζώνη κατεργασίας μέσω σωληνώσεων και ακροφυσίου με ελεγχόμενη ταχύτητα ροής και πίεση αέρα. Ο ρυθμός ροής, η πίεση του αέρα, η γωνία του ακροφυσίου και η απόσταση είναι μερικές σημαντικές παράμετροι της διαδικασίας MQL.

Η κρυογονική ψύξη (Cryogenic cooling) είναι μια άλλη βιώσιμη τεχνική λίπανσης και ψύξης που χρησιμοποιεί κρυογονικά αέρια όπως άζωτο, ήλιο και διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικά μέσα για μηχανική κατεργασία. Αυτά τα αέρια εξατμίζονται στον αέρα και διατηρούν το περιβάλλον καθαρό και "πράσινο" [4]. Η δεξαμενή κρυογονικού αερίου, τα μετρητικά πίεσης και το σύστημα ελέγχου της ροής, το ακροφύσιο και οι σωληνώσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 13, είναι τα σημαντικά μέρη ενός κρυογονικού συστήματος ψύξης. Λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή του ψεκασμού υγρού αζώτου (σε θερμοκρασία περίπου -200°C) μέσω ακροφυσίου μικρής διαμέτρου στη ζώνη κατεργασίας. Ενώ απορροφά θερμότητα κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας, το υγρό άζωτο σχηματίζει ένα προστατευτικό στρώμα που καλύπτει την επιφάνεια του εργαλείου και μειώνει τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια εργαλείου/αποβλίττου. Αυξάνει τη διάρκεια ζωής του εργαλείου μειώνοντας τη χημική αντίδραση μεταξύ του εργαλείου και του αποβλίττου. Τα απόβλιττα που παράγονται με αυτή την τεχνική ανακυκλώνονται εύκολα καθώς δεν υπάρχουν υπολείμματα λαδιού πάνω σ' αυτά.



Εικόνα 13. Σχηματική παράσταση του συστήματος MQL και κρυογονικής ψύξης

Όσον αφορά τα δυσκατέργαστα υλικά (συμπεριλαμβανομένων των κραμάτων μνήμης σχήματος), όπου η υψηλή χημική δραστηριότητα σε αυξημένη θερμοκρασία, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η υψηλή σκληρότητα και ο ρυθμός καταπόνησης είναι οι κύριες προκλήσεις, η MQL είναι μια αποτελεσματική τεχνική που παίζει ζωτικό ρόλο στο να υπερνικήσει αυτά τα προβλήματα που σχετίζονται με την κατεργασιμότητά τους. Οι προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες έχουν δείξει σημαντική βελτίωση της κατεργασιμότητας των κραμάτων μνήμης σχήματος μετά από χρήση τεχνικών βιώσιμης ψύξης και λίπανσης, δηλ. MQL και κρυογονικής ψύξης.

Πίνακας 1. Σύνοψη των προηγούμενων εργασιών σχετικά με τη βιώσιμη συμβατική μηχανική κατεργασία SMAs

	Ερευνητές	Τύπος κράματος με μνήμη σχήματος	Κατεργασία που χρησιμοποιείται
1	WeinertandPetzoldt [3]	NiTi (Nitanol)	Τόρνευση (Turning)
2	Lin et al. [31]	NiTi	Διάτρηση και μηχανική κοπή (Drilling and mechanical cutting)
3	Weinert et al. [32]	NiTi	Τόρνευση (Turning)
4	Weinert and Petzoldt [33].	NiTi	Μικροφρεζάρισμα (Micro-milling)
5	Weinert and Petzoldt [34]	NiTi	Διάτρηση βαθιάς οπής (Deep hole drilling)
6	Biermann et al. [37, 38]	NiTi	MQL βασισμένη σε μικρο-φρεζάρισμα
7	Piquard et al. [39, 40]	NiTi	Απλό και MQL μικροφρεζάρισμα
8	Shyha et al. [41]	Kovar	Ξηρή διάτρηση (Dry Drilling)
9	Kaynak et al. [42–45].	NiTi	Τόρνευση σε ξηρές, MQL και κρυογονικές συνθήκες ψύξης/λίπανσης
10	Zailani and Mativenga [46]	NiTi	Μικροφρεζάρισμα με ψύξη μέσω πεπιεσμένου αέρα και σε συνθήκες MQL
11	Kuppuswamy and Yui [47]	NiTi	Μικροφρεζάρισμα λίαν υψηλής ταχύτητας και σε συνθήκες MQL με Johnson baby oil))
12	Akbari et al. [48]	NiTi	Τόρνευση με χρήση υπερήχων

Η παρακάτω ενότητα παρουσιάζει διάφορες σημαντικές πτυχές της εργασίας που διεξάγουν ερευνητές με σκοπό την ενίσχυση της κατεργασιμότητας των κραμάτων μνήμης σχήματος με χρήση βιώσιμων τεχνικών κατεργασίας.

Σε μια εργασία βασισμένη στην οικολογική κοπή των κραμάτων μνήμης σχήματος, η τεχνική ελάχιστης ποσότητας λιπαντικού (MQL) με στεατέλαιο χρησιμοποιήθηκε από τους Weinert και Petzoldt [33, 34]. Η ισχυρή τάση πρόσφυσης του κράματος μνήμης σχήματος στο εργαλείο κοπής ήταν ο κύριος λόγος για την εφαρμογή της MQL. Δεν βρέθηκαν προσφύσεις NiTi μετά από μικρο-φρεζάρισμα σε συνθήκες MQL με κοπτήρες καρβιδίου επικαλυμμένους με TiAlN. Μια υψηλή ταχύτητα πρόωσης σε συνδυασμό με μεγάλο πλάτος κοπής εξασφαλίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής εργαλείου και μειωμένο σχηματισμό ταπομένου γρεζιού (burr). Η μελέτη διευκολύνει την παραγωγή μικροσκοπικών αντικειμένων από κράμα NiTi με μικρο-φρεζάρισμα.

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει περιληπτικά (μετά από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση) προηγούμενες εργασίες πάνω στη συμβατική κατεργασία των κραμάτων μνήμης σχήματος (SMAs).

Μια πειραματική ανάλυση βασισμένη στην προσομοίωση της μικρο-διάτρησης βαθιάς οπής των SMA έχει χρησιμοποιήσει συνδυασμένες στρατηγικές επιστρώσεων εργαλείων και ελάχιστης λίπανσης [37, 38]. Χρησιμοποιήθηκαν κοπτήρες καρβιδίου σφαιρικής κεφαλής με δύο πτερύγια, επικαλυμμένα μέσω PVD με TiAlN και με διάμετρο 1 mm για φρεζάρισμα και μονοπτερύγια τρυπάνια (επικαλυμμένα και μη επικαλυμμένα) με διαμέτρους κυμαινόμενες από 0,5 έως 1,5 mm και μερικά τυπικά ελικοειδή τρυπάνια. Ορισμένα από τα συμπεράσματα της εργασίας τους είναι ότι: ένας συνδυασμός υψηλού πλάτους κοπής και χαμηλού βάθους κοπής οδηγεί σε μέτρια φθορά εργαλείων, για ελάχιστη άρωση και σχηματισμό burrs η

κίνηση του κοπτήρα πρέπει να γίνεται κάθετα προς την κλίση του πάχους αποβλίττου και να δείχνει προς την κατεύθυνση του ακατέργαστου υλικού, οι παραγόμενες οπές με διάμετρο μικρότερη από 0,5 mm και βάθος μέχρι 15 mm μπορούν να τρυπηθούν με υψηλής ποιότητας ελικοειδή τρυπάνια, τα οποία έχουν καλύτερη απόδοση και επιτρέπουν τη διάτρηση του NiTi SMA σε πολύ μεγαλύτερα βάθη διάτρησης και ταχύτητες κοπής λόγω ελαχιστοποίησης της τριβής μεταξύ του εργαλείου και του τοιχώματος της οπής, καθώς και της φθοράς πρόσφυσης [37, 38].

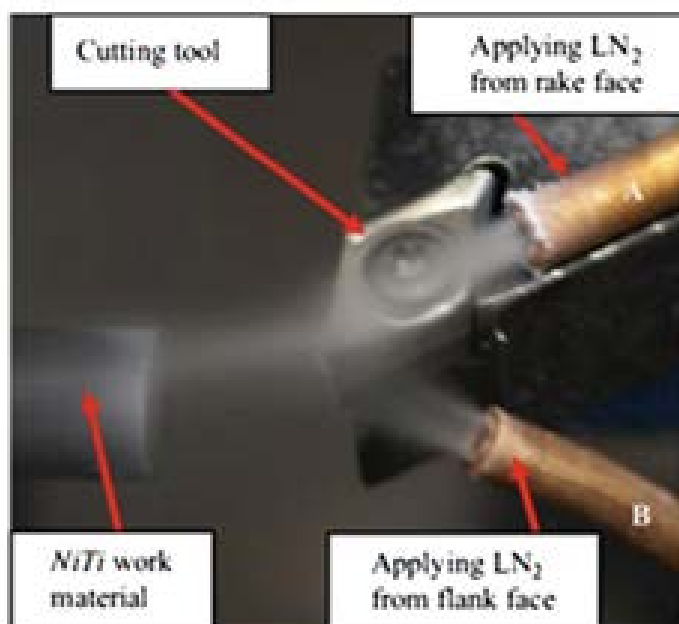
Μια άλλη έρευνα πάνω στο σχηματισμό burrs και τα χαρακτηριστικά του μετασχηματισμού φάσεων κατά τη διάρκεια μετωπικού μικρο-φρεζαρίσματος NiTi οδήγησε σε αποτελεσματική βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μηχανουργικής κατεργασίας, και την επίτευξη σημαντικής βελτίωσης της κατεργασιμότητας [39, 40]. Επικαλυμμένα κονδύλια διαμέτρου 0,8 mm και δύο δόντια με γωνία 25° έλικα χρησιμοποιήθηκαν για το μικρο-φρεζάρισμα. Χρησιμοποιήθηκε επίσης και τεχνική MQL σε πίεση αέρα 6 bar και ρυθμός ροής 1,6 ml / λεπτό για στεατέλαιο. Τα πειράματα σχεδιάστηκαν και διεξήχθησαν με βάση τον half factorial σχεδιασμό της επίδρασης του βάθους κοπής, του πλάτους κοπής, της ταχύτητας κοπής, της πρόωσης ανά δόντι, της στρατηγικής (ομόρροπο και αντίρροπο φρεζάρισμα) επί της κατεργασιμότητας κράματος NiTi. Προτείνονται χαμηλότερες τιμές πρόωσης ανά δόντι και μικρότερο πλάτος κοπής για μικρότερα burrs και αντίρροπο φρεζάρισμα για λεπτότερα burrs. Η βελτιστοποίηση έγινε για να διευκολυνθεί η μηχανική κατεργασία σε υψηλή ταχύτητα κοπής με ελάχιστο σχηματισμό burrs.

Έχει διεξαχθεί ξηρή διάτρηση των Kovar SMAs με ελικοειδή τρυπάνια HSS [41]. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε συνθήκες ξηρής κοπής, σε κλίμακα στροφών ατράκτου 450-3750 rpm σε μη επεξεργασμένα και υποστηριζόμενα τεμάχια από κράμα Kovar. Η ταχύτητα κοπής βρέθηκε να είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά πιστότητας επιφάνειας του Kovar. Μικρότερη ταχύτητα πρόωσης και ταχύτητα κοπής μαζί με μικρότερης διαμέτρου τρυπάνια επιφέρουν ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας κοπής και συνεπώς βελτίωση της πιστότητα επιφάνειας, δηλ. μείωση της θερμικής σκλήρυνσης και του μεγέθους των burrs και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δημιουργίας νέων μικρο-ρωγμών κλπ.

Στις ερευνητικές εργασίες σχετικά με τη χρήση προηγμένων τεχνικών ψύξης και λίπανσης για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας των SMAs συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό οι Kaynak et al. [42-45]. Έγινε μια λεπτομερής και συστηματική διερεύνηση των επιπτώσεων της ξηρής μηχανουργικής κατεργασίας, της κρυογονικής ψύξης και των συνθηκών MQL στην κατεργασιμότητα (ειδικά στη φθορά εργαλείων και την ποιότητα επιφάνειας) των κραμάτων μνήμης NiTi. Σε μια σειρά πειραματικών εργασιών, οι Kaynak et al. βρήκαν την κρυογονική μηχανική κατεργασία ως πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας των NiTi SMAs [42-45]. Οι επιδράσεις των ξηρών, κρυογονικών, με προθέρμανση και MQL συνθηκών στα χαρακτηριστικά μηχανουργικής κατεργασίας αξιολογούνται και αναλύονται διεξοδικά. Χρησιμοποιήθηκε υγρό άζωτο στα 1,5 MPa ως κρυογονικό ψυκτικό, ενώ οι 175 ° C επιλέχθηκε ως θερμοκρασία προθέρμανσης για προθερμασμένη μηχανική κατεργασία και τα 60 ml / h ως παροχή και τα 0,4 MPa ως πίεση αέρα για MQL σε διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων κατεργασίας. Ένα από τα άρθρα τους [42] αναφέρεται σε τόννευση υπό συνθήκες ξηρής κοπής, με προθέρμανση και κρυογονικής κατεργασίας σε τρία επίπεδα ταχύτητας κοπής (12,5-25-50 m / min).

Το σχήμα 14 απεικονίζει κρυογονική διάταξη ψύξης που έγινε από τους Kaynak et al. για το εργαλείο κοπής κατά την τόννευση SMA.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 15, η μελέτη της φθοράς εργαλείου αποκαλύπτει μια σημαντική αύξηση στη φθορά στην περιοχή της “μύτης” του εργαλείου σε περίπτωση ξηρών συνθηκών και συνθηκών προθέρμανσης, σε σύγκριση με την κρυογονική κατεργασία, με αύξηση της ταχύτητας κοπής. Επιπλέον, η δύναμη κοπής μειώθηκε με αυξανόμενη ταχύτητα κοπής υπό την επίδραση συνθηκών κρυογονικής κατεργασίας (Εικ. 16).



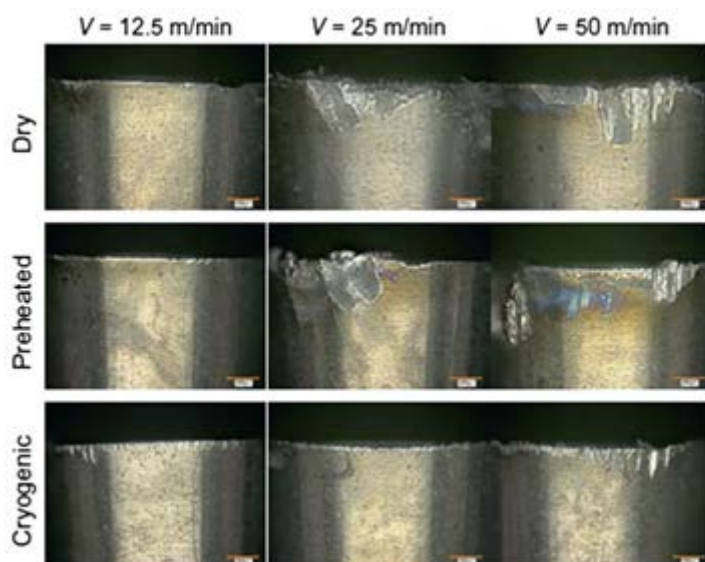
Εικόνα 14. Το σύστημα παροχής υγρού αζώτου που αναπτύχθηκε από τους Kaynak et al. όπου ένα ακροφύσιο τοποθετείται στην επιφάνεια του εργαλείου και ένα άλλο στην όψη της πλευράς (οι διάμετροι των ακροφυσίων είναι 4,78 mm, το ακροφύσιο B σχηματίζει γωνία 55 ° με την επιφάνεια του εργαλείου) [43]

Μια άλλη μελέτη από τους Kaynak et al. [43] αναφέρεται κυρίως στο ζήτημα της φθοράς των εργαλείων κατά την τόννευση, χρησιμοποιώντας συνθήκες κρυογονικής, ξηρής και MQL μηχανικής κατεργασίας. Πραγματοποιήθηκαν δύο κατηγορίες πειραμάτων, η πρώτη για τη διερεύνηση της φθοράς των εργαλείων σε διάφορα επίπεδα ταχύτητας κοπής (12,5-25-50-100 m / min) και η δεύτερη για την προοδευτική φθορά εργαλείων σε σταθερή ταχύτητα κοπής στα 25 m / min. Το σχήμα 17 παρουσιάζει την εξέλιξη της μέγιστης φθοράς εγχοπών με ταχύτητες κοπής υπό συνθήκες ξηρής, MQL και κρυογονικής κατεργασίας. Η αυξημένη ταχύτητα κοπής, πέραν των 25 m / min, οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλή φθορά εργαλείων και μειωμένη διάρκεια ζωής τους, ιδιαίτερα στις συνθήκες ξηρής και MQL κατεργασίας, ενώ η κρυογονική ψύξη έχει μειώσει σημαντικά τη θερμοκρασία κοπής και, κατά συνέπεια, τη φθορά και την αστοχία του εργαλείου και έτσι εξασφάλισε την απουσία δυσμενών θερμικών επιδράσεων. Αναφέρεται επίσης ότι η κρυογονική ψύξη παρέχει τη μεγαλύτερη σταθερή κατάσταση μέγιστης φθοράς στη “μύτη” λόγω της προστασίας του εργαλείου κοπής από την ταχεία φθορά του εργαλείου.

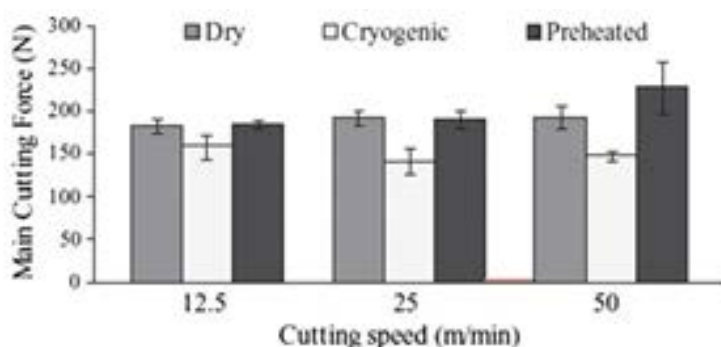
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κρυογονική ψύξη είναι η καλύτερη επιλογή μεταξύ των τριών συνθηκών που υιοθετήθηκαν για τη βελτίωση της επεξεργασιμότητας των NiTi SMAs. Παραδόξως, τα αποτελέσματα που ελήφθησαν σε συνθήκες MQL είναι αναποτελεσματικά

και υποδεικνύουν τη χρήση είτε κρυογονικών είτε συζευγμένων με MQL κρυογονικών συνθηκών για την συμβατική μηχανική κατεργασία των SMAs.

Κάποια άλλη σημαντική βιβλιογραφία από τους Kaynak et al. [44, 45] αναφέρθηκε στην ενίσχυση της ομοιομορφίας της επιφάνειας του NiTi υπό την επίδραση διαφόρων τεχνικών ψύξης και λίπανσης. Η τόννευση των κραμάτων NiTi διεξήχθη με πρόωση 0,5 mm / rpm, βάθος κοπής 0,5 mm και δύο τιμές ταχύτητας κοπής, δηλ. 12,5 και 100 m / min [44]. Έχει ερευνηθεί ότι σε υψηλή ταχύτητα, η ομοιομορφία επιφάνειας των κρυογονικά επεξεργασμένων δειγμάτων είναι πολύ καλύτερη από των ξηρών δειγμάτων (βλ. εικόνα 18).



Εικόνα 15. Χαρακτηριστικά της φθοράς εργαλείων σε διάφορες ταχύτητες κοπής και συνθήκες ψύξης / προθέρμανσης ($f=0,1$ mm / rev. $d = 0,5$ mm) [42]

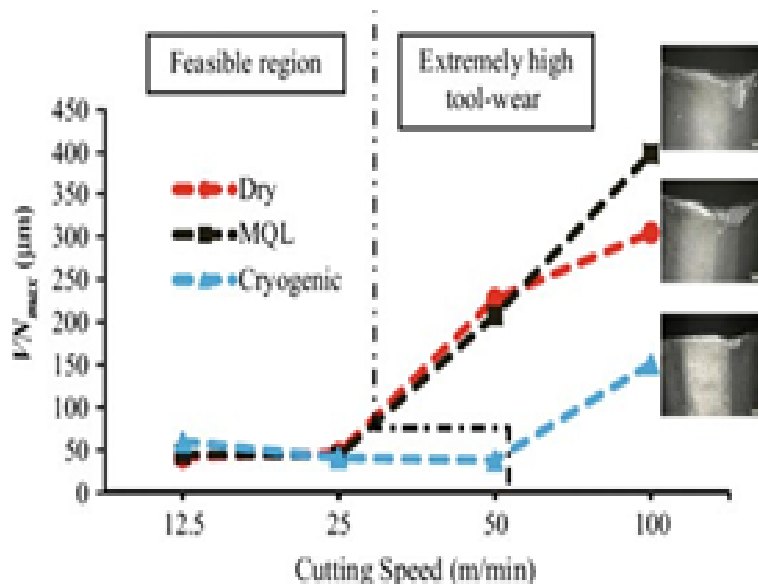


Εικόνα 16. Μεταβολή της κύριας δύναμης κοπής με την ταχύτητα κοπής και ψυχρές / προθερμανθείσες συνθήκες (π.χ. $f=0,1$ mm / rev. $d = 0,5$ mm) [42]

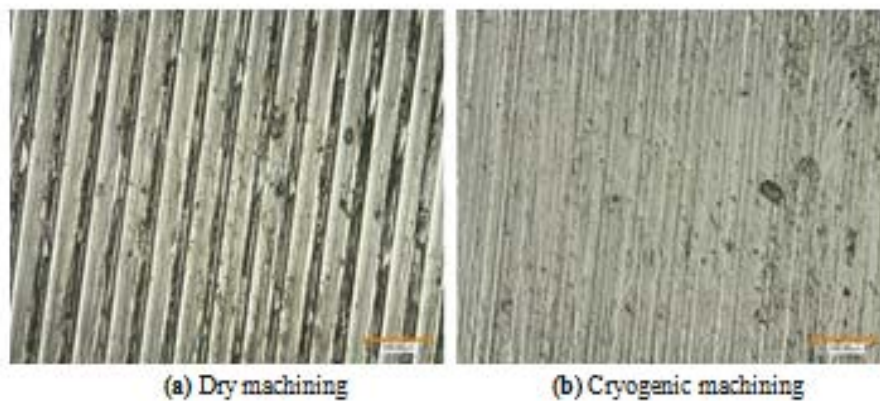
Η μειωμένη φθορά του εργαλείου και θερμική παραμόρφωση αναγνωρίστηκαν ως οι κύριοι λόγοι για την παραγωγή ομαλότερης επιφάνειας στην κρυογονική κατεργασία με υψηλή ταχύτητα κοπής.

Λόγω της δημιουργίας πιο λείας και με μικρότερες κορυφές και κοιλάδες κατεργασμένης επιφάνειας με κρυογονική κατεργασία και σε υψηλή ταχύτητα κοπής, η τραχύτητα

επιφάνειας (0,4 μm) μειώθηκε σημαντικά σε σύγκριση με αυτή της ξηρής κατεργασίας (1,4 μm).



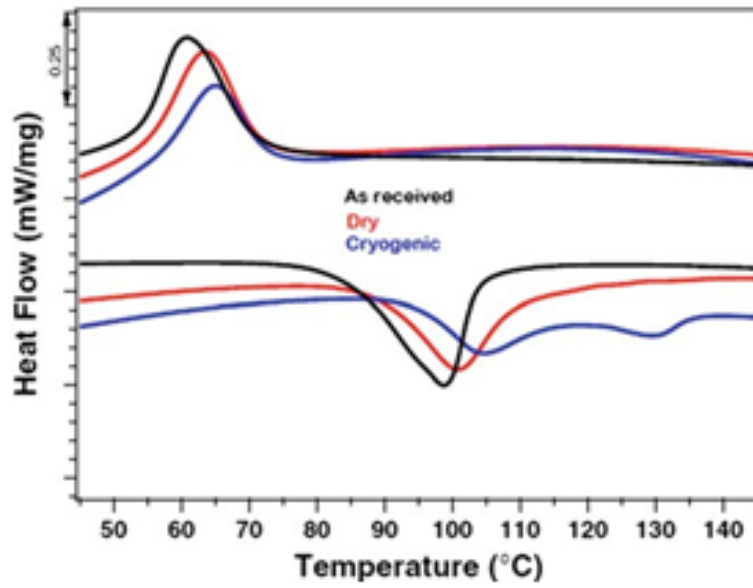
Εικόνα 17. Εξέλιξη της εγκοπής υπό διαφορετικές συνθήκες ψύξης [43]



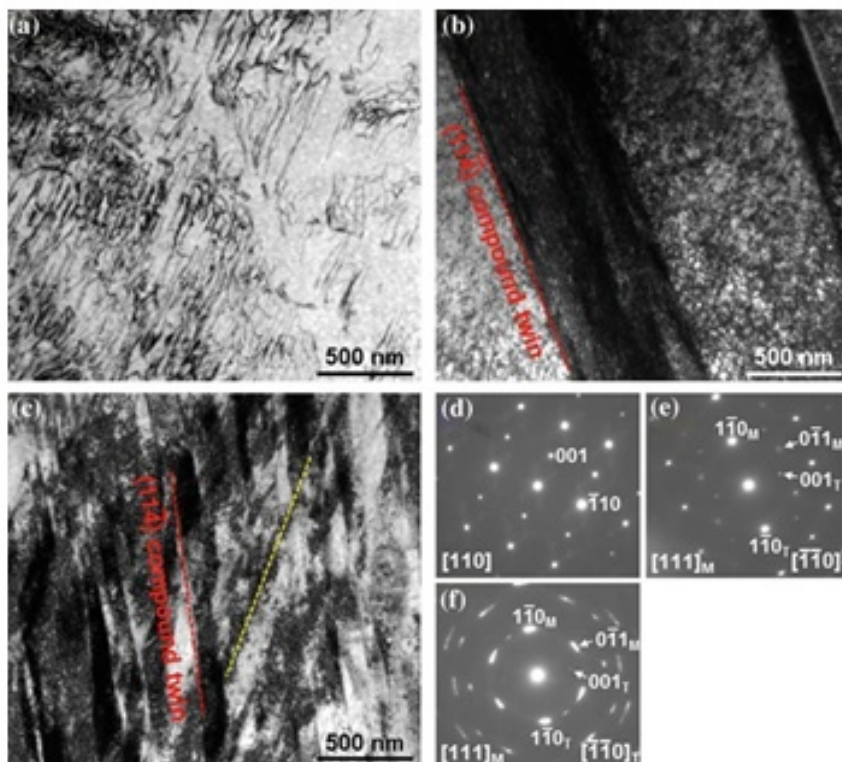
Εικόνα 18. Επιφανειακή τοπογραφία κατεργασμένων κραμάτων NiTi στα 100 m / min [44]

Με βάση τα αποτελέσματα από τη θερμοδομετρία διαφορικής σάρωσης (DSC: differential scanning calorimetry) και την ανάλυση των επεξεργασμένων δειγμάτων, οι Kaynak et al. [45] παρατήρησαν ότι οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού του μαρτενσίτη σε ωστενίτη είναι υψηλότερες και η κορυφή της καμπύλης μετασχηματισμού πιο πλατιά (βλέπε σχήμα 19) σε κρυογονικά επεξεργασμένο δείγμα από ό,τι για το ξηρό κατεργασμένο δείγμα. Κατά συνέπεια, παραμένουσες τάσεις και πυκνότητα διαταραχών στην επιφάνεια και στα κάτωθεν αυτή στρώματα του κρυογονικώς κατεργασμένου δείγματος αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερες από του ξηρού κατεργασμένου δείγματος. Αυτό αποδεικνύει την έντονη

επίδραση της κρυογονικής κατεργασίας επί των χαρακτηριστικών της ομοιομορφίας επιφάνειας των κραμάτων NiTi.



Εικόνα 19. Η σύγκριση των αποκρίσεων DSC σε ξηρά κατεργασμένα και κρυογονικά επεξεργασμένα δείγματα [44]



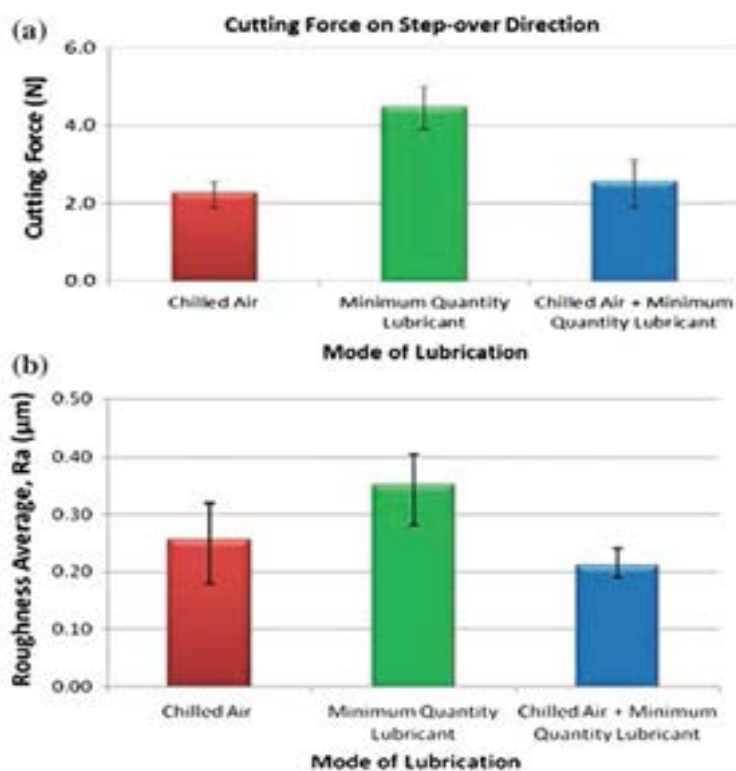
Εικόνα 20. Μικρογραφίες SEM φωτεινού πεδίου **a** όπως ελήφθη, **b** ξηρού κατεργασμένου και **γ** κρυογονικά κατεργασμένων δειγμάτων. **d**, **e** και **f** είναι επιλεγμένα πρότυπα περίθλασης περιοχής (selected-area diffraction patterns) που λαμβάνονται από **a**, **b** και **c**, αντίστοιχα [45]

Μερικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν με 6,25 m / min [45]. Τα μικρογραφήματα TEM που αναπαριστούν τη μικροδομή του παραληφθέντος υλικού, για το ξηρό κατεργασμένο δείγμα και το κρυογονικά κατεργασμένο δείγμα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 20, το οποίο απεικονίζει τις εικόνες φωτεινού πεδίου των ξηρών και των κρυογονικών δειγμάτων, αντίστοιχα. Η πυκνότητα των ζωνών διδυμίας είναι υψηλότερη στο κρυογονικά κατεργασμένο δείγμα σε σύγκριση με το ξηρό. Το κρυογονικό δείγμα είχε επίσης μεγαλύτερη πυκνότητα διαταραχών (dislocation density). Η πολύ υψηλή κατανομή σκληρότητας στα επιφανειακά στρώματα δικαιολογείται ως ο κύριος λόγος γι' αυτό το φαινόμενο.

Η πλήρης μελέτη τους αποκαλύπτει ότι η κρυογονική κατεργασία μεταβάλλει σημαντικά την ομοιομορφία επιφάνειας του κράματος NiTi, ακολουθούμενη από σημαντική μείωση των δυνάμεων κοπής και της φθοράς εργαλείου. Τα αποτελέσματα της μελέτης που διεξήχθη από τους Kaynak et al. ενθαρρύνουν την περαιτέρω διερεύνηση της κρυογονικής κατεργασίας αποβολής υλικού και για άλλους τύπους SMAs και μηχανουργικές κατεργασίες.

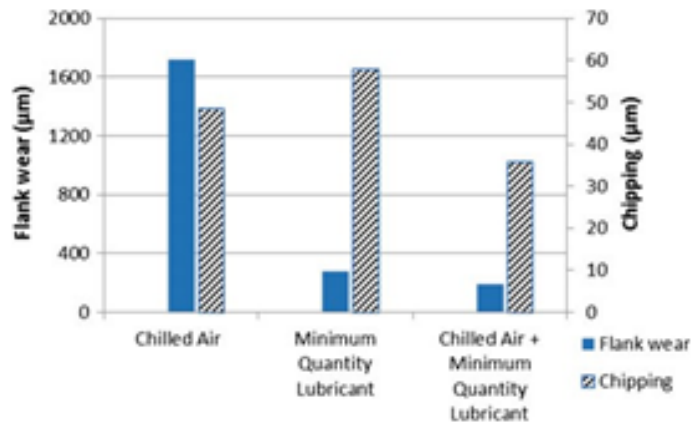
Η πειραματική εργασία που διεξήχθη από τους Zailani και Mativenga [46] χρησιμοποίησε ψύξη με αέρα, MQL, και μίξη των δύο με σκοπό να διευκολυνθεί το μικρο-φρεζάρισμα των κραμάτων μνήμης σχήματος NiTi. Ο κύριος στόχος τους ήταν να διατηρήσουν το SMA σε χαμηλά επίπεδα θερμοκρασίας έτσι ώστε το υλικό να μην εισέρχεται στη φάση έναρξης ωστενίτη από τη μαρτενσιτική φάση κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας. Χρησιμοποιήθηκαν κοπτήρες επίπεδου άκρου για το μικρο-φρεζάρισμα του NiTi υπό την επίδραση των προαναφερθεισών στρατηγικών ψύξης και/ή λίπανσης. Η κατεργασία με ψυχρό αέρα οδήγησε σε σημαντική μείωση του μεγέθους των κόκκων και της ομοιογενούς

μικροδομής. Επιπλέον, η χρήση μόνο ψυχρού αέρα και ψυχρού αέρα ταυτόχρονα με την MQL μείωσε σημαντικά τις δυνάμεις κοπής και βελτίωσε την ποιότητα επιφάνειας (βλ. Εικ. 21).

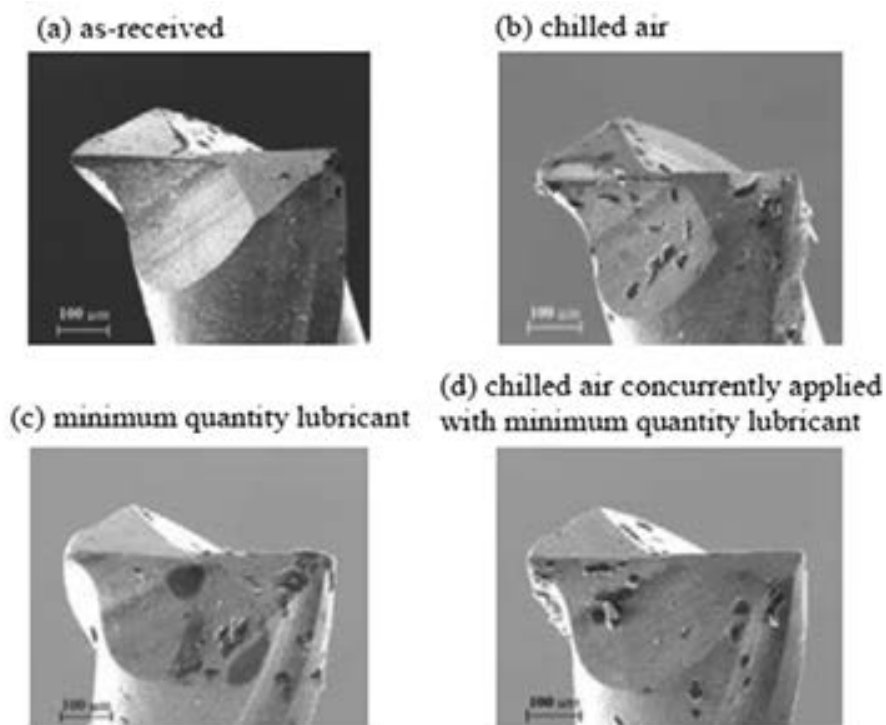


Εικόνα 21. Σύγκριση (a) της δύναμης κοπής υπό διαφορετικές συνθήκες κοπής και (b) μέσος όρος τραχύτητας κάτω από διαφορετικές συνθήκες κοπής, στην εργασία των Zailani και Mativenga [46],

Τα γρέζια (burrs) που δημιουργήθηκαν με ταυτόχρονη εφαρμογή ψυχρού αέρα και ελάχιστης ποσότητας λιπαντικού ήταν μικρότερα και πιο ομοιόμορφα. Η ταυτόχρονη εφαρμογή τους απομάκρυνε τελείως τις μικρορωγμές του εργαλείου και είχε ως αποτέλεσμα τη μικρότερη φθορά του (βλ. εικόνες 22, 23). Συνολικά, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η ταυτόχρονη χρήση του ψυχρού αέρα και της MQL έχει σημαντικό ευεργετικό αποτέλεσμα και ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη για την επίτευξη των περισσότερων δεικτών καλής κατεργασιμότητας στην περίπτωση των SMAs.



Εικόνα 22. Η φθορά πεδίου (flank) και μικρορηγματώσεις (chipping) υπό διαφορετικές συνθήκες κοπής, Zailani και Mativenga [46]



Εικόνα 23. Μικροεργαλείο (a) ως ελήφθη και μετά από κατεργασία με (b) ψυχρό αέρα, (c) MQL, (d) ψυχρό αέρα που εφαρμόζεται ταυτόχρονα με λιπαντικό ελάχιστης ποσότητας [46]

Πίνακας 2. Λεπτομέρειες της MQL και των παραμέτρων κοπής

Variable parameters				
Parameter	Unit	Level		
		-1	0	1
Flow rate 'F'	ml/hr	50	70	90
Air pressure 'P'	Bar	20	30	40
Nozzle distance 'D'	mm	4	5	6

Fixed parameters *Cutting speed* 110 m/min; *Feed rate* 0.2 mm/rev; *Depth of cut* 1 mm, Tool material—Carbide

Lubricant properties *Pour point* 8 °C; *Flash point* >290 °C; *Kinematic viscosity* 39.11 mm²/s at 40 °C; *Density* 0.9199 g/cm³ at 20 °C

Σε μια πιο πρόσφατη έρευνα, η MQL (με Johnson Baby oil) που βασίστηκε στο μικροπρεζάρισμα υψηλής ταχύτητας βελτίωσε επιτυχώς την κατεργασιμότητα του κράματος NiTi υπό την έννοια της μείωσης των δυνάμεων κοπής και του σχηματισμού burrs κατά τη διάρκεια των βέλτιστων παραμέτρων κατεργασίας [47]. Εφαρμόστηκαν πίεση αέρα στα 4 bar και παροχή 80 ml / h σε μικροπρεζάρισμα με διάφορα επίπεδα (4.7-30 m / min) ταχύτητας κοπής. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα χαμηλές δυνάμεις κοπής και μειωμένο μέγεθος γρεζιού για την ταχύτητα κοπής των 15 m / min και εξήχθη το συμπέρασμα ότι τούτο οφειλόταν στη μετάβαση του κράματος NiTi από τη φάση B2 στη φάση B19.

Η συμβολή των υπερηχητικών ταλαντώσεων κατά την τόνρευση των κραμάτων NiTi με μνήμη σχήματος έχει επίσης διερευνηθεί [48]. Γεννήτρια υπερήχων (ισχύος 1,2 kW) και μοροτροπέας (transducer) με συχνότητα 21,5 kHz χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία κραδασμών πλάτους 10 μm στην άκρη του εργαλείου τόνρευσης. Με τη χρήση υπερηχητικών κραδασμών, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση (μέχρι 70%) στην ποιότητα επιφάνειας των τεμαχίων NiTi από εκείνη της απλής συμβατικής τόνρευσης. Η δυναμική ακαμψία του συστήματος τεμαχίου-εργαλείου-εργαλειομηχανής, καθώς επίσης και η εξαφάνιση ψευδοακμής παρουσία υπερηχητικών κραδασμών θεωρήθηκαν ως οι κύριοι λόγοι για την ενίσχυση της ακρίβειας της κοπής. Η βοήθεια των υπερηχητικών κραδασμών εξασφάλισε επίσης την επιτυχή λειτουργία της τόνρευσης σε υψηλή ταχύτητα κοπής.

Τα αποτελέσματα μιας πρόσφατης προκαταρκτικής πειραματικής έρευνας που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο του Γιοχάνεσμπουργκ επισημαίνουν επίσης ότι η τεχνική MQL από μόνη της δεν είναι ικανή να ενισχύσει την κατεργασιμότητα των κραμάτων μνήμης σχήματος NiTi.

Στην εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκαν συνολικά εννέα πειράματα βασισμένα στη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων του Taguchi, και αφορούσαν την επίδραση της MQL σε cnc τόνρευση NiTi με χρήση πλακιδίων καρβιδίου ως κοπτικά εργαλεία. Μικρο-σταγονίδια οικολογικού λιπαντικού σε διάφορες παροχές, πίεση και απόσταση ακροφυσίων διοχετεύονταν στη ζώνη κατεργασίας. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις λεπτομέρειες των σταθερών και μεταβλητών παραμέτρων κατά τη διάρκεια της συνδυασμένης με MQL τόνρευσης NiTi. Το σχήμα 24 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και την ακολουθία των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή.

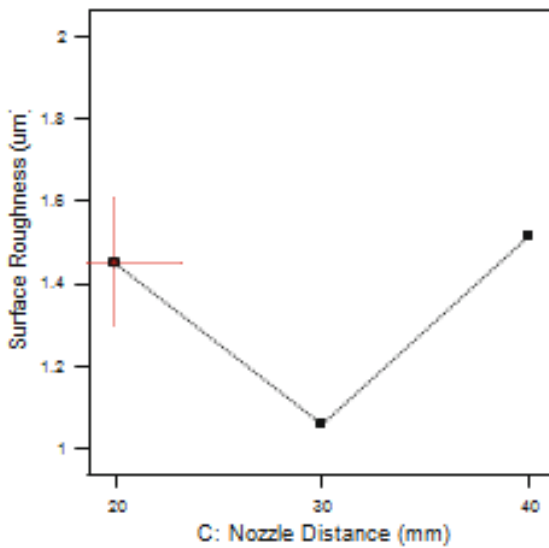
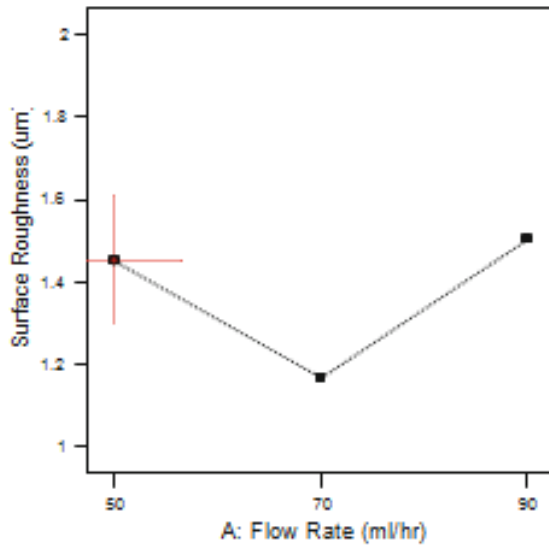
Τα πειραματικά αποτελέσματα, δηλαδή η μέση τραχύτητα και το πεδίο φθοράς, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, δείχνουν ότι η επίδραση των συνθηκών MQL δεν κατάφερε

να διατηρήσει τη φθορά του εργαλείου εντός των ορίων ISO (0,6 mm μέγιστο πλάτος πεδίου φθοράς) και οι τιμές που αντιστοιχούν σε όλους τους εννέα πειραματικούς συνδυασμούς είναι πολύ υψηλότερες από τα καθορισμένα όρια ISO [49] των 0,6 mm. Η ληφθείσα ποιότητα επιφάνειας για το δείγμα NiTi είναι αποδεκτή και μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με βελτιστοποίηση. Τα Σχήματα 25 και 26 παρουσιάζουν την επίδραση των παραμέτρων MQL στην τραχύτητα της επιφάνειας και στη φθορά του εργαλείου. Διαπιστώνεται ότι η διακύμανση των αποκρίσεων με τις παραμέτρους MQL ποικίλλει. Γι' αυτό, έχει γίνει πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας πρόσφορες τεχνικές ανάλυσης ως μια προσπάθεια περαιτέρω βελτίωσης της ποιότητας επιφάνειας και της φθοράς εργαλείου, ώστε να προκύψει ένα ενιαίο σύνολο παραμέτρων για τη βέλτιστη κατεργασιμότητα. Η πολυπαραμετρική βελτιστοποίηση έχει προσδιορίσει ροή με χαρακτηριστικά: 70 ml / hr, 6 bar και 30 mm ως βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων, ο οποίος απέδωσε μέση τραχύτητα 1,39 μm και φθορά εργαλείου 1,6 mm. Ακόμη και μετά τη βελτιστοποίηση, το πλάτος του πεδίου φθοράς παρέμεινε 1,6 mm, που είναι εξαιρετικά υψηλή τιμή και πάνω από το όριο που έχει καθοριστεί για την αστοχία εργαλείου κατά ISO.

2.4 Σύνοψη

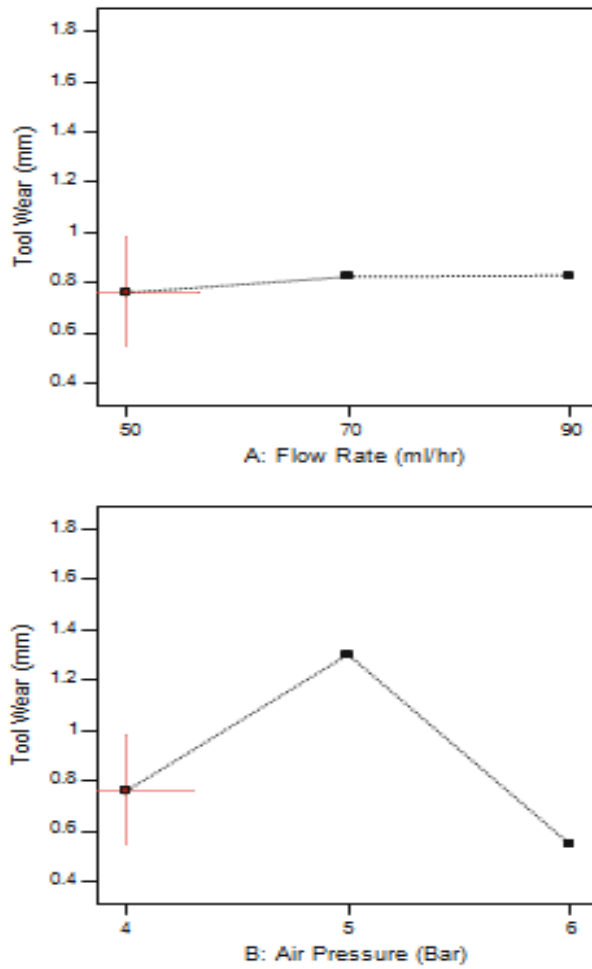
Οι προσπάθειες συμβατικής κατεργασίας των κραμάτων μνήμης σχήματος (SMAs) αποκαλύπτουν ότι η κοπή των SMAs χωρίς την υιοθέτηση συγκεκριμένων στρατηγικών μη συμβατικών κατεργασιών αποβολής υλικού είναι εξαιρετικά δύσκολη. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής, η χρήση επικαλυμμένων κοπτικών εργαλείων και η εφαρμογή προηγμένων στρατηγικών ψύξης και λίπανσης κ.λπ., είναι απαραίτητα για την επίτευξη υψηλής ομοιομορφίας επιφάνειας και μειωμένης φθορά εργαλείου, διασφαλίζοντας έτσι την κατασκευή ποιοτικών εξαρτημάτων SMA με ελάχιστες δαπάνες και με χαμηλή περιβαλλοντική επίπτωση. Συγκεκριμένα, η χρήση προηγμένων στρατηγικών ψύξης και λίπανσης έχει σημαντικές δυνατότητες και απαιτεί σοβαρές μελλοντικές προσπάθειες προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες κοπής διαφόρων SMAs. Επιπλέον, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η προηγμένη μη συμβατική κοπή και η βελτίωση της κατεργασιμότητας των SMAs βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της έρευνας και υπάρχει μεγάλο περιθώριο για να διερευνηθούν αυτές οι τεχνικές για την παραγωγή υψηλής ποιότητας αντικειμένων από SMAs.

Ακολουθούν μερικές πιθανές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα σχετικά με την κατεργασία αποβολής υλικού στα SMAs:



Εικόνα 24. Επίδραση των παραμέτρων MQL στη μέση τραχύτητα του υλικού NiTi

- Συμβατική μηχανική κατεργασία κοπής κράματος μνήμης σχήματος πέραν του κράματος ντινόλης (NiTi), όπως κράματα με βάση το χαλκό και Κονατ κ.λπ.
- Έρευνα επικεντρωμένη σε συμβατικές κατεργασίες κοπής πέραν της τόννευσης και του φρεζαρίσματος, δηλαδή διάτρηση, λείανση κλπ.
- Λεπτομερέστερη έρευνα πάνω στην υβριδική ψύξη-λίπανση, δηλ. ολοκληρωμένη κρυογονική μηχανική κατεργασία MQL.



Εικόνα 25. Επίδραση των παραμέτρων MQL στη φθορά των εργαλείων

- Εκτενής μελέτη της κοπής που υποβοηθείται από θερμότητα και κραδασμούς.
- Υβριδική μηχανική κοπή, δηλ. συνδυασμός προηγμένης ψύξης ή λίπανσης και κατεργασίας με θερμότητα ή / και δόνηση, κλπ.
- Μη συμβατική κατεργασία κοπής κραμάτων μνήμης σχήματος πέραν του NiTi.

Βιβλιογραφία

1. Y. Guo, A. Klink, C. Fu, J. Snyder, Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. *CIRP Ann.* **62**, 83–86 (2013)
2. M.R. Hassan, M. Mehrpouya, S. Dawood, Review of the machining difficulties of nickel titanium based shape memory alloys. *Appl. Mech. Mater.* **564**, 533–537 (2014)
3. K. Weinert, V. Petzoldt, Machining of NiTi based shape memory alloys. *Mater. Sci. Eng. A* **378**, 180–184 (2004)
4. K. Gupta, R.F. Laubscher, Sustainable machining of titanium alloys: a critical review. *Proc. Inst. Mech Eng Part B J. Eng. Manuf.* **231**(14), 2543–2560 (2017)
5. E.O. Ezugwu, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *Int J Mach Tool Manu* **45**(12–13), 1353–1367 (2005)
6. K. Gupta, N.K. Jain, R.F. Laubscher Jain, Spark-erosion machining of miniature gears: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **80**(9–12), 1863–1877 (2015)
7. K.P. Rajurkar, M.M. Sundaram, A.P. Malshe, Review of electrochemical and electro-discharge machining. *Procedia CIRP* **6**, 13–26 (2013)
8. K. Gupta, N.K. Jain, Chapter-2 Overview of wire spark erosion machining. in *Near Net Shape Manufacturing of Miniature Spur Gears* (Springer, 2016)
9. H.C. Lin, K.M. Lin, I.S. Cheng, The electro-discharge machining characteristics of TiNi shape memory alloys. *J. Mater. Sci.* **36**(2), 399–404 (2001)
10. S.L. Chen, S.F. Hsieh, H.C. Lin, M.H. Lin, J.S. Huang, Electrical discharge machining of a NiAlFe ternary shape memory alloy. *J. Alloy. Compd.* **464**, 446–451 (2008)
11. M.H. Abidi et al., An investigation of the micro-electrical discharge machining of nickel titanium shape memory alloy using grey relations coupled with principal component analysis. *Metals* **7**, 486 (2017). <https://doi.org/10.3390/met7110486>
12. S. Daneshmand, E.F. Kahrizi, A.A.L. Neyestanak, M. Mortazavi, Experimental investigations into electro discharge machining of NiTi shape memory alloys using rotational tool. *Int. J. Electrochem. Sci.* **8**, 7484–7497 (2013)
13. S. Daneshmand, E.F. Kahrizi, A.A.L. Neyestanak, V. Monfared, Optimization of electrical discharge machining parameters for NiTi shape memory alloy by using the Taguchi method. *J. Marine Sci. Technol.-Taiwan* **4**, 506–512 (2014)
14. S. Daneshmand, V.M.A. Akbar, Lotfi Neyestanak, Effect of tool rotational and Al₂O₃ powder in electro discharge machining characteristics of NiTi-60 shape memory alloy. *Silicon* **9**(2), 273–283 (2017)
15. M. Mallaiah, S. Narendranath, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, Influence of process parameters on material removal rate and surface roughness in WED-machining of Ti50Ni40Cu10 shape memory alloy. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* **8**(1/2), 26–33 (2016)
16. M. Manjaiah, R.F. Laubscher, S. Narendranath, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, Evaluation of wire electro discharge machining characteristics of Ti 50 Ni 50-xCux shape memory alloys. *J. Mater. Res.* **31**(12), 1801–1808 (2016)
17. M. Manjaiah, S. Narendranath, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, Investigation on material removal rate, surface and subsurface characteristics in wire electro discharge machining of Ti50Ni50-xCux shape memory alloy. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Design Appl.* **232**(2), 164–177 (2018)
18. M. Mallaiah, S. Narendranath, J. Akbari, Optimization of wire electro discharge machining parameters to achieve better MRR and surface finish. *Procedia Mater. Sci.* **5**, 2635–2644 (2014)
19. M. Mallaiah, S. Narendranath, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, Effect of electrode material in wire electro discharge machining characteristics of Ti50Ni50-xCux shape memory alloy. *Precision Eng.* **41**, 68–77 (2015)
20. J. Hecht, Short history of laser development. *Opt. Eng.* **49**(9), 1002 (2010)
21. K.C. Yung, H.H. Zhu, T.M. Yue, Theoretical and experimental study on the kerf profile of the laser micro-cutting NiTi shape memory alloy using 355 nm Nd: YAG. *Smart Mater. Struct.* **14**, 337–342 (2005)
22. R. Pfeifer, D. Herzog, M. Hustedt, S. Barcikowski, Pulsed Nd: YAG laser cutting of NiTi shape memory alloys-influence of process parameters. *J. Mater. Process. Tech.* **210**(14), 1918–1925 (2010)
23. C.H. Hung, F.Y. Chang, T.L. Chang, Y.T. Chang, K.W. Huang, P.C. Liang, Micromachining NiTi tubes for use in medical devices by using a femtosecond laser. *Opt. Lasers Eng.* **66**, 34–40 (2015)
24. C. Li, S. Nikum, F. Wong, An optimal process of femtosecond laser cutting of NiTi shape memory alloy for fabrication of miniature devices. *Opt. Lasers Eng.* **44**, 1078–1087 (2006)
25. C.A. Biffi, A. Tuissi, Fiber laser drilling of Ni₄₆Mn₂₇Ga₂₇ ferromagnetic shape memory alloy, *Optics Laser Technol.* **63**, 1–7 (November 2014)
26. T. Phokane, K. Gupta, M.K. Gupta, Investigations on surface roughness and tribology of miniature brass gears manufactured by abrasive water jet machining. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 0954406217747913
27. M. Hashish, Abrasive waterjet cutting of microelectronic components. in *Proceedings of the 2005 WJTA American Waterjet Conference*, vol. 26 (Houston, Texas, USA, August 2005)
28. M. Frotscher, H. Gugel, K. Neuking, W. Theisen, G. Eggeler, F. Kahleyß, D. Biermann, Machining of stent-like geometries in thin NiTi sheets using water jet cutting. ed. by J. Gilbert. *Medical Device Materials V, Proceedings from the Materials & Processes for Medical Devices Conference*, (USA, 2009), pp. 10.8.–12.8, 201–206
29. M.C. Kong, D. Axinte, W. Voice, Challenges in using waterjet machining of NiTi shape memory alloys: An analysis of controlled-depth milling. *J. Mater. Process. Tech.* **211**, 959–971 (2011)
30. M.C. Kong, D. Srinivasu, D. Axinte, W. Voice, J. McGourlay, B. Hon, On geometrical accuracy and integrity of surfaces in multi-mode abrasive waterjet machining of NiTi shape memory alloys. *CIRP Ann.* **62**(1), 555–558 (2013)
31. H.C. Lin, K.M. Lin, Y.C. Chen, A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys. *J. Mater. Process. Tech.* **105**(3), 327–332 (2000)

32. K. Weinert, V. Petzoldt, D. Kötter, Turning and drilling of NiTi shape memory alloys. *CIRP Ann.* **53**(1), 65–68 (2004)
33. K. Weinert, V. Petzoldt, Deep hole drilling of NiTi shape memory alloys. in *SMST: Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies* (2006), pp. 259–264
34. K. Weinert, V. Petzoldt, Machining NiTi micro-parts by micro-milling. *Mater. Sci. Eng., A* **481**, 672–675 (2008)
35. K. Gupta, R.F. Laubscher, J. Paulo Davim, N.K. Jain, Recent developments in sustainable manufacturing of gears: a review. *J. Cleaner Prod.* **112**(4), 3320–3330 (2016).
36. K. Gupta, R.F. Laubscher, MQL assisted machining of grade-4 titanium. in *Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA)*, (Stellenbosch, (South Africa), 27–29, January 2015), pp 211–217
37. D. Biermann, F. Kahleyss, T. Surmann, Micromilling of NiTi shape-memory alloys with ball nose cutters. *Mater. Manuf. Process* **24**(12), 1266–1273 (2009)
38. D. Biermann, F. Kahleyss, E. Krebs, T. Upmeier, A study on micro-machining technology for the machining of NiTi: five-axis micro-milling and micro deep-hole drilling. *J. Mater. Eng. Perform.* **20**(4–5), 745–751 (2011)
39. R. Piquard, A. D’Acunto, D. Dudzinski, Study of burr formation and phase transformation during micro-milling of NiTi alloys. in *11th International Conference on High Speed Machining*, (Czech Machine Tool Society, 2014), pp. 1–6
40. R. Piquard, A. D’Acunto, P. Laheurte, D. Dudzinski, Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation. *Precis. Eng.* **38**(2), 356–364 (2014)
41. I. Shyha, M. Patrick, I. Elgaly, Machinability analysis when drilling Kovar shape memory alloys. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **1**(3–4), 411–422 (2015)
42. Y. Kaynak, R.D. Noebe, H.E. Karaca, I.S. Jawahir, Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated, and cryogenic machining of NiTi shape memory alloys. *Proc. CIRP* **8**, 498–503 (2013)
43. Y. Kaynak, H.E. Karaca, R.D. Noebe, I.S. Jawahir, Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: a comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. *Wear* **306**, 51–63 (2013)
44. Y. Kaynak, H.E. Karaca, I.S. Jawahir, Surface integrity characteristics of NiTi shape memory alloys resulting from dry and cryogenic machining. *Proc. CIRP* **13**, 393–398 (2014)
45. Y. Kaynak, H. Tobe, R.D. Noebe, H.E. Karaca, I.S. Jawahir, The effects of machining on the microstructure and transformation behavior of NiTi Alloy. *Scripta Mater.* **74**, 60–63 (2014)
46. A.Z. Zailania, P.T. Mativenga, Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy. *Procedia CIRP* **45**, 207–210 (2016)
47. R. Kuppuswamy, A. Yui, High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **93**(1–4), 11–21 (2017)
48. J. Akbari, A.G. Chegini, A.R. Rajabnejad, *Ultrasonic-Assisted Turning of NiTi Shape Memory Alloy*, *5th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS 18–21 JUNE 2009* (Pine Bay Hotel—Kusadasi, Aydin, Turkey, 2009)
49. ISO 3685, *Tool Life Testing with Single-point Turning Tools* (Int. Organization Stand., Geneva, 1977)

Κεφάλαιο 3^ο

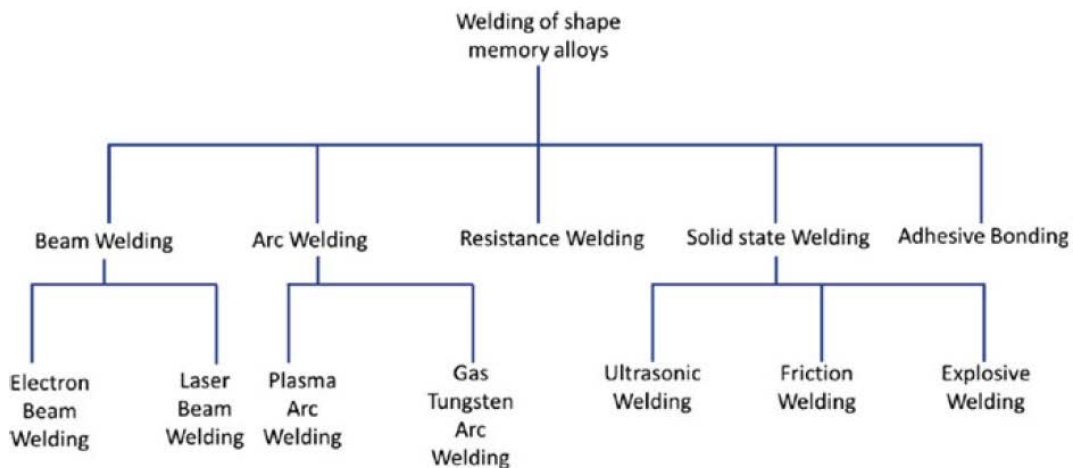
Συγκόλληση και σύνδεση των κραμάτων μνήμης σχήματος

3.1 Εισαγωγή

Οι συγκολλήσεις και οι συνδέσεις είναι μια βασική κατηγορία στην ταξινόμηση των κατεργασιών, όπου δύο ή περισσότερα διαφορετικά μέρη συνδέονται μεταξύ τους μέσω σύντηξης ή μηχανικής πίεσης ή με μηχανικές συνδέσεις (ηλώσεις, κοχλιώσεις) ή με κολλητική δράση (κόλλες) ή με διαφορετικούς συνδυασμούς αυτών των μεθόδων [1]. Η συγκόλληση και η σύνδεση των κραμάτων μνήμης σχήματος αποτελεί πρόκληση, καθώς τα αποτελέσματα των κραμάτων μνήμης σχήματος πρέπει να παραμείνουν αναλλοίωτα μετά τη συγκόλληση και τη σύνδεσή τους [2]. Επιπλέον, η συμπεριφορά του κράματος μνήμης σχήματος είναι διαφορετική κατά την διάρκεια της κατεργασίας, δεδομένου ότι μια συγκόλληση μπορεί να πραγματοποιείται με εφαρμογή κάποιας μηχανικής πίεσης ή/και πρόσδοση μεγάλου ποσού θερμότητας, [2, 3]. Ωστόσο, διάφορες διαδικασίες συγκόλλησης, όπως η συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστατευτική ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (TIG tungsten inert gas welding), η συγκόλληση με πλάσμα, η συγκόλληση με δέσμη λέιζερ (LBW laser beam welding), η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων (EBW electron beam welding), η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση (friction stir welding), η συγκόλληση αντίστασης, η συγκόλληση με τριβή, η εκρηκτική συγκόλληση, η συγκόλληση με υπερήχους, η σύνδεση με διάχυση, η σύνδεση με πρόσφυση, οι μαλακές συγκολλήσεις, αναφέρονται στη βιβλιογραφία [2, 3] και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαφορετικών κραμάτων μνήμης σχήματος (βλ. σχήμα 25). Αυτές οι κατεργασίες συζητούνται λεπτομερέστερα, διακρίνοντας τρεις διαφορετικές κατηγορίες όπως είναι: η σύνδεση, η τήξη και η συγκόλληση με δέσμη και η συγκόλληση στερεάς κατάστασης (πίεσης).

3.2 Κατεργασίες συγκόλλησης με τήξη και δέσμη

Η συγκόλληση τήξης είναι μια κατηγορία συγκόλλησης, στην οποία τα υλικά βάσης συνδέονται μέσω τήξης υλικού που προκαλείται από έντονη τοπική παροχή θερμότητας. Αυτή η παροχή θερμότητας μπορεί να είναι θερμότητα τόξου, θερμότητας δέσμης ή θερμότητα αντίστασης και καθορίζει την υποκατηγορία της, όπως είναι η συγκόλληση τόξου, η συγκόλληση αντίστασης και οι διαδικασίες συγκόλλησης με δέσμη θερμικής ισχύος. Οι συγκολλήσεις TIG και πλάσματος που εμπίπτουν στην κατηγορία συγκόλλησης τήξης με τόξο αναφέρονται ως εφαρμοσμένες κατεργασίες για τη σύνδεση κραμάτων μνήμης σχήματος [2, 3]. Σε περίπτωση συγκόλλησης τήξης με δέσμη ισχύος, εφαρμόζονται συγκολλήσεις με δέσμη ηλεκτρονίων και δέσμη λέιζερ για την επίτευξη σύνδεσης των κραμάτων μνήμης σχήματος [2, 3].



Εικόνα 26. Ταξινόμηση των κατεργασιών συγκόλλησης που εφαρμόζονται στα κράματα μνήμης σχήματος

Η επεξήγηση κάθε διαδικασίας παρουσιάζεται παρακάτω.

3.2.1 Συγκόλληση TIG

Η συγκόλληση TIG χρησιμοποιεί μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο βολφραμίου από το οποίο διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα, προκειμένου να δημιουργηθεί το φαινόμενο τόξου. Λόγω του τόξου, το υλικό βάσης τήκεται και στη συνέχεια στερεοποιείται με το πέρασμα του χρόνου που με τη σειρά του οδηγεί στην ένωση. Η διαδικασία συγκόλλησης TIG έχει πλεονεκτήματα όπως: εύκολη διαδικασία κατεργασίας, χαμηλή πρόσδοση θερμότητας, απλή πηγή συγκόλλησης και εφαρμογή στην συγκόλληση λεπτών υλικών, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη σε ευρύ φάσμα εφαρμογών [1-3]. Η ένωση των κραμάτων μνήμης σχήματος με τη συγκόλληση TIG συνεπάγεται τήξη υλικού [2, 3]. Η ευθραυστότητα, ο σχηματισμός ενδομεταλλικών ενώσεων, η ρωγμάτωση κατά τη στερεοποίηση και η διατήρηση της ιδιότητας της μνήμης σχήματος πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά κύριο λόγο κατά τη συγκόλληση TIG των κραμάτων μνήμης σχήματος. Διαπιστώνεται επίσης ότι απαιτούνται κατάλληλοι χειρισμοί μετά τη συγκόλληση για να ξεπεραστούν μέχρις ένα βαθμό οι προκλήσεις αυτές.

Η συγκόλληση TIG έχει τα πλεονεκτήματα μιας εφαρμόσιμης σύνδεσης, δηλ. εύκολη διαδικασία συγκόλλησης, σταθερότητα τόξου σε μικρό ρεύμα, ευκολία στην εφαρμογή σε λεπτού πάχους τεμάχια, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τη συγκόλληση κραμάτων μνήμης σχήματος [2,3]. Η ιστορία πάνω στη συγκόλληση κραμάτων μνήμης σχήματος δείχνει ότι η διαδικασία συγκόλλησης TIG είναι η πρώτη διαδικασία που εφαρμόστηκε σε κράμα NiTi το 1961 [2]. Σε αυτή τη μελέτη, αναφέρεται ότι ενδιάμεσες φάσεις που βασίζονται σε H, N και O μπορούν να παρατηρηθούν λόγω της ανεπαρκούς προστασίας του τηγμένου μετάλλου μέσα στη ραφή συγκόλλησης.

Οι Ikaï et al. [4] διαπίστωσαν ότι οι μηχανικές ιδιότητες της ραφής συγκόλλησης NiTi είναι υποβαθμισμένες σε σχέση με αυτές του βασικού μετάλλου. Δύο διαφορετικές διαμορφώσεις όπως σύρμα NiTi διαμέτρου 0,75 mm και φύλλο πάχους 0,2 mm συγκολλήθηκαν με τη

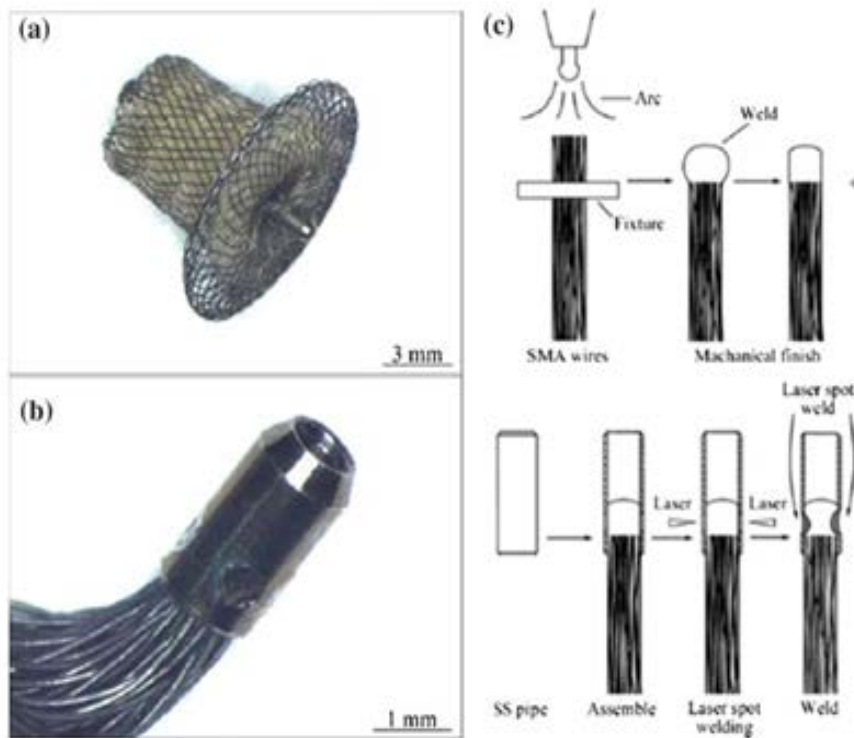
βοήθεια συγκόλλησης TIG. Οι ευνοϊκές συνθήκες συγκόλλησης TIG για συνδέσεις NiTi σύρματος διαμέτρου 0,75 mm είναι: ρεύμα TIG 10 A, συνεχές ρεύμα και ευθεία πολικότητα, 1,47 N δύναμη ώθησης του σύρματος, 1 mm προωθούμενο μήκος σύρματος και 1,6 mm διάμετρος ηλεκτροδίου. Εκτός αυτού, οι συνθήκες συγκόλλησης συνεχούς ρεύματος και θετικής πολικότητας, 4 A ρεύματος συγκόλλησης και 1 mm διάμετρος ηλεκτροδίου αναφέρονται ως ευνοϊκές συνθήκες για φύλλα NiTi πάχους 0,2 mm. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη των δειγμάτων που έχουν συγκολληθεί με TIG αναφέρεται ως εύκολα παραμορφώσιμη σε σύγκριση με το υλικό βάσης και τη ζώνη συγκόλλησης. Αναφέρεται ότι η ελαστική επαναφορά είναι εξαιρετικά χαμηλή κατά τη διάρκεια κυκλικών δοκιμών των 50 κύκλων σε στέλεχος με 4% επιμήκυνση. Τα συγκολλημένα σύρματα παρατηρήθηκε ότι εκτελούν πλήρη κυκλική δοκιμή 50 κύκλων, ενώ τα συγκολλημένα φύλλα αστοχούν μετά από 39 κύκλους.

Το NiTi είναι επιρρεπές σε αντιδράσεις με οξυγόνο, υδρογόνο και άζωτο σε υψηλή θερμοκρασία, επομένως η συγκόλληση TIG μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία εξαιρετικά ψαθυρής (εύθραυστης) ζώνης συγκόλλησης. Πρόσφατα, οι Oliveira et al. [5] εφάρμοσαν μια συγκόλληση TIG με διάταξη στερέωσης του συστήματος ροής αδρανούς αερίου στη ρίζα και το πρόσωπο των ραφών συγκόλλησης σε πλάκες NiTi πάχους 1,5 mm για διαμόρφωση αρμού, γεγονός που ελαχιστοποίησε την επίδραση της οξειδωσης, λόγω προστασίας της ραφής από τη ροή με αδρανές αέριο. Αυτή η μέθοδος, με τη σειρά της, έδειξε 20% ρήξη της συνολικής παραμόρφωσης και υπερελαστική συμπεριφορά, με αντοχή 30 MPa κάτω από του βασικού υλικού. Εδώ, επιτυγχάνεται κυκλική υπερελαστικότητα επιμήκυνσης έως 12% και 600 κύκλοι. Το φαινόμενο μνήμης σχήματος αναφέρεται ότι διατηρείται ακόμη και μετά τη συγκόλληση. Εκτός αυτού, η θερμοκρασία μετασχηματισμού φέρεται ότι αυξάνεται για τη ραφή συγκόλλησης σε σύγκριση με του βασικού υλικού, λόγω της παρουσίας οξειδίου του Ti, παρά την προσπάθεια πρόληψης με την εφαρμογή της προστασίας του αργού. Ως εκ τούτου, μπορεί να αναφερθεί ότι η σωστή χρήση του προστατευτικού αερίου και του αερίου υποστήριξης και πρόληψης είναι η βασική παράμετρος για τη συγκόλληση με TIG σε κράματα μνήμης σχήματος.

Η ανομοιογενής συγκόλληση κράματος μνήμης σχήματος με άλλο μέταλλο / κράμα πραγματοποιείται με τη μέθοδο συγκόλλησης TIG, όπως NiTi με ανοξειδωτο χάλυβα (SS) 304 και NiTi με SS 316L. Η συγκόλληση του NiTi με το SS 304 πραγματοποιείται με χρήση ένθετου Ni για τη διαμόρφωση συνδέσμων σωλήνα-σωλήνα [6, 7]. Ο σωλήνας είχε πάχος 1,9 mm και εξωτερική διάμετρο 9,3 mm. Το ένθετο Ni ενεργούσε ως υλικό πλήρωσης για τη συγκόλληση NiTi σε SS 306 μέσω συγκόλλησης TIG [6]. Οι μηχανικές ιδιότητες, όπως η σκληρότητα 817 HV και η τελική αντοχή στρέψης 415 MPa, αναφέρθηκαν ως ικανοποιητικές μαζί με το μικρό πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ: heat-affected zone), λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για εφαρμογή συνδέσμων NiTi-SS 304 για ενεργοποιητές. Ο σχηματισμός μεσομεταλλικών ενώσεων όπως Ni₃Ti₂ και Ni₄Ti₃ αναφέρονται μέσα στη ζώνη συγκόλλησης (ραφές) διαφορετικών μετάλλων NiTi-SS 304 με TIG. Επομένως, η ζώνη συγκόλλησης των αρμών NiTi-SS 304 εμφανίζει μεγαλύτερη σκληρότητα. Η συγκόλληση TIG του NiTi με SS 304 έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη διεύθυνση με ένα μόνο πάσο και μεγαλύτερη HAZ λόγω του μεγάλου πλάτους της σταγόνας της κόλλησης που προκαλείται από την υψηλότερη παρεχόμενη ενέργεια σε σχέση με τη τεχνική συγκόλλησης με λέιζερ [6].

Η συγκόλληση TIG χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των NiTi και των καλωδίων Ti για ιατρικές εφαρμογές, η οποία συνδέεται περαιτέρω με σωλήνα από ανοξειδωτο χάλυβα μέσω σημειακής συγκόλλησης (spot welding) με λέιζερ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27 [7]. Το TiC

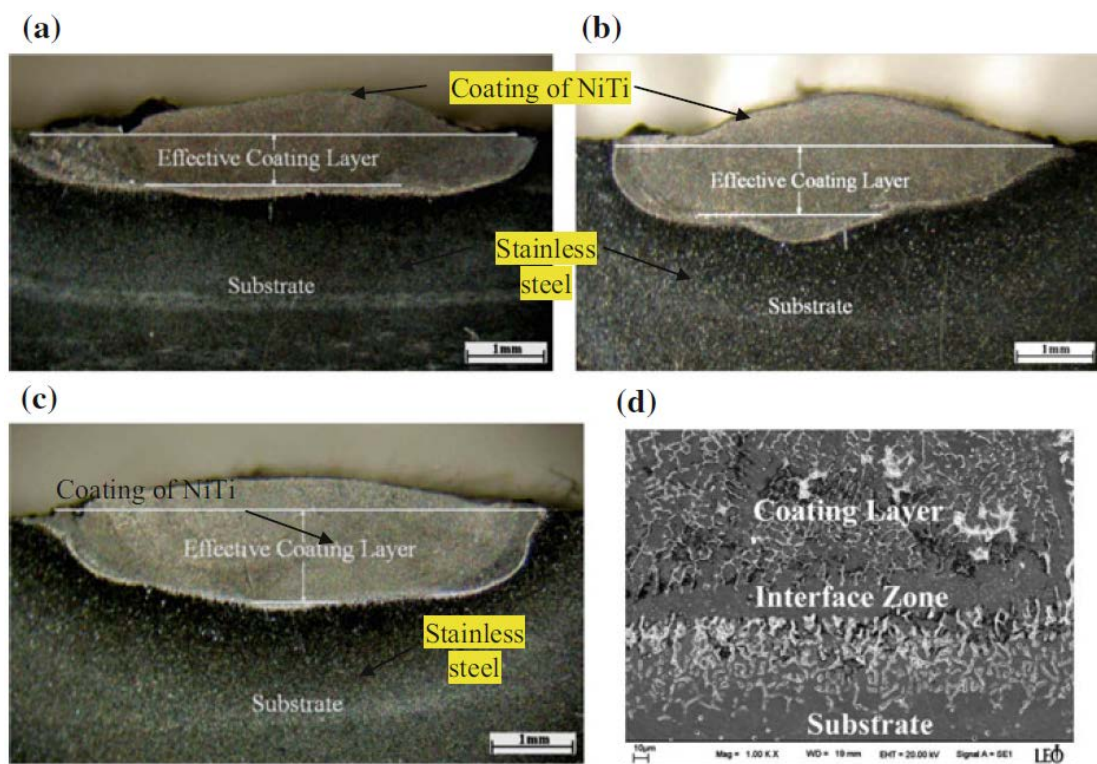
αναφέρεται στις συγκολλήσεις σύρματος, ενώ μεσομεταλικές ενώσεις, όπως $\text{Ni}_3\text{Ti} + (\text{Fe}, \text{Ni})$ Ti παρατηρούνται γύρω από τη ζώνη τήξης της συγκόλλησης με λέιζερ NiTi-SS 304 . Επιπλέον, σε εφαρμογές που απαιτείται η επικάλυψη του NiTi σε ανθρακούχο χάλυβα, αυτή πραγματοποιείται με συγκόλληση TIG. Οφέλη από την αύξηση της σκληρότητας αναφέρθηκαν λόγω του σχηματισμού οξειδίων και ενδομεταλλικών ενώσεων που διατηρούν τις υπερελαστικές ιδιότητες. Η επίδραση της μηχανικής διάβρωσης (erosion) βελτιώνεται δραστικά σε ένα ευρύ φάσμα τιμών της γωνίας πρόσπτωσης μέσω αυτής της επικάλυψης NiTi σε ανθρακούχο χάλυβα με συγκόλληση TIG [7].



Εικόνα 27. Ιατρικά αποφράγματα (occluders) (a) σύρματα NiTi συγκολλημένα με TIG, (b) σημειακή συγκόλληση με λέιζερ συστήματος σωλήνα με σύρματα και (c) διαδικασία κατασκευής συρμάτων με TIG και σημειακής συγκόλλησης καλωδίων σε σωλήνα με λέιζερ [7]

3.2.2 Συγκόλληση με πλάσμα

Η συγκόλληση με πλάσμα χρησιμοποιεί μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο βολφραμίου παρόμοιο με του TIG και η αρχή της διαδικασίας ταιριάζει επίσης με τη διαδικασία TIG. Η διαφορά έγκειται στην επιπλέον προστασία, η οποία οδηγεί στο διαχωρισμό του τόξου πλάσματος από το προστατευτικό αέριο [8]. Η συγκόλληση με πλάσμα χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση κράματος μνήμης τύπου NiTi, NiTi-ανοξειδωτος χάλυβας και NiTi-Hast alloy από τους van der Eijk et al. [9]. Η συγκόλληση με πλάσμα και σκόνη ως κόλληση εφαρμόζεται μέσω ρομποτικής διάταξης. Το αέριο αργόν χρησιμοποιείται ως αέριο πλάσματος, εξωτερική προστασία και στήριξη. Οι έρευνες έχουν καταλήξει ότι οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού στη συγκόλληση NiTi-NiTi διατηρούνται, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες υποβαθμίζονται. Η συγκόλληση με πλάσμα των NiTi-NiTi δεν επηρέασε την αναλογία των υλικών Ni και Ti. Από την άλλη πλευρά, η γραμμή τήξης του κράματος NiTi-Hast alloy και του NiTi-ανοξειδωτου χάλυβα περιέχει εύθραυστες φάσεις και ελαττώματα. Το NiTi έχει απορροφήσει διάφορα στοιχεία από το Hast alloy και τον ανοξειδωτο χάλυβα, κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Εν ολίγοις, η συγκόλληση με πλάσμα δεν συνιστάται έντονα για κράματα μνήμης σχήματος. Η συγκόλληση κράματος NiTi-Hast alloy είχε ως αποτέλεσμα έξι διαφορετικές φάσεις, οι οποίες προσδιορίζονται με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM) και στοιχειακή ανάλυση EDX. Οι Julien et al. [10] έχουν αναπτύξει τεχνική ψεκασμού πλάσματος για την επικάλυψη ενός Nitinol σε μεταλλικό υπόστρωμα.



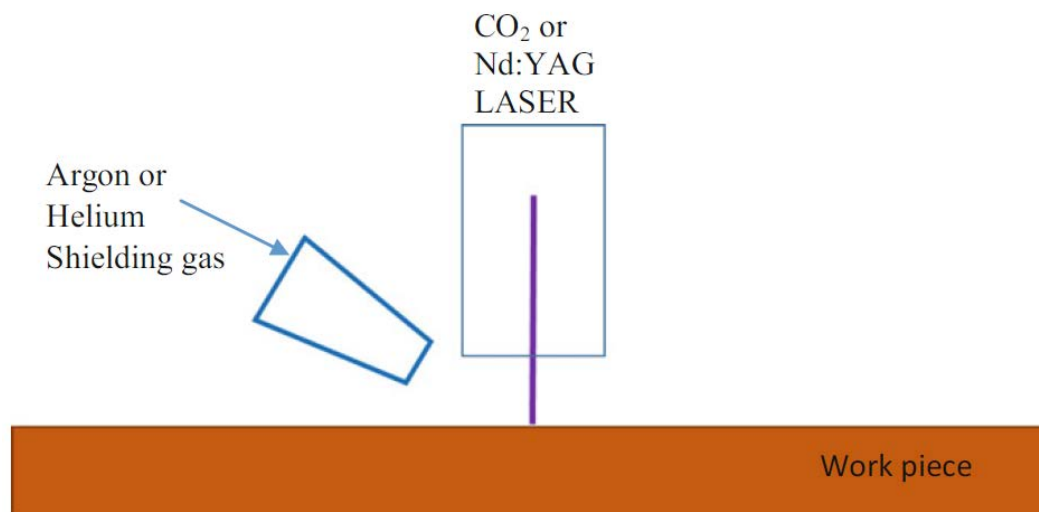
Εικόνα 28. Επικάλυψη NiTi σε υπόστρωμα από ανοξειδωτο χάλυβα με τη μέθοδο μεταφοράς με τόξο πλάσματος (a) 80 A, (b) 90 A, (c) 100 A και (d) μικρογράφημα SEM [11]

Η νιτινόλη χρησιμοποιείται σε μορφή σκόνης, η οποία αναμιγνύεται με αέρια υδρογόνου και αργού και μετατρέπεται σε μερικώς τηγμένη κατάσταση με ιονισμό και θέρμανση.

Πραγματοποίησαν ισχυρό δεσμό διάχυσης μεταξύ νιτινόλης IMC και μεταλλικού υποστρώματος μέσω υψηλής ταχύτητας και πρόσκρουσης μερικώς τηγμένης σκόνης νιτινόλης. Οι Ozel et al. [11] έχουν πραγματοποιήσει πειράματα επίστρωσης NiTi σε ανοξείδωτο χάλυβα με τη βοήθεια της διαδικασίας μεταφερόμενου τόξου πλάσματος. Ανέφεραν πάχος επιστρώματος 1, 1,2 και 1,4 mm με χρήση ρεύματος των 80, 90 και 100A, αντίστοιχα, χωρίς ελαττώματα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 28. Η παρουσία ελαττωμάτων αναφέρεται συχνά στις επικαλύψεις με μεθόδους TIG, όμως το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με τη μέθοδο μεταφοράς του τόξου πλάσματος.

3.2.3 Συγκόλληση με δέσμη λέιζερ

Η συγκόλληση με δέσμη λέιζερ χρησιμοποιεί για την τήξη του υλικού βάσης μια δέσμη φωτός μέσω οπτικής ενίσχυσης που βασίζεται σε διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας και η οποία επιτυγχάνει τη σύνδεση μετά τη στερεοποίηση [8]. Μεταξύ όλων των διαθέσιμων τεχνικών συγκόλλησης, η συγκόλληση με λέιζερ αναφέρεται ως η πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνική για τα κράματα μνήμης σχήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα εξαιρετικά πλεονεκτήματά της, όπως είναι: ο καλύτερος έλεγχος κατεργασίας, η χαμηλή παροχή θερμότητας, η υψηλή πυκνότητα, η ικανότητα αναπαραγωγής, η στενή ζώνη HAZ και η μονοχρωματική της φύση [1- 3]. Έχει επίσης καλά τεκμηριωθεί ότι οι συγκολλήσεις δέσμης λέιζερ παρέχουν πιο στενή ραφή συγκόλλησης από τις συγκολλήσεις τόξου, η οποία επιβεβαιώνεται πολύ καλά και στα κράματα μνήμης σχήματος Fe-Mn-Si [2].



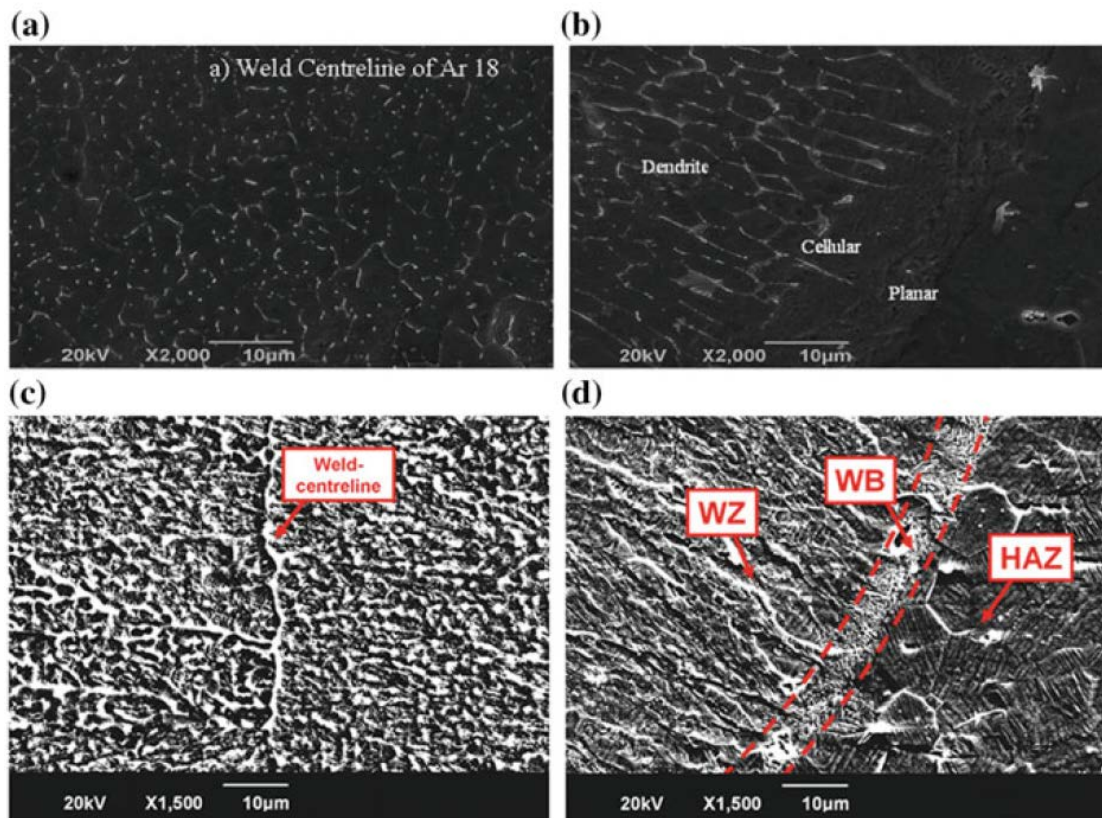
Εικόνα 29. Διάταξη συγκόλλησης με λέιζερ και προστατευτικό αέριο για κράματα μνήμης σχήματος

Ο τύπος λέιζερ όπως το CO₂, Nd: YAG ή το λέιζερ ίνας (fiber-laser) που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των κραμάτων μνήμης σχήματος επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες συγκόλλησης [2, 3, 12-31]. Ωστόσο, το Nd: YAG και το λέιζερ ίνας θεωρούνται πιο κατάλληλα σε σχέση με τα λέιζερ CO₂ [2]. Ο λόγος για αυτό είναι το μικρό μήκος κύματος, το οποίο οδηγεί σε αύξηση της απορροφητικότητας και συνεπώς σχηματίζει στενές συγκολλήσεις. Οι παράμετροι της διαδικασίας συγκόλλησης με λέιζερ για το μέγεθος και τη

θέση εστίασης της δέσμης λέιζερ, το μήκος κύματος, η ισχύς και ο τρόπος λειτουργίας, η ταχύτητα συγκόλλησης, ο τύπος αερίου προστασίας και η παροχή αναφέρονται ως οι κύριες παράμετροι επηρεασμού στην περίπτωση συγκόλλησης κραμάτων μνήμης σχήματος [2].

Προτείνεται από τη βιβλιογραφία ότι η παλμική κυματομορφή του λέιζερ προτιμάται για τη συγκόλληση σύρματος λεπτών φύλλων, ενώ η συνεχής κυματομορφή του λέιζερ θεωρείται πιο κατάλληλη για κράματα μνήμης σχήματος μεγάλου πάχους [2, 3, 12-31]. Η συγκόλληση με λέιζερ του έξυπνου υλικού NiTi μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματικά όταν τροφοδοτείται ταυτόχρονα προστατευτικό αέριο [2]. Η χρήση προστατευτικού αερίου στη συγκόλληση με λέιζερ κράματος μνήμης σχήματος απεικονίζεται στο σχήμα 29. Αναφέρεται ότι τα προστατευτικά αέρια όπως το αργό και το ήλιο χρησιμοποιούνται για το υλικό μνήμης σχήματος NiTi, διότι ελαχιστοποιούν την οξείδωση και την επιμόλυνση κατά τη συγκόλληση. Το αργό χρησιμοποιείται επίσης ως αέριο προστασίας για άλλα κράματα μνήμης σχήματος όπως το Cu-Al-Mn, στην περίπτωση συγκόλλησης με λέιζερ [13].

Οι συνδέσεις κράματος μνήμης σχήματος με συγκόλληση λέιζερ χαρακτηρίζονται ως καλύτερες από την άποψη της διατήρησης της ιδιότητας μνήμης σχήματος [12]. Έχει αναφερθεί ότι τουλάχιστον το 90% της ιδιότητας μνήμης σχήματος διατηρείται με ανάκτηση της παραμόρφωσης. Αρκετά άρθρα αναφέρουν ότι η πλήρης ανάκτηση της μνήμης σχήματος μέσω επιβαλλόμενης παραμόρφωσης μπορεί να επιτευχθεί σε ραφές που υλοποιούνται με συγκόλληση με δέσμη λέιζερ. Η ανάκτηση του χαρακτηριστικού της μνήμης σχήματος εξαρτάται από τον ρυθμό παραμόρφωσης. Έχει αναφερθεί ότι η μη ανακτήσιμη παραμόρφωση γίνεται μετά το μετασχηματισμό από μαρτενσιτική σε ωστενιτική δομή. Ωστόσο, αυτή η μη ανακτήσιμη παραμόρφωση θεωρείται μικρή όταν είναι μικρότερη από 0,1 και 0,3% για επιβαλλόμενη παραμόρφωση 4 και 6%, αντίστοιχα, σε σχέση με το βασικό υλικό NiTi. Έχει διερευνηθεί καλά από τους Falvo et al. [14] ότι NiTi πλούσιο σε Ti που έχει συγκολληθεί με λέιζερ έχει 4% ανάκτηση επιμήκυνσης με επιβαλλόμενη παραμόρφωση 5%. Εκτός αυτού, ανέφεραν ότι σημειώθηκε 5,2% ανάκτηση παραμόρφωσης για 7,3% επιβαλλόμενη παραμόρφωση στο βασικό μέταλλο.



Εικόνα 30. Μικροδομές κράματος μνήμης σχήματος με συγκόλληση με λέιζερ, κεντρική γραμμή συγκόλλησης (weld center line) : (α) και (c) και όριο διεπιφάνειας συγκόλλησης (interface boundary): (b) και (d) [15, 23]

Τα κράματα μνήμης σχήματος στη συγκόλληση με λέιζερ περιλαμβάνουν ενδιαφέρουσες μικροδομές μέσα στη ζώνη συγκόλλησης και στη ζώνη HAZ. Οι μικροδομές της ζώνης συγκόλλησης αναφέρονται με δενδριτικό (dendritic) τύπο, επίπεδο (planar), κυτταρικό (cellular) ή συνδυασμό οποιωνδήποτε / όλων αυτών των μικροδομών [15, 16, 23]. Η δομή δενδριτικού τύπου αναφέρεται ότι οφείλεται στην ταχεία στερεοποίηση. Οι μεταβολές των δομών στερεοποίησης από επίπεδο σε κυτταρικό και από κυτταρικό σε δενδριτικό οφείλονται στην αυξημένη ιδιοσυστατική (constitutional) υπέρψυξη του κράματος μνήμης σχήματος. Επομένως, η πιθανότητα να υφίσταται μικροδομή μεταξύ μίας ή δύο εκ προαναφερόμενων δομών ή όλων των δομών είναι πολύ μεγάλη [15, 16, 23]. Ένα από τα παραδείγματα κράματος NiTi που έχει συγκολληθεί με λέιζερ φαίνεται στο σχήμα 31 με τις διαφορετικές μικροδομές του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ζώνη HAZ των κραμάτων μνήμης σχήματος αποτελείται από μικροδομές ανακρυσταλλωμένων ισοαξονικών κόκκων με αυξημένο μέγεθος λόγω της θερμικής αγωγιμότητας που οδηγεί σε βαθμίδα ανακρυστάλλωσης.

Διάφορες πηγές ανέφεραν ότι στη θερμοκρασία δωματίου οι μικροδομές του ωστενίτη και του μαρτενσιτικού συνυπάρχουν μέσα στην συγκόλληση και στη ζώνη HAZ του NiTi που έχει συγκολληθεί με λέιζερ, ενώ στο βασικό υλικό παρουσιάζεται πλήρως ωστενιτική δομή [21-31]. Η ακτινοβολία ακτίνων-X και η συμβατική τεχνολογία ακτινοβολίας CuK α χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό αυτών των δομικών αλλαγών [15, 16].

Υλικό NiTi πλούσιο σε Ti συγκολλημένο με συγκόλληση λέιζερ αναφέρεται ότι έχει μειωμένη αντοχή εφελκυσμού στη ραφή συγκόλλησης λόγω της παρουσίας μικρορωγματώσεων στη ζώνη τήξης και κατακρημνισμάτων Ti₂Ni στα όρια κόκκων στη ζώνη HAZ [15, 16, 31]. Η κατακρήμνιση οδηγεί σε ευθραυστότητα, η οποία προκαλεί χαμηλότερη ολκιμότητα και μικρότερη αντοχή. Η χαμηλότερη ολκιμότητα παρουσιάζεται στο υλικό NiTi που έχει συγκολληθεί με παλμικό λέιζερ, και οφείλεται στις διαταραχές μέσα στη ζώνη τήξης [2]. Πέραν τούτου, στην περίπτωση κράματος μνήμης σχήματος Cu-Al-Mn, δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά ιδιοτήτων εφελκυσμού σε σχέση με το βασικό υλικό, καθώς το μέγεθος κόκκων της συγκόλλησης δεν επηρεάζεται πολύ. Η ολκιμότητα του υλικού Cu-Al-Mn που έχει συγκολληθεί με λέιζερ έχει επίσης αναφερθεί υψηλότερη και παρατηρείται σχηματισμός «λαιμού» κατά τη δοκιμή εφελκυσμού [12, 13]. Η δοκιμή εφελκυσμού και η ιδιότητα της μνήμης σχήματος εξαρτώνται από την παραμόρφωση μετασχηματισμού, τον κύκλο φόρτισης - αποφόρτισης, την ανάκτηση της ιδιότητας μνήμης σχήματος, την ανάκτηση υπερελαστικότητας και τις τάσεις έναρξης και πέρατος [2].

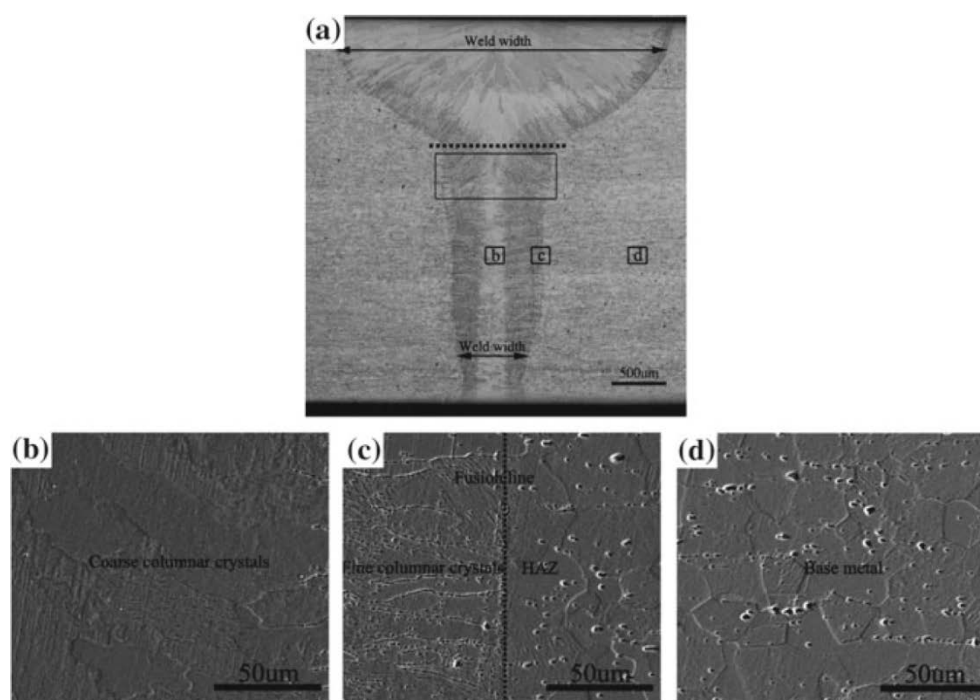
Η εφαρμογή της συγκόλλησης με λέιζερ για την ένωση των ανόμοιων υλικών (όπου το κράμα μνήμης σχήματος είναι ένα από τα υλικά) αναφέρεται σε μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων, λόγω των πλεονεκτημάτων της χρήσης υψηλής πυκνότητας ισχύος, των μειωμένων θερμικά επηρεαζόμενων περιοχών, του εύκολου ελέγχου, της ευελιξίας, και της επαναληψιμότητας. Διάφοροι συνδυασμοί NiTi-χάλυβα, NiTi-ανοξειδωτού χάλυβα, NiTi-τιτανίου, NiTi-monel, NiTi-inconel, NiTi-tantalum, NiTi-Cu, NiTi-CuAlMn με χρήση συγκόλλησης με λέιζερ αναφέρονται σε διάφορες βιβλιογραφικές πηγές [2, 24-26, 31]. Οι διαφορές στις θερμοφυσικές ιδιότητες οδηγούν στο σχηματισμό ενδομεταλλικών ενώσεων (IMCs) στις σιεπιφάνειες της ραφής συγκόλλησης. Σημειώνεται ότι τα ελαττώματα μπορούν να εμφανιστούν στην περιοχή συγκόλλησης λόγω του σχηματισμού IMC. Ο προσεκτικός έλεγχος των παραμέτρων της κατεργασίας μπορεί να αποτρέψει το πρόβλημα της δημιουργίας IMCs. Μερικές από τις μελέτες υποδεικνύουν ότι η χρήση ενδιάμεσης στρώσης στην συγκόλληση με λέιζερ ανόμοιων υλικών βελτιώνει τις ιδιότητες της σύνδεσης μειώνοντας το σχηματισμό IMCs και ελαττωμάτων [2, 24-26, 31]. Διάφορα ενδιάμεσα στρώματα νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού, σιδήρου και νιοβίου συνιστώνται για διάφορους συνδυασμούς όπως NiTi-χάλυβα, NiTi-ανοξειδωτο χάλυβα και NiTi-Ti. Στις περισσότερες συγκολλήσεις με λέιζερ ανόμοιων υλικών αναφέρονται με υψηλότερες τιμές σκληρότητας στην περιοχή της ραφής. Υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού από το βασικό υλικό είναι δυνατόν να ληφθεί κατά τη συγκόλληση με λέιζερ ανόμοιων υλικών. Κάποιες βιβλιογραφικές αναφορές πάνω στη συγκόλληση ανόμοιων υλικών αναφέρουν ότι η υπερελαστική συμπεριφορά και η ικανότητα μνήμης σχήματος είναι δυνατόν να επιτευχθούν με ανόμοιες συγκολλήσεις κράματος μνήμης σχήματος με άλλο υλικό. Η κυκλική συμπεριφορά μπορεί να διατηρηθεί όταν εφαρμόζεται συγκόλληση με λέιζερ με ελεγχόμενες παραμέτρους διεργασίας σε ανόμοιους συνδυασμούς που έχουν ένα από τα βασικά υλικά τους κάποιο κράμα μνήμης σχήματος [2, 24-26, 31].

3.2.4 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων χαρακτηρίζεται από παρόμοια αρχή λειτουργίας με αυτή της συγκόλλησης δέσμης λέιζερ. Στην περίπτωση συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων, μια δέσμη ηλεκτρονίων εστιάζει στο τεμάχιο εργασίας για να το λιώσει. Η εγκατάσταση

συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων απαιτεί θάλαμο κενού, όπου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται υπό υψηλή τάση και εστιάζουν στο τεμάχιο εργασίας μέσω των φακών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η δέσμη ηλεκτρονίων είναι ακόμα πιο κατάλληλη από τη συγκόλληση με λέιζερ όσον αφορά τον έλεγχο της δέσμης, την πρόληψη της οξειδωσης και της επιμόλυνσης, τη μικρή διάμετρο δέσμης και την υψηλή ενέργεια της δέσμης ανά μονάδα επιφάνειας [8]. Ωστόσο, ελάχιστες ερευνητικές εργασίες αναφέρονται στη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων σε κράματα μνήμης σχήματος, καθώς η δέσμη ηλεκτρονίων έχει περιορισμένη εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα. Αυτό οφείλεται στα μειονεκτήματα του υψηλού κόστους αρχικής εγκατάστασης, του υψηλού κόστους συντήρησης, του απαιτούμενου χρόνου για την παραγωγή κενού και του χειρισμού του υλικού στο θάλαμο κενού.

Οι Yang et al. [32] πραγματοποίησαν δοκιμές συγκόλλησης NiTi με δέσμη ηλεκτρονίων για να μελετήσουν τη συμπεριφορά των συγκολλήσεων όσον αφορά τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες. Ανέφεραν 85% απόδοση της σύνδεσης σε θερμοκρασία δωματίου, ενώ πέτυχαν 93% απόδοση σύνδεσης σε θερμοκρασία 223 K. Η μικροδομή NiTi αναφέρεται ως κιονοειδούς τύπου με κλασσική λεπτόκοκκη μορφή, όπως φαίνεται στο σχήμα 31. Οι κιονοειδείς κόκκοι παρατηρούνται κάθετα στην κεντρική γραμμή συγκόλλησης. Κατακρημνίσματα Ti_2Ni ή Ni_4Ti_3 σημειώνονται στη ζώνη συγκόλλησης. Η θερμοδομετρία διαφορικής σάρωσης δείχνει ότι μόνο ένα βήμα αναστρέψιμου μαρτενσιτικού μετασχηματισμού επιτυγχάνεται στο υλικό συγκόλλησης και βάσης. Δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στις θερμοκρασίες μετασχηματισμού στην περίπτωση συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων NiTi. Μόνο, η μαρτενσιτική θερμοκρασία εκκίνησης της συγκόλλησης αναφέρεται ως αυξημένη. Η ίδια ομάδα συγγραφέων Yang et al. [33] ανέφεραν σε άλλο άρθρο ότι η ανόπτηση (annealing) μετά από συγκόλληση σε ηλεκτροσυγκολλημένο NiTi μειώνει τη μαρτενσιτική θερμοκρασία εκκίνησης της συγκόλλησης. Ο βέλτιστος μετασχηματισμός φάσης μπορεί να επιτευχθεί με ανόπτηση μετά τη συγκόλληση σε θερμοκρασία 1073 K.

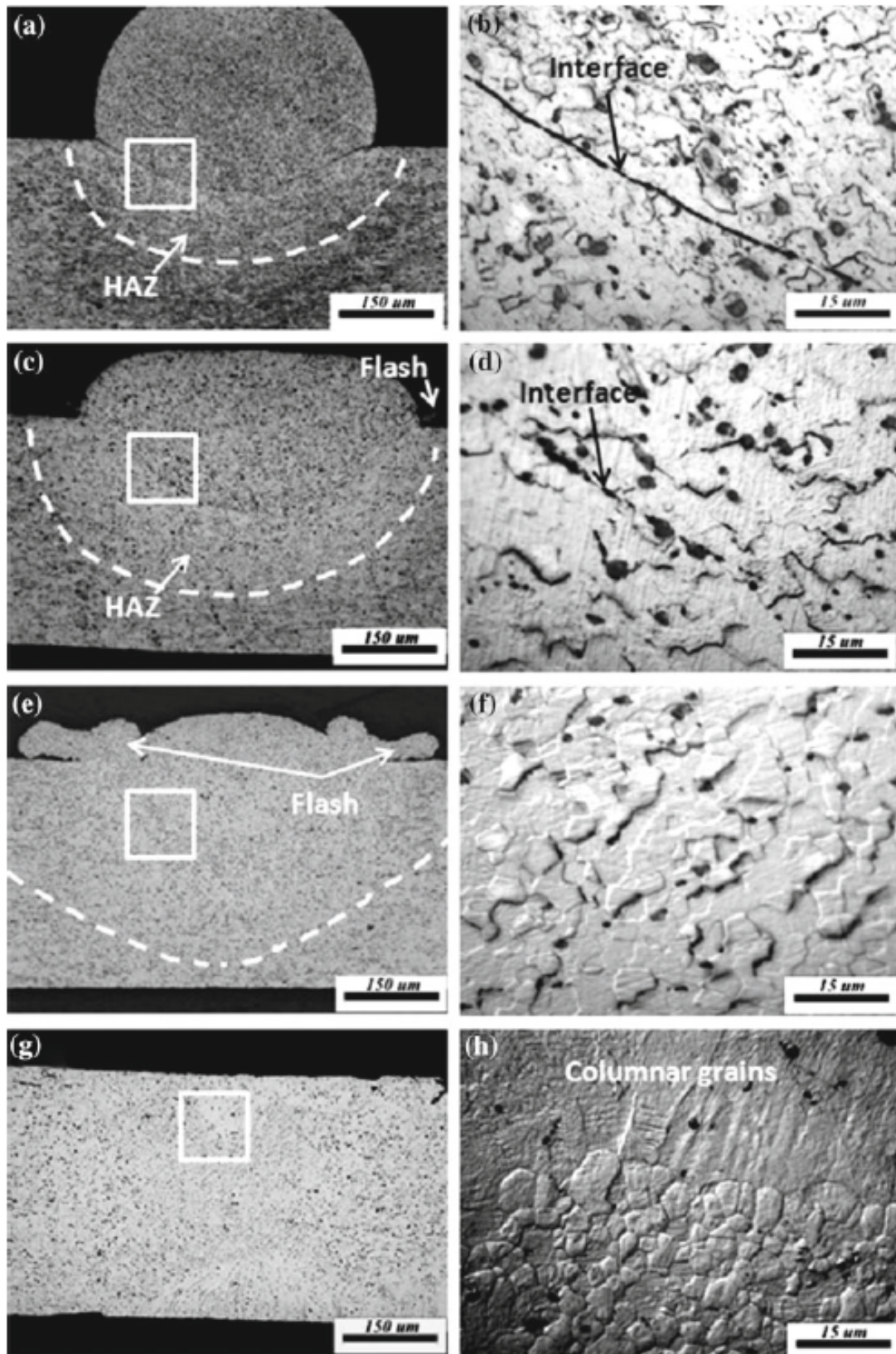


Εικόνα 31. Μικροδομές NiTi συγκολλημένου με δέσμη ηλεκτρονίων [32],

3.3 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση

Η συγκόλληση με αντίσταση είναι μια τεχνική συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, στην οποία η ηλεκτρική αντίσταση χρησιμοποιείται για να παρέχει θερμότητα Joule που οδηγεί σε τήξη και παραμόρφωση υλικού ταυτόχρονα. Η δύναμη συμπίεσης εκτός από την τήξη και την παραμόρφωση δημιουργεί συγκόλληση στη διεπαφή του τεμαχίου εργασίας. Το ρεύμα περνά μέσω ηλεκτροδίων χαλκού στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι συνεισφέρουσες παράμετροι της συγκόλλησης με αντίσταση είναι η πυκνότητα ρεύματος, ο χρόνος, η πίεση συμπίεσης και η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού βάσης [8]. Υπάρχουν λίγα διαθέσιμα άρθρα στα οποία μελετάται η συγκόλληση αντίστασης των κράματων μνήμης σχήματος. Η συγκόλληση με αντίσταση εφαρμόζεται σε μικρο-συγκολλήσεις συρμάτων NiTi [34, 35] και σε συνδέσεις άκρων σωλήνων όπου σημειώνεται υπερκάλυψη [36]. Μικρο-συγκόλληση αντίστασης εφαρμόζεται για τη σύνδεση συρμάτων διαμέτρου 0,4 mm σε σταυροειδείς αρμούς. Ο μηχανισμός σύνδεσης που παρατηρήθηκε σε αυτή τη μελέτη είναι στερεάς κατάστασης συγκόλληση και περιλαμβάνει έξι στάδια: ψυχρηλασία, δυναμική ανακρυστάλλωση, τήξη διεπιφανειών, έκθλιψη, υπερβολική προεξοχή (flash) και τήξη επιφανειών. Η θερμοκρασία μετασχηματισμού της συγκόλλησης αναφέρεται ως τροποποιημένη λόγω της επίδρασης ανόπτησης στη σκλήρυνση του υλικού βάσης που οφείλεται στη μεταφορά θερμότητας από την αντίσταση. Ο μετασχηματισμός φάσεων της συγκόλλησης οφείλεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το βασικό υλικό [34]. Η μικροδομή της συγκόλλησης αποτελείται από κιονοειδείς κόκκους στη ζώνη τήξης και ανακρυσταλλωμένους λεπτούς κόκκους στη ζώνη HAZ (βλέπε σχήμα 32 για τη μικροδομή στη διεπιφάνεια, τη συγκόλληση και την HAZ υπό διαφορετικό ρεύμα). Η διάκριτη διασύνδεση του σχήματος 32 b, d οφείλεται σε ατελή σύνδεση, καθώς το ρεύμα που εφαρμόζεται είναι χαμηλό, ενώ καμία τέτοια διεπαφή δεν αναφέρεται σε υψηλότερα ρεύματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 32 f, h. Η παρουσία ζιμμάτων TiC στη περιοχή συγκόλλησης εντοπίζεται με βάση τις παρατηρήσεις της μικροδομής [34]. Οι ανακρυσταλλωμένοι λεπτοί κόκκοι αναφέρονται σε μεγάλη ζώνη για υψηλότερο ρεύμα, καθώς η ζώνη HAZ γίνεται μέγιστη σε περίπτωση υψηλότερου εφαρμοσμένου ρεύματος. Το ρεύμα συγκόλλησης έχει σημαντικές επιδράσεις στις ιδιότητες του αρμού, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής, της ψευδοελαστικότητας, του μετασχηματισμού και της επίδρασης μνήμης σχήματος [34].

Η συγκόλληση με αντίσταση χρησιμοποιήθηκε από τους Delobelle et al. [36] για να σχηματίσουν αρχιτεκτονική κυτταρική δομή σωλήνα NiTi, που είναι πορώδες υλικό. Η συγκόλληση με αντίσταση είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σύνθετης δομής NiTi. Η συγκόλληση με αντίσταση επηρεάζει αυτή την σύνδεση όσον αφορά τη συμπεριφορά μετασχηματισμού, τις μικροδομικές ιδιότητες και τις μηχανικές ιδιότητες. Προτείνεται κατάλληλη κατεργασία μετά τη συγκόλληση, για να αποκτήσει η σύνδεση την ίδια συμπεριφορά μετασχηματισμού σε σχέση με το βασικό υλικό. Η επεξεργασία με διάλυμα σε θερμοκρασία 850 ° C για 60 λεπτά ακολουθούμενη από τη γήρανση σε θερμοκρασία 450 ° C για 30 λεπτά συνιστάται για συγκόλληση με αντίσταση υλικού μνήμης σχήματος NiTi-50.8 % σε Ni. Ταυτόχρονα, η εφαρμογή αυτής της θερμικής κατεργασίας δεν επηρεάζει σημαντικά τη σκληρότητα, το μέγεθος κόκκων και το μέτρο ελαστικότητας.



Εικόνα 32. Μικρογραφήματα SEM με σύρματα NiTi συγκολλημένα με αντίσταση και με διαφορετικά ρεύματα: a, b 145 A, c, d 195 A, e, f 245 A, g, h, 295 A [34]

3.4 Συγκόλληση στερεάς κατάστασης

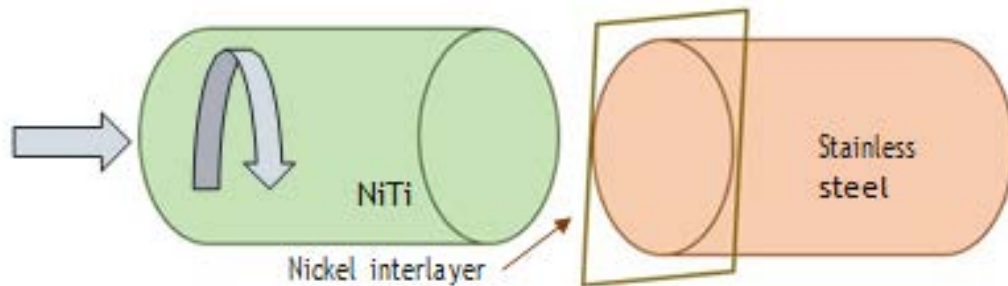
Οι κατεργασίες συγκόλλησης στερεάς κατάστασης είναι εκείνες οι διαδικασίες, οι οποίες παράγουν μια σύνδεση μέσω της παραμόρφωσης του βασικού υλικού σε στερεά κατάσταση που προκαλείται από τη θερμότητα και την πίεση, και δεν απαιτείται τήξη του υλικού βάσης και προσθήκη υλικού πλήρωσης [1, 8]. Δεδομένου ότι αποφεύγεται η τήξη του υλικού, οι διεργασίες συγκόλλησης στερεάς κατάστασης προβλέπονται όταν η ζώνη συγκόλλησης είναι επιρρεπής στο σχηματισμό εύθραυστων ενδομεταλλικών ενώσεων (IMCs) [1]. Ως εκ τούτου, οι διεργασίες συγκόλλησης στερεάς κατάστασης κρίνονται ως κατάλληλες διεργασίες για συγκόλληση κραμάτων μνήμης σχήματος [2]. Διαφορετικές διαδικασίες συγκόλλησης σε στερεά κατάσταση, όπως η συγκόλληση με τριβή, η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση, η υπερηχητική συγκόλληση και η εκρηκτική συγκόλληση, εξετάζονται για εφαρμογή σε κράματα μνήμης σχήματος [2]. Ιδιαίτερη αναφορά για καθεμία από αυτές τις διαδικασίες γίνεται αμέσως παρακάτω.

3.4.1 Συγκόλληση με τριβή

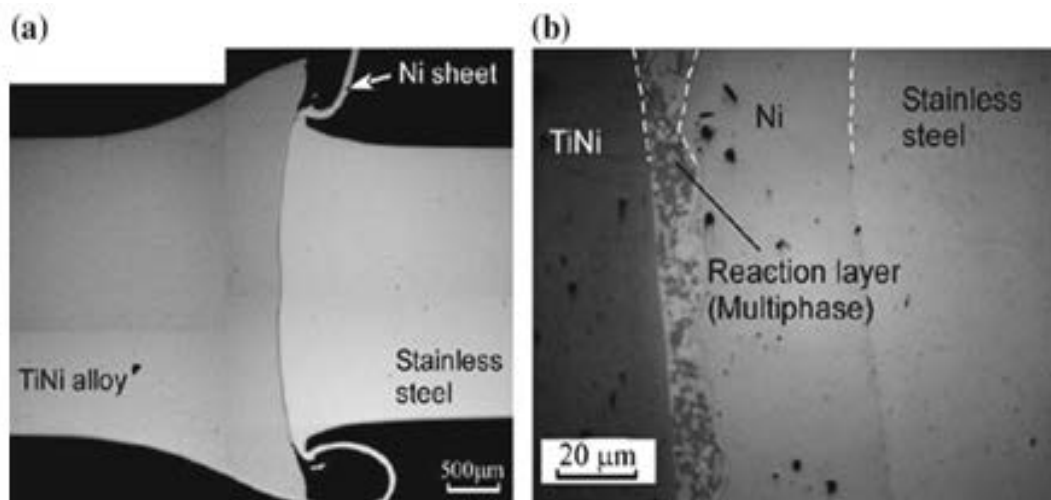
Η συγκόλληση με τριβή είναι ένας τύπος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιεί θερμότητα τριβής και αξονική πίεση για την πλαστική παραμόρφωση του υλικού και για συγκεκριμένο χρόνο. Αυτή η πλαστική παραμόρφωση οδηγεί στην συμπίεση των βασικών υλικών και στη συνέχεια προκαλεί ανάμιξη για να σχηματίσει μία στερεά κατάσταση. Η τήξη του υλικού βάσης δεν απαιτείται καθώς ο σχηματισμός της σύνδεσης οφείλεται στην παραμόρφωση στερεάς κατάστασης [8]. Η συγκόλληση με τριβή έχει αποδείξει ότι είναι εφικτή η σύνδεση παρόμοιων κραμάτων μνήμης σχήματος, αλλά και ανόμοιων υλικών [2]. Παρά τη δυνατότητα υλοποίησης συγκολλήσεων κράματος μνήμης σχήματος, αναφέρονται και προβλήματα όπως η ουσιαστική μεταβολή της θερμοκρασίας του μετασχηματισμού φάσης και η χαμηλότερη αντοχή της σύνδεσης. Η συγκόλληση με τριβή έχει μελετηθεί για όμοια υλικά NiTi και τα ανόμοια υλικά NiTi και ανοξειδωτος χάλυβας. Οι συνδέσεις NiTi στη συγκόλληση με τριβή αποτελούνται από πολύ λεπτότερους κόκκους από αυτούς του βασικού υλικού, λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Αναφέρεται από τους Shinoda et al. [37, 38] ότι η θερμοκρασία μετασχηματισμού φάσης μιας συγκολλημένης ζώνης από υλικό NiTi δεν ευθυγραμμίζεται με το βασικό υλικό. Υποστήριξαν ότι απαιτείται κατάλληλη θερμική επεξεργασία για εφαρμογή μετά από συγκόλληση με τριβή, προκειμένου να μειωθούν οι μεταβολές της θερμοκρασίας στο μετασχηματισμό φάσης και της μνήμης σχήματος σε σχέση με το βασικό υλικό. Η θερμική επεξεργασία των συνδέσεων NiTi μετά από συγκόλληση με τριβή συμβάλλει στην ενίσχυση της αντοχής εφελκυσμού και της ικανότητας μνήμης σχήματος σε σχέση με το βασικό υλικό. Αναφέρεται ότι η θερμική επεξεργασία πριν από τη συγκόλληση με τριβή προκαλεί μείωση των θερμοκρασιών μετασχηματισμού φάσης. Έχει αναφερθεί ότι απαιτείται υψηλότερη πίεση για να επιτευχθούν επιτυχείς συγκολλήσεις. Τουλάχιστον 127 MPa πίεση είναι απαραίτητη για την επίτευξη συγκολλήσεων τριβής σε ράβδο NiTi διαμέτρου 6 mm.

Η ανομοιομόρφη συγκόλληση με τριβή του NiTi με ανοξειδωτο χάλυβα πραγματοποιείται σε ράβδο διαμέτρου 2,5 mm με τη βοήθεια ενδιάμεσου στρώματος νικελίου όπως φαίνεται στο σχήμα 33.

Οι Fukumoto et al.[39] έχουν εφαρμόσει επιτυχώς την ανόμοια συγκόλληση NiTi σε ανοξείδωτο χάλυβα χρησιμοποιώντας τη μεσαία στρώση Ni όπως φαίνεται στο σχήμα 34. Αναφέρεται ότι η ενδιάμεση στρώση Ni βοήθησε στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των NiTi σε ανομοιομορφες συνδέσεις του με ανοξείδωτο χάλυβα. Η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού 512 MPa λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τη μεσαία στρώση Ni για ανόμοιες συγκολλήσεις τριβής από ανοξείδωτο χάλυβα-NiTi. Ο σχηματισμός των IMC όπως Ni₃Ti και NiTi + Ni₃Ti της ευτηκτικής στρώσης αναφέρεται ως στρώμα αντίδρασης μεταξύ του NiTi και της διεπαφής από ανοξείδωτο χάλυβα (βλ. Σχήμα 34 b). Αυτές οι φάσεις σχηματίζονται λόγω του φαινομένου διάχυσης και μηχανικής ανάμειξης. Το ενδιάμεσο στρώμα Ni εμπόδισε τον σχηματισμό φάσης Fe₂Ti των IMCs.



Εικόνα 33. Η έννοια της συγκόλλησης τριβής σε διαφορετικές συνδέσεις NiTi -ανοξείδωτος χάλυβας



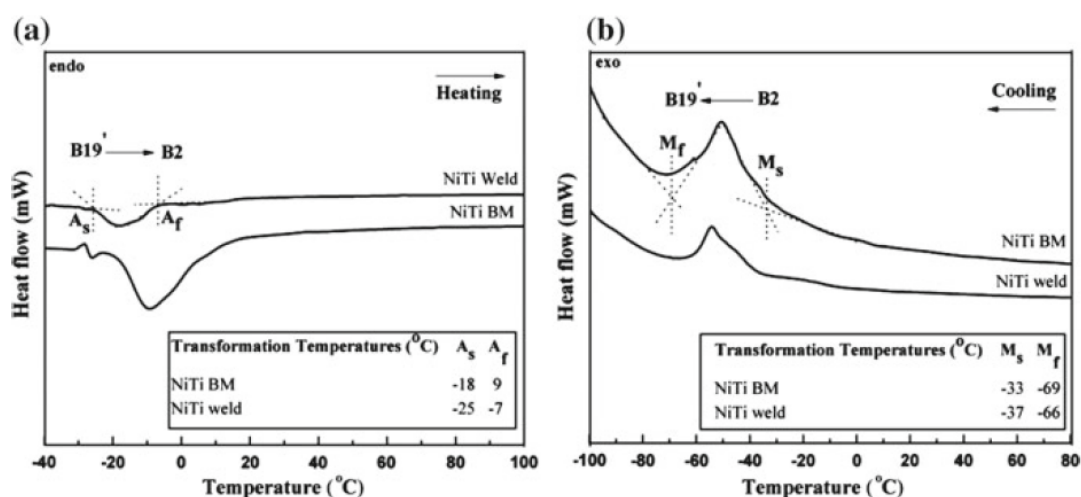
Εικόνα 34. Ανόμοια συγκόλληση τριβής NiTi με ανοξείδωτο χάλυβα, (α) εγκάρσια διατομή και (β) μικροδομή της διεπιφάνειας Ni [39]

Το Fe₂Ti είναι εύθραυστο στη φύση και επομένως η πρόληψη αυτής της φάσης με την εφαρμογή της μεμβράνης Ni βελτίωσε την ευθραυστότητα της σύνδεσης. Από την άλλη πλευρά, η φάση IMC του Fe₂Ti βρίσκεται στην περίπτωση συγκόλλησης με τριβή κράματος NiTi με ανοξείδωτο χάλυβα χωρίς τη χρήση διεπιφάνειας Ni. Ο σχηματισμός των IMCs εξαρτάται από τις παραμέτρους της διαδικασίας συγκόλλησης με τριβή. Η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίζει σημαντικά την ευτηκτική αντίδραση και τον σχηματισμό IMCs. Καθώς

αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, αυξάνεται η ευτηκτική αντίδραση και το στρώμα των IMCs.

3.4.2 Συγκόλληση με τριβή και ανάδευση

Η συγκόλληση με τριβή και ανάδευση (FSW: Friction Stir Welding) είναι μια προηγμένη διαδικασία συγκόλλησης τριβής, όπου η θερμότητα τριβής παράγεται με τη βοήθεια ενός εξωτερικού μη αναλώσιμου εργαλείου, το οποίο προκαλεί στην πλαστική παραμόρφωση του υλικού βάσης [40,41]. Η περιστροφή και η εγκάρσια ροπή του εργαλείου FSW είναι υπεύθυνες για την κίνηση του παραμορφωμένου υλικού, η οποία με τη σειρά της προκαλεί την ανάμιξη των υλικών βάσης [41]. Η συγκόλληση FSW μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορες κατηγορίες υλικών όπως: αλουμίνιο, χαλκός, τιτάνιο, χάλυβας, πλαστικά, σύνθετα υλικά και ανόμοια υλικά [40-42]. Πρόσφατα, εξετάστηκε η χρήση FSW για κράματα μνήμης σχήματος NiTi από τους Prabu et al. [43].



Εικόνα 35. Συμπεριφορά μετασχηματισμού φάσης του συγκολλημένου NiTi με FSW: α) κύκλος θέρμανσης και β) κύκλος ψύξης [43]

Το μη αναλώσιμο υλικό εργαλείων FSW είναι κράμα Densimet με βάση το βολφράμιο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την απόκτηση υλικού NiTi πάχους 1,2 mm. Αυτό το υλικό αναφέρεται ως κατάλληλο υλικό για κράματα μνήμης σχήματος NiTi, καθώς δεν προκαλεί φθορά εργαλείων. Η συγκόλληση FSW περιλαμβάνει περιοχές με διαφορετικές μικροδομές, όπως: τη ζώνη ανάδευσης, τη ζώνη που επηρεάζεται θερμομηχανικά, τη ζώνη που επηρεάζεται θερμικά και υλικό βάσης για το μεγαλύτερο μέρος των υλικών που εξετάστηκαν. Παρ' όλα αυτά, η FSW του NiTi δεν έχει τη διακριτή διασύνδεση που παρατηρήθηκε για αυτές τις διαφορετικές μικροδομές. Η δυναμική ανακρυστάλλωση επιτυγχάνεται κατά την FSW του NiTi, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της παραμόρφωσης σε στερεά κατάσταση. Η FSW του NiTi έχει διατηρήσει την ικανότητα της μνήμης σχήματος σε σχέση με το βασικό υλικό, χωρίς ουσιαστική μεταβολή στις θερμοκρασίες μετασχηματισμού. Ωστόσο, παρατηρείται μικρή αλλαγή στη θερμοκρασία μετασχηματισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 35, η οποία οφείλεται στην παρουσία ιζημάτων, στα μεγέθη των κόκκων, στις

διαταραχές, τις θερμικές τάσεις και την αποδιδυμοποίηση. Στην περίπτωση της FSW, η αποδιδυμοποίηση και η λέπτυνση των κόκκων είναι ισχυροί λόγοι που ευθύνονται για τη μεταβολή των θερμοκρασιών μετασχηματισμού. Η ζώνη συγκόλλησης που επιτυγχάνεται από την FSW έχει διατηρήσει ωστενιτικές και μαρτενσιτικές φάσεις χωρίς καμία αλλαγή σε σχέση με το υλικό βάσης NiTi. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχηματισμός φάσεων IMC όπως NiTi₂ και TiNi₃ στη ζώνη συγκόλλησης είναι συνηθισμένος με συμβατικές διεργασίες συγκόλλησης. Εξάλλου, ο σχηματισμός αυτών των φάσεων δεν υπάρχει στη συγκόλληση που επιτυγχάνεται μέσω της διεργασίας FSW. Η FSW έχει ενισχύσει την τάση διαρροής της συγκόλλησης σε σχέση με το βασικό υλικό, λόγω της εκλέπτυνσης των κόκκων. Η μικροσκληρότητα έχει μειωθεί ελαφρώς στη ζώνη συγκόλλησης των NiTi που έχουν συνδεθεί με FSW. Μπορεί να αναφερθεί ότι η FSW έχει υψηλή δυναμική να επιλεγεί για κράματα μνήμης σχήματος λόγω των προαναφερθεισών δυνατοτήτων της.

Οι Oliveira et al. [44] πραγματοποίησαν FSW υποβοηθούμενη από ηλεκτρικό ρεύμα σε σύνθετο υλικό Al / NiTi. Διαφορετική θερμοκρασία μετασχηματισμού NiTi εμφανίζεται στην περιοχή συγκόλλησης. Σε θερμοκρασία δωματίου, και οι δύο φάσεις μαρτενσίτη και ωστενίτη εμφανίζονται μετά τη συγκόλληση, ενώ η πλήρως ωστενιτική δομή NiTi αναφέρεται πριν από τη συγκόλληση. Σ' αυτό το άρθρο αποδεικνύεται η ικανότητα της συγκόλλησης FSW να σχηματίζει σύνθετα Al / NiTi που θα αυξήσουν τον αριθμό εφαρμογών αυτού του ανόμοιου συνδυασμού.

3.4.3 Συγκόλληση με υπερήχους

Η υπερηχητική συγκόλληση είναι ένας τύπος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιεί μηχανικές ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας και στατικό θλιπτικό φορτίο για τη δημιουργία σχετικής κίνησης μεταξύ δύο επαπτόμενων επιφανειών. Αυτή η τριβή προκαλεί θερμότητα και στη συνέχεια οδηγεί στην πλαστική παραμόρφωση που τελικά σχηματίζει τη σύνδεση των υλικών [8]. Στην περίπτωση της συγκόλλησης με υπερήχους, η σκληρότητα του υλικού του τεμαχίου και το πάχος είναι σημαντικές παράμετροι της κατεργασίας που καθορίζουν την ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη της συγκόλλησης [1, 8]. Οι παράμετροι της διεργασίας, όπως η δύναμη επαφής, το πλάτος του υπερηχητικού κύματος και ο απαιτούμενος χρόνος για τη συγκόλληση, είναι επιπρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό ραφής και των ιδιοτήτων της [8]. Η υπερηχητική συγκόλληση είναι η πλέον κατάλληλη για τα λεπτά εξαρτήματα και μικρού μεγέθους τεμάχια. Η υπερηχητική συγκόλληση κραμάτων μνήμης σχήματος δεν είναι τόσο δημοφιλής όσο η συγκόλληση με λέιζερ. Μέχρι στιγμής, δεν προτείνεται η υπερηχητική συγκόλληση για τα κράματα μνήμης σχήματος [2]. Εντούτοις, μελετάται η εφαρμογή υπερηχητικών κυμάτων για διάφορες εφαρμογές των κραμάτων μνήμης σχήματος. Οι Kong et al. [45] έχουν εκτελέσει υπερηχητική τεχνική για την ενσωμάτωση ιών κραμάτων μνήμης σχήματος μέσα σε μήτρα αλουμινίου. Διαπίστωσαν ότι η ενσωμάτωση κράματος μνήμης σχήματος NiTi σε μήτρα Al μέσω υπερηχητικής συγκόλλησης έχει βελτιωμένη σύνδεση χωρίς να επηρεάζει τις λειτουργικές ιδιότητες των κραμάτων. Συνιστάται χαμηλή πίεση και μικρό πλάτος ταλάντωσης, όπου δεν παρατηρείται υποβάθμιση του υλικού. Επιπλέον, η ραφή συγκόλλησης

αναφέρεται ως ισχυρότερη εάν η θερμοκρασία αυξηθεί στους περίπου 300 ° C, που είναι το 25% της θερμοκρασίας τήξης του κράματος μνήμης σχήματος NiTi.

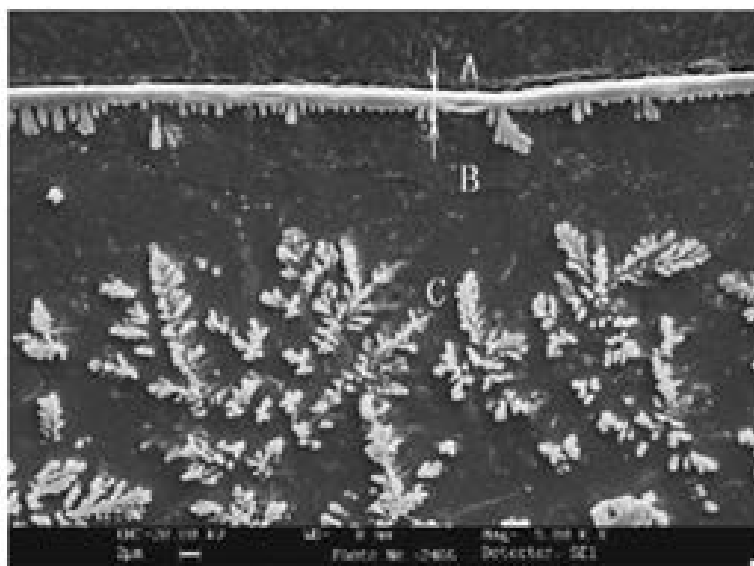
3.4.4 Εκρηκτική συγκόλληση

Η εκρηκτική συγκόλληση είναι επίσης ένας τύπος συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, ο οποίος απαιτεί εκτόνωση με τη βοήθεια κατάλληλων χημικών εκρηκτικών, προκειμένου να επιτευχθούν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες παραμόρφωσης του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Αυτό οδηγεί στην παραμόρφωση του υλικού τεμαχίου λόγω της προσπίπτουσας υψηλής κρουστικής ενέργειας και στη συνέχεια στην ολοκλήρωση της ραφής συγκόλλησης. Στην περίπτωση της εκρηκτικής συγκόλλησης, ο εκρηκτικός πυροκροτητής εφαρμόζεται στην επιφάνεια του ενός από τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν. Το κρουστικό κύμα που παράγεται από την εκτόνωση του εκρηκτικού φορτίου αναπτύσσει μια πολύ υψηλή ταχύτητα στο ένα τεμάχιο και το οδηγεί σε βιαία σύγκρουση με το άλλο τεμάχιο κατεργασίας. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην πλαστική παραμόρφωση και στη συνέχεια το σχηματισμό αρμού. Η εκρηκτική συγκόλληση αναφέρεται ως η καλύτερη τεχνική για τη λήψη συγκόλλησης ανόμοιων υλικών [8]. Μεταξύ όλων των τεχνικών συγκόλλησης στερεάς κατάστασης, η εκρηκτική συγκόλληση είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη για κράματα μνήμης σχήματος [2]. Αρχικά, διερευνάται η εκρηκτική συγκόλληση για ανόμοια συγκόλληση κράματος μνήμης σχήματος με άλλο υλικό. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η εκρηκτική συγκόλληση κράματος μνήμης σχήματος NiTi με χάλυβα, προκειμένου να εκμεταλλευθούμε ορισμένα πλεονεκτήματα όπως είναι: η υψηλή αντίσταση του NiTi σε μηχανική διάβρωση σπηλαιώσης και η δομική αντοχή του χάλυβα [2]. Εκρηκτική συγκόλληση του ωστενιτικού NiTi με κοινό ανθρακούχο χάλυβα εκτελέστηκε από τους Zimmerly et al. [46]. Η διεπιφάνεια συγκόλλησης NiTi-χάλυβα αναλύεται με τη μέθοδο XRD και διακρίβώνεται η παρουσία μαρτενσιτικών κορυφών χαμηλής έντασης λόγω του σχηματισμού μαρτενσίτη που προκαλείται από το κρουστικό κύμα (shock-induced martensite). Η ιδιότητα της μηχανικής διάβρωσης σπηλαιώσης της διεπαφής συγκόλλησης NiTi ελαφρώς μειώνεται σε σχέση με το βασικό υλικό, στο οποίο ενυπάρχει λόγω της παρουσίας μαρτενσιτικής φάσης. Η απώλεια αυτής της αντοχής στη διάβρωση κατά την συγκόλληση είναι το μείζον θέμα που εξετάζεται. Προτείνεται ότι, η ωστενιτική διεπιφάνεια πρέπει να έχει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση σπηλαιώσης. Για το λόγο αυτό, συνιστάται η θερμική διεργασία μετά τη συγκόλληση για να διατηρηθεί η αντίσταση στη διάβρωση σπηλαιώσης. Η αστοχία επικάλυψης (lap) κατά τη δοκιμή εφελκυσμού (λόγω της σημειούμενης διάτμησης στη διεπιφάνεια) αναφέρεται μεμονωμένα είτε σε υλικό βάσης NiTi είτε σε κοινό ανθρακούχο χάλυβα, ενώ ποτέ στη διεπαφή μεταξύ NiTi / χάλυβα. Οι Richman et al.[47] διεξήγαγαν παρόμοιου τύπου μελέτη με το μαρτενσιτικό NiTi και κοινό ανθρακούχο χάλυβα και πρόσθεσαν μερικά επιπλέον αποτελέσματα. Ανέφεραν επίσης ότι το ωστενιτικό NiTi απαιτείται να υποβληθεί σε θερμική κατεργασία μετά από συγκόλληση για να έχει την αντοχή στη διάβρωση που χάνεται κατά την εκρηκτική συγκόλληση. Εκτελείται επίσης εκρηκτική συγκόλληση για να ληφθούν ανόμοιες συγκολλήσεις NiTi με ανοξειδωτο χάλυβα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός αποδυναμώνεται λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που προκαλείται κατά την εκρηκτική συγκόλληση. Παρόλ' αυτά, εφαρμογή θερμικής κατεργασίας μετά τη συγκόλληση μπορεί να οδηγήσει σε ανάκτηση του μετασχηματισμού αυτού. Αναφέρεται ότι δεν παρατηρείται

σχηματισμός εύθραυστων IMCs στην εκρηκτική συγκόλληση NiTi με ανοξείδωτο χάλυβα. Σε περίπτωση διβάθμιας ικανότητας μνήμης σχήματος από την εκρηκτική συγκόλληση NiTi με ανοξείδωτο χάλυβα, η ανακτήσιμη τάση είναι υπερβάλλουσα λόγω της δράσης του ελαστικού τεμαχίου από χάλυβα. Αυτός ο διαφορετικός συνδυασμός βρίσκει ιδανική εφαρμογή στην κατασκευή ενεργοποιητών λόγω των λειτουργικών ιδιοτήτων του. Οι προσπάθειες των συνδέσεων NiTi σε NiTi διεξάγονται επίσης με εκρηκτική συγκόλληση [48-52]. Η εκρηκτική συγκόλληση έχει αποδείξει την ικανότητά της να σχηματίζει ενώσεις NiTi-NiTi που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες μετασχηματισμού και αναλογίες χημικών συνθέσεων. Υπάρχει μια αλλαγή στη θερμοκρασία μετασχηματισμού που παρατηρείται μετά τη συγκόλληση. Μετά τη συγκόλληση απαιτείται θερμική επεξεργασία για να επιτευχθεί σχεδόν η ίδια θερμοκρασία μετασχηματισμού της ζώνης συγκόλλησης. Ωστόσο, η σωστή επιλογή της θερμοκρασίας θερμικής κατεργασίας είναι κρίσιμη.

3.5 Κόλληση πρόσφυσης

Η κόλληση πρόσφυσης είναι ένας τύπος σύνδεσης, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα ενδιάμεσο στρώμα κολλητικών μέσων για να δημιουργήσει έναν δεσμό. Η κόλληση αυτή είναι καλύτερη από τις μηχανικές συνδέσεις και είναι ασθενέστερη από τις ραφές συγκόλλησης που προαναφέρθηκαν [3]. Οι παράμετροι της διαδικασίας όπως: το συγκολλητικό υλικό, το πάχος επίστρωσης της κόλλας, η θερμοκρασία κόλλησης, ο χρόνος κατεργασίας, η πίεση του θαλάμου και η πίεση του εργαλείου είναι σημαντικές. Υπάρχουν διαθέσιμα ορισμένα άρθρα, τα οποία μιλούν για τη συγκόλληση πρόσφυσης κράματος μνήμης σχήματος. Διαφορετικά κολλητικά υλικά όπως ακρυλονιτρίλια, εποξικά, κλπ., μπορούν να εφαρμοστούν στα κράματα μνήμης σχήματος ανάλογα με το διαφορετικό λειτουργικό περιβάλλον τους και την ευαισθησία αποδόμησής τους.



Εικόνα 326. Χημική χάραξη για τη δημιουργία τρισδιάστατης δομής δενδριτών TiN σε δομή μήτρας NiTi (A-B: TiN, C: TiN δενδρίτες + μήτρα NiTi) [53]

Έχει αναφερθεί ότι η κόλληση με κόλλα απαιτεί διαδικασία προεπεξεργασίας επιφανείας για να επιτευχθεί καλύτερη σύνδεση μεταξύ κόλλας και κράματος μνήμης σχήματος. Διαφορετικές επιφανειακές κατεργασίες όπως: χάραξη με οξύ, επίστρωση πολυμερούς και τεχνικές αμμοβολής εφαρμόζονται για την ενίσχυση της πρόσφυσης μεταξύ των συρμάτων NiTi και της εποξειδικής μήτρας. Ανάμεσα σε όλες αυτές τις επιφανειακές κατεργασίες, η αμμοβολή αναφέρεται ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος. Η χημική χάραξη παραβλέπεται εδώ λόγω της σημαντικής απώλειας υλικού. Πέραν τούτου, οι Man και Zhao [53] μελέτησαν την επιφανειακή δομή του NiTi για να βελτιώσουν τις ιδιότητες πρόσφυσης των επιφανειών. Η ακτινοβόληση με λέιζερ εφαρμόζεται σε πλάκες NiTi για να ληφθεί αρμός και πολύ καθαρό αργό διοχετεύεται ταυτόχρονα στην τηγμένη περιοχή της ραφής. Η χημική χάραξη πραγματοποιείται για να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη δομή δενδριτών TiN σε μια δομή μήτρας NiTi, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 36. Πιστεύεται ότι αυτός ο τύπος δομής δημιουργείται λόγω του διαφορετικού ρυθμού χημικής χάραξης. Η φάση TiN μεταφέρεται στο κάτω μέρος της κόλλησης λόγω του φαινομένου Maragoni, που με τη σειρά του προκαλεί το σχηματισμό δενδριτικής δομής. Έχει αναφερθεί ότι η αντοχή πρόσφυσης μπορεί να ενισχυθεί έως και 150% από τα δείγματα χάραξης με αμμοβολή, με κατάλληλο χρόνο χάραξης. Αυτό οφείλεται σε περισσότερους ελεύθερους επιφανειακούς δενδρίτες που ελήφθησαν μετά από μακράς διάρκειας χάραξη [54].

3.6 Μπρουτζοκόλληση και ασημοκόλληση

Η μπρουτζοκόλληση και η ασημοκόλληση είναι τύποι διεργασιών σύνδεσης που χρησιμοποιούν κόλληση από υλικά χαμηλού σημείου τήξης σε σύγκριση με το μέταλλο βάσης. Στην περίπτωση της μπρουτζοκόλλησης εφαρμόζονται θερμοκρασίες μικρότερες από 450°C, ενώ στις ασημοκολλήσεις χρησιμοποιούνται θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 450°C [2, 8]. Σε αυτές τις διεργασίες, η συγκόλληση επιτυγχάνεται σε μικρή απόσταση με μηχανισμό διάχυσης καθώς το υλικό βάσης διαβρέχεται από το λιωμένο υλικό της κόλλησης. Διάφοροι παράγοντες όπως: η επιλογή του υλικού πληρώσεως, οι μηχανικές ιδιότητες, η διαβρεξιμότητα και ο σχηματισμός IMCs πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη μπρουτζοκόλληση και την ασημοκόλληση.

Οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται επιτυχώς για τη συγκόλληση κραμάτων μνήμης και ανόμοιων υλικών. Οι αναφορές σχετικά με την ασημοκόλληση κράματος μνήμης σχήματος είναι πολύ περιορισμένες. Διαφορετικά συστήματα NiTi-ανοξειδωτου χάλυβα, NiTi-τιτάνιο, NiTi-NiAl, κλπ., έχουν μελετηθεί έναντι μπρουτζοκόλλησης [2]. Διάφορες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται για την τήξη του υλικού πληρώσεως όπως: λέιζερ, ηλεκτρικός κλίβανος, φούρνος μικροκυμάτων και φλόγα οξυακετυλενίου. Διαφορετικά σύρματα πληρώσεως όπως: χαλκός, τιτάνιο (Ti), νιόβιο (Nb), άργυρος, Ag-Cu-Ti, Ag-Ti και άλλα σύρματα πληρώσεως με βάση τον Ag χρησιμοποιούνται για την επίτευξη μπρουτζοκόλλησης NiTi [2]. Οι Yang et al. [55] ανέφεραν καλύτερες λειτουργικές ιδιότητες των συγκολλημένων συνδέσεων NiTi χρησιμοποιώντας Cu ως υλικό πλήρωσης για συγκόλληση με υπέρυθρο λέιζερ. Έχει αναφερθεί ότι πλήρης ανάκτηση της ικανότητας μνήμης σχήματος παρατηρείται με υλικό πλήρωσης Cu, ενώ οι ραφές Ti-15Cu-15Ni με βάση το Ti απέτυχαν σε δοκιμές κάμψης λόγω της πιο ψαθυρής συμπεριφοράς τους. Οι συγγραφείς των αναφορών [56-59]

πραγματοποίησαν μπρουτζοκόλληση υπό κενό σε υλικό βάσης NiTi χρησιμοποιώντας Nb ως υλικό πλήρωσης. Ανέφεραν ότι ο χρόνος συγκόλλησης επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση Nb και το προετυκτικό NiTi. Ανέφεραν επίσης βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως 5% σχετική πυκνότητα, υπερελαστικότητα των ραφών και 50% ανάκτηση των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά την αποφόρτιση. Το υλικό πλήρωσεως Nb αναφέρεται επίσης από τους Wang et al. [60] για τη δουλειά τους στη μπρουτζοκόλληση σε κλίβανο βασικού υλικού NiTi. Ανέφεραν ότι δημιουργείται ευτηκτική αντίδραση μεταξύ των NiTi και Nb για τη συγκόλληση των συρμάτων NiTi με τη σκόνη Nb να εναποτίθεται στις περιοχές επαφής των συρμάτων. Οι Shiue και Wu [61] διερεύνησαν τη μπρουτζοκόλληση με λέιζερ υπερύθρου για να συνδέσουν ισοατιμικό υλικό βάσης NiTi, χρησιμοποιώντας υλικό πλήρωσεως Ag-Cu-Ti. Η ανάκτηση της μνήμης σχήματος επηρεάζεται από τις πλούσιες σε Ag, σε Cu και σε Ti φάσεις. Αναφέρεται ότι η παρουσία περισσότερης πλούσιας σε Ti φάσης οδηγεί σε μεγαλύτερης έκτασης ανάκτηση μνήμης σχήματος. Ωστόσο, παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση στην εκδήλωση μνήμης σχήματος λόγω διακυμάνσεων στις μικροδομές. Οι van der Eijk et al. [62] διεξήγαγαν μπρουτζοκόλληση του NiTi με συρμάτινα καλώδια Ag-Ti και Ag-Cu-Ti σε φούρνο μικροκυμάτων. Ανέφεραν σημαντική αλλαγή στις φάσεις.

Η ανόμοια ένωση υλικών κατά την οποία ενώνονται κράματα μνήμης σχήματος με άλλα υλικά μελετάται με ασημοκόλληση και μπρουτζοκόλληση. Οι Gale και Guan [63] διεξήγαγαν μελέτες σχετικά με τη σύνδεση NiTi με NiAl με μπρουτζοκόλληση κλιβάνου με τη βοήθεια υλικού πλήρωσης Cu. Μετά τη συγκόλληση, δεν αναφέρθηκαν σημαντικές μεταβολές της μικροδομής. Ωστόσο, παρατηρείται μικρή αλλαγή στη θερμοκρασία μετασχηματισμού. Διάφοροι συγγραφείς έχουν διερευνήσει το NiTi σε σύστημα συγκόλλησης του με ανοξειδωτο χάλυβα με μπρουτζοκόλληση και ασημοκόλληση [2]. Κατέληξαν ότι το καλώδιο πλήρωσεως με βάση τον Ag είναι το καταλληλότερο για αυτόν τον συνδυασμό. Διάφορες φάσεις όπως Ag, AgZn, Ag₃Sn και Cu₅Zn₈ αναφέρονται μέσα στη μπρουτζοκόλληση της διεπαφής NiTi με τον ανοξειδωτο χάλυβα [2,3]. Διάφορα στοιχεία όπως Ag, Cu, Sn και Zn διαχέονται σε αυτά τα δύο βασικά υλικά, λόγω του σχηματισμού στρώματος αντίδρασης διάχυσης [2]. Ταυτόχρονα, στοιχεία όπως το Ni και Ti του υλικού βάσης NiTi και το Fe, Cr και Ni από ανοξειδωτο χάλυβα διαχέονται στο συγκολλημένο κράμα. Εκτός αυτού, η επίδραση της μνήμης σχήματος επιδεινώνεται στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή NiTi [2, 3]. Στην περίπτωση της αυτογενούς μπρουτζοκόλλησης με λέιζερ συστήματος NiTi και ανοξειδωτου χάλυβα, το λέιζερ είναι τοποθετημένο είτε από την πλευρά του ανοξειδωτου χάλυβα είτε από την πλευρά του NiTi και στη συνέχεια κινείται προς την πλευρά της διεπαφής [64, 65]. Δεν υπάρχει καλώδιο πλήρωσης για αυτόν τον τύπο συστήματος. Με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, η αντοχή σε εφελκυσμό βελτιώνεται στα 500 MPa. Ωστόσο, η υπερελαστική συμπεριφορά δεν αναφέρεται κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής. Η μπρουτζοκόλληση του NiTi με υπερκράμα Ni επιχειρήθηκε σε φούρνο μικροκυμάτων χρησιμοποιώντας σύρμα πλήρωσης Ag-Cu [62]. Αναφέρεται σύνθετη μικροδομή λόγω της πολλαπλής φάσης διάχυσης. Έχουν αναφερθεί αρνητικά αποτελέσματα με ελαττώματα όπως το πορώδες και έχει προταθεί ότι το σύρμα πλήρωσης Ag-Cu δεν είναι κατάλληλο για το ανόμοιο σύστημα NiTi και Hastalloy [66]. Το σύρμα πλήρωσεως Ag-Cu υιοθετείται για ένα άλλο ανόμοιο σύστημα υλικών NiTi σε NiTiNb και παρατηρείται ευρεία ανάκτηση θερμοκρασίας από -60 στους + 45 ° C.

3.7 Σύνοψη

Διάφορες τεχνικές συγκόλλησης όπως: συγκόλληση TIG, συγκόλληση με πλάσμα, συγκόλληση με δέσμη λέιζερ, συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων, συγκόλληση αντίστασης, συγκόλληση τριβής, συγκόλληση με τριβή και ανακίνηση, εκρηκτική συγκόλληση, υπερηχητική συγκόλληση, συγκόλληση με διάχυση, μπρουτζοκόλληση, ασημοκόλληση και οι κολλήσεις ερευνώνται σχετικά με προκλήσεις που εμφανίζονται κατά τη λήψη συγκολλήσεων με μνήμης σχήματος. Η θερμοκρασία μετασχηματισμού φάσης, η ικανότητα μνήμης σχήματος των συγκολλήσεων, η μικροδομή της συγκόλλησης, ο σχηματισμός των IMCs και οι ιδιότητες συγκόλλησης συνοψίζονται σε σχέση με αυτές τις διεργασίες συγκόλλησης. Αναφέρεται ότι η τεχνική συγκόλλησης με λέιζερ είναι η πλέον διερευνημένη διαδικασία μεταξύ των διαθέσιμων διεργασιών συγκόλλησης εξαιτίας των πλεονεκτημάτων της από τον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας, τη χαμηλή εισαγωγή θερμότητας, την υψηλή πυκνότητα, την ικανότητα αναπαραγωγής, την περιορισμένη HAZ και τη μονοχρωματική φύση. Η συγκόλληση κράματος μνήμης σχήματος με άλλο υλικό συζητείται επίσης για τις εξεταζόμενες τεχνικές συγκόλλησης. Οι διαδικασίες συγκόλλησης με λέιζερ και οι μέθοδοι συγκόλλησης στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την απόκτηση ανόμοιας σύνδεσης κράματος μνήμης σχήματος με άλλο υλικό. Οι διεργασίες συγκόλλησης σε στερεά κατάσταση μπορούν να αναπτυχθούν περαιτέρω και να μελετηθούν λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητά τους να διατηρούν την ικανότητα μνήμης σχήματος και να μην σχηματίζουν επιβλαβείς IMCs στη ζώνη συγκόλλησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτούνται κατεργασίες μετά τη συγκόλληση προκειμένου να διατηρηθεί η ιδιότητα μνήμης σχήματος της συγκόλλησης. Λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες και τις πιθανές εφαρμογές των κραμάτων μνήμης σχήματος, υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθούν τεχνικές συγκόλλησης και σύνδεσης για διάφορα κράματα μνήμης σχήματος. Η πλειοψηφία των μελετών επικεντρώνεται στο κράμα μνήμης σχήματος NiTi, το οποίο μπορεί να επεκταθεί και για άλλα κράματα μνήμης σχήματος.

References

1. K. Mehta, Advanced joining and welding techniques: an overview, in *Advanced Manufacturing Technologies* (Springer International Publishing, 2017), pp. 101–136. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-56099-1_5
2. J.P. Oliveira, R.M. Miranda, F.B. Fernandes, Welding and joining of NiTi shape memory alloys: a review. *Prog. Mater. Sci.* **88**, 412–466 (2017)
3. O. Akselsen, Joining of shape memory alloys, in *Shape Memory Alloys* (InTech, 2010), pp. 183–210
4. A. Ikai, K. Kimura, H. Tobushi, TIG welding and shape memory effect of TiNi shape memory alloy. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **7**(6), 646–655 (1996)
5. J.P. Oliveira, D. Barbosa, F.B. Fernandes, R.M. Miranda, Tungsten inert gas (TIG) welding of Ni-rich NiTi plates: functional behavior. *Smart Mater. Struct.* **25**(3), 03LT01 (2016)
6. G. Fox, R. Hahnlen, M.J. Dapino, Fusion welding of nickel–titanium and 304 stainless steel tubes: Part II: tungsten inert gas welding. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **24**(8), 962–972 (2013)
7. S.X. Lue, Z.L. Yang, H.G. Dong, Welding of shape memory alloy to stainless steel for medical occluder. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **23**(1), 156–160 (2013)
8. J. Norrish, *Advanced Welding Processes* (Institute of Physics, 1992)
9. C. van der Eijk, H. Fostervoll, Z.K. Sallom, O.M. Akselsen, Plasma welding of NiTi to NiTi, stainless steel and hastelloy C276, in *Proceedings of the ASM Materials Solutions Conference* (2003), pp. 125–129
10. G.J. Julien, A. Sickinger, G.A. Hislop, U.S. Patent No. 6,043,451. (U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC, 2000)
11. S. Ozel, B. Kurt, I. Somunkiran, N. Orhan, Microstructural characteristic of NiTi coating on stainless steel by plasma transferred arc process. *Surf. Coat. Technol.* **202**(15), 3633–3637 (2008)
12. J.P.D.S. Oliveira, Laser welding of shape memory alloys, Doctoral thesis (2016), pp. 1–187
13. J.P. Oliveira, B. Panton, Z. Zeng, T. Omori, Y. Zhou, R.M. Miranda, F.B. Fernandes, Laser welded superelastic Cu–Al–Mn shape memory alloy wires. *Mater. Des.* **90**, 122–128 (2016)
14. A. Falvo, F.M. Furgiuele, C. Maletta, Laser welding of a NiTi alloy: mechanical and shape memory behaviour. *Mater. Sci. Eng., A* **412**(1), 235–240 (2005)
15. C.W. Chan, H.C. Man, Laser welding of thin foil nickel–titanium shape memory alloy. *Opt. Lasers Eng.* **49**(1), 121–126 (2011)
16. C.W. Chan, H.C. Man, T.M. Yue, Effect of postweld heat treatment on the microstructure and cyclic deformation behavior of laser-welded NiTi-shape memory wires. *Metall. Mater. Trans. A* **43**(6), 1956–1965 (2012)
17. C.W. Chan, H.C. Man, F.T. Cheng, Fatigue behavior of laser-welded NiTi wires in small-strain cyclic bending. *Mater. Sci. Eng., A* **559**, 407–415 (2013)
18. J.P. Oliveira, F.B. Fernandes, N. Schell, R.M. Miranda, Shape memory effect of laser welded NiTi plates. *Funct. Mater. Lett.* **8**(06), 1550069 (2015)
19. G.R. Mirshekari, A. Kermpur, A. Saatchi, S.K. Sadrnezhad, A.P. Soleymani, Microstructure, cyclic deformation and corrosion behavior of laser welded NiTi shape memory wires. *J. Mater. Eng. Perform.* **24**(9), 3356–3364 (2015)
20. C.W. Chan, H.C. Man, T.M. Yue, Parameter optimization for laser welding of NiTi wires by the taguchi method. *Lasers Eng. (Old City Publishing)* **30** (2015)
21. A. Bahador, S.N. Saud, E. Hamzah, T. Abubakar, F. Yusof, M.K. Ibrahim, Nd: YAG laser welding of Ti-27 at.% Nb shape memory alloys. *Weld. World* **60**(6), 1133–1139 (2016)
22. P. Sathiya, T. Ramesh, Experimental investigation and characterization of laser welded NiTi shape memory alloys. *J. Manuf. Processes* **25**, 253–261 (2017)
23. C.W. Chan, H.C. Man, T.M. Yue, Susceptibility to environmentally induced cracking of laser welded NiTi wires in Hanks’ solution at open-circuit potential. *Mater. Sci. Eng., A* **544**, 38–47 (2012)
24. M. Mehrpouya, A. Gisario, M. Elahinia, Laser welding of NiTi shape memory alloy: a review. *J. Manuf. Processes* **31**, 162–186 (2018)
25. Z. Zeng, J.P. Oliveira, M. Yang, D. Song, B. Peng, Functional fatigue behavior of NiTi-Cu dissimilar laser welds. *Mater. Des.* **114**, 282–287 (2017)
26. J.P. Oliveira, Z. Zeng, C. Andrei, F.B. Fernandes, R.M. Miranda, A.J. Ramirez, T. Omori, N. Zhou, Dissimilar laser welding of superelastic NiTi and CuAlMn shape memory alloys. *Mater. Des.* **128**, 166–175 (2017)
27. P. Schlossmacher, T. Haas, A. Schüssler, Laser-welding of a Ni-rich TiNi shape memory alloy: mechanical behavior. *J. Phys. IV* **7**(C5), C5–251 (1997)
28. Y.G. Song, W.S. Li, L. Li, Y.F. Zheng, The influence of laser welding parameters on the microstructure and mechanical property of the as-jointed NiTi alloy wires. *Mater. Lett.* **62**(15), 2325–2328 (2008)
29. A. Falvo, F.M. Furgiuele, C. Maletta, Functional behaviour of a NiTi-welded joint: two-way shape memory effect. *Mater. Sci. Eng., A* **481**, 647–650 (2008)
30. L.A. Vieira, F.B. Fernandes, R.M. Miranda, R.J.C. Silva, L. Quintino, A. Cuesta, J.L. Ocaña, Mechanical behaviour of Nd: YAG laserwelded superelastic NiTi. *Mater. Sci. Eng., A* **528**(16), 5560–5565 (2011)
31. B. Panton, A. Pequegnat, Y.N. Zhou, Dissimilar laser joining of NiTi SMA and MP35N wires. *Metall. Mater. Trans. A* **45**(8), 3533–3544 (2014)
32. D. Yang, H.C. Jiang, M.J. Zhao, L.J. Rong, Microstructure and mechanical behaviors of electron beam welded NiTi shape memory alloys. *Mater. Des.* **57**, 21–25 (2014)
33. D. Yang, H.C. Jiang, M.J. Zhao, L.J. Rong, Effect of post-weld annealing on microstructure and properties of NiTi welding joints. *Mater. Res. Innovations* **18**(sup4), S4–588 (2014)
34. B. Tam, A. Pequegnat, M.I. Khan, Y. Zhou, Resistance microwelding of Ti-55.8 wt pct Ni nitinol wires and the effects of pseudoelasticity. *Metall. Mater. Trans. A* **43**(8), 2969–2978 (2012)
35. K. Mehta, M. Gupta, P. Sharma, Nano-machining, nano-joining, and nano-welding, in *Micro and Precision Manufacturing* (Springer, Cham, 2018), pp. 71–86. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68801-5_4

36. V. Delobelle, P. Delobelle, Y. Liu, D. Favier, H. Louche, Resistance welding of NiTi shape memory alloy tubes. *J. Mater. Process. Technol.* **213**(7), 1139–1145 (2013)
37. T. Shinoda, T. Tsuchiya, H. Takahashi, Friction welding of shape memory alloy. *Weld. Int.* **6**(1), 20–25 (1992)
38. T. Shinoda, T. Owa, V. Magula, Microstructural analysis of friction welded joints in TiNi alloy. *Weld. Int.* **13**(3), 180–185 (1999)
39. S. Fukumoto, T. Inoue, S. Mizuno, K. Okita, T. Tomita, A. Yamamoto, Friction welding of TiNi alloy to stainless steel using Ni interlayer. *Sci. Technol. Weld. Joining* **15**(2), 124–130 (2010)
40. K.P. Mehta, V.J. Badheka, A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants. *Mater. Manuf. Processes* **31**(3), 233–254 (2016)
41. K.P. Mehta, V.J. Badheka, Influence of tool design and process parameters on dissimilar friction stir welding of copper to AA6061-T651 joints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **80**(9–12), 2073–2082 (2015)
42. K.P. Mehta, V.J. Badheka, Hybrid approaches of assisted heating and cooling for friction stir welding of copper to aluminum joints. *J. Mater. Process. Technol.* **239**, 336–345 (2017)
43. S.M. Prabu, H.C. Madhu, C.S. Perugu, K. Akash, P.A. Kumar, S.V. Kailas, M. Anbarasu, I.A. Palani, Microstructure, mechanical properties and shape memory behaviour of friction stir welded nitinol. *Mater. Sci. Eng., A* **693**, 233–236 (2017)
44. J.P. Oliveira, J.F. Duarte, P. Inácio, N. Schell, R.M. Miranda, T.G. Santos, Production of Al/NiTi composites by friction stir welding assisted by electrical current. *Mater. Des.* **113**, 311–318 (2017)
45. C.Y. Kong, R.C. Soar, P.M. Dickens, Ultrasonic consolidation for embedding SMA fibres within aluminium matrices. *Compos. Struct.* **66**(1), 421–427 (2004)
46. C.A. Zimmerly, O.T. Inal, R.H. Richman, Explosive welding of a near-equiatomic nickel titanium alloy to low-carbon steel. *Mater. Sci. Eng., A* **188**(1–2), 251–254 (1994)
47. R.H. Richman, A.S. Rao, D. Kung, Cavitation erosion of NiTi explosively welded to steel. *Wear* **181**, 80–85 (1995)
48. T. Xing, Y. Zheng, L. Cui, Transformation and damping characteristics of NiTi/NiTi alloys synthesized by explosive welding. *Mater. Trans.* **47**(3), 658–660 (2006)
49. J. Li, Y. Zheng, L. Cui, Transformation characteristics of TiNi/TiNi alloys synthesized by explosive welding. *Front. Mater. Sci. Chin.* **1**(4), 351–355 (2007)
50. L. Juntao, Z. Yanjun, C. Lishan, Effects of severe plastic deformation and heat treatment on transformation behavior of explosively welded duplex TiNi–TiNi. *Pet. Sci.* **4**(4), 107–112 (2007)
51. Z. Yan, L.S. Cui, Y.J. Zheng, Microstructure and martensitic transformation behaviors of explosively welded NiTi/NiTi laminates. *Chin. J. Aeronaut.* **20**(2), 168–171 (2007)
52. T.Y. Xing, Y.J. Zheng, L.S. Cui, X.J. Mi, Influence of aging on damping behavior of TiNi/TiNi alloys synthesized by explosive welding. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **19**(6), 1470–1473 (2009)
53. H.C. Man, N.Q. Zhao, Enhancing the adhesive bonding strength of NiTi shape memory alloys by laser gas nitriding and selective etching. *Appl. Surf. Sci.* **253**(3), 1595–1600 (2006)
54. F. Niccoli, M. Alfano, L. Bruno, F. Furguele, C. Maletta, Mechanical and functional properties of nickel titanium adhesively bonded joints. *J. Mater. Eng. Perform.* **23**(7), 2385–2390 (2014)
55. T.Y. Yang, R.K. Shiue, S.K. Wu, Infrared brazing of Ti 50 Ni 50 shape memory alloy using pure Cu and Ti–15Cu–15Ni foils. *Intermetallics* **12**(12), 1285–1292 (2004)
56. D.S. Grummon, J.A. Shaw, J. Foltz, Fabrication of cellular shape memory alloy materials by reactive eutectic brazing using niobium. *Mater. Sci. Eng., A* **438**, 1113–1118 (2006)
57. D. Grummon, K.B. Low, J. Foltz, J. Shaw, A new method for brazing nitinol based on the quasibinary TiNi–Nb system, in *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007), p. 1741
58. J.A. Shaw, D.S. Grummon, J. Foltz, Superelastic NiTi honeycombs: fabrication and experiments. *Smart Mater. Struct.* **16**(1), S170 (2007)
59. J.A. Shaw, C. Churchill, N. Triantafyllidis, P. Michailidis, D. Grummon, J. Foltz, Shape memory alloy honeycombs: experiments and simulation, in *Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, vol. 1 (2007), pp. 428–436
60. L. Wang, C. Wang, D.C. Dunand, Microstructure and strength of NiTi–Nb eutectic braze joining NiTi wires. *Metall. Mater. Trans. A* **46**(4), 1433–1436 (2015)
61. R.H. Shiue, S.K. Wu, Infrared brazing of Ti 50 Ni 50 shape memory alloy using two Ag–Cu–Ti active braze alloys. *Intermetallics* **14**(6), 630–638 (2006)
62. C. van der Eijk, Z.K. Sallom, O.M. Akselsen, Microwave brazing of NiTi shape memory alloy with Ag–Ti and Ag–Cu–Ti alloys. *Scripta Mater.* **58**(9), 779–781 (2008)
63. W.F. Gale, Y. Guan, Microstructural development in copper-interlayer transient liquid phase bonds between martensitic NiAl and NiTi. *J. Mater. Sci.* **32**(2), 357–364 (1997)
64. M.G. Li, D.Q. Sun, X.M. Qiu, D.X. Sun, S.Q. Yin, Effects of laser brazing parameters on microstructure and properties of TiNi shape memory alloy and stainless steel joint. *Mater. Sci. Eng., A* **424**(1), 17–22 (2006)
65. M.G. Li, D.Q. Sun, X.M. Qiu, S.Q. Yin, Corrosion behavior of the laser-brazed joint of TiNi shape memory alloy and stainless steel in artificial saliva. *Mater. Sci. Eng., A* **441**(1), 271–277 (2006)
66. X.K. Zhao, L. Lan, H.B. Sun, J.H. Huang, H. Zhang, Preparation of NiTi/NiTiNb laminated alloys by vacuum brazing, in *Advanced Materials Research*, vol. 97 (Trans Tech Publications, 2010), pp. 1653–1656

Κεφάλαιο 4^ο

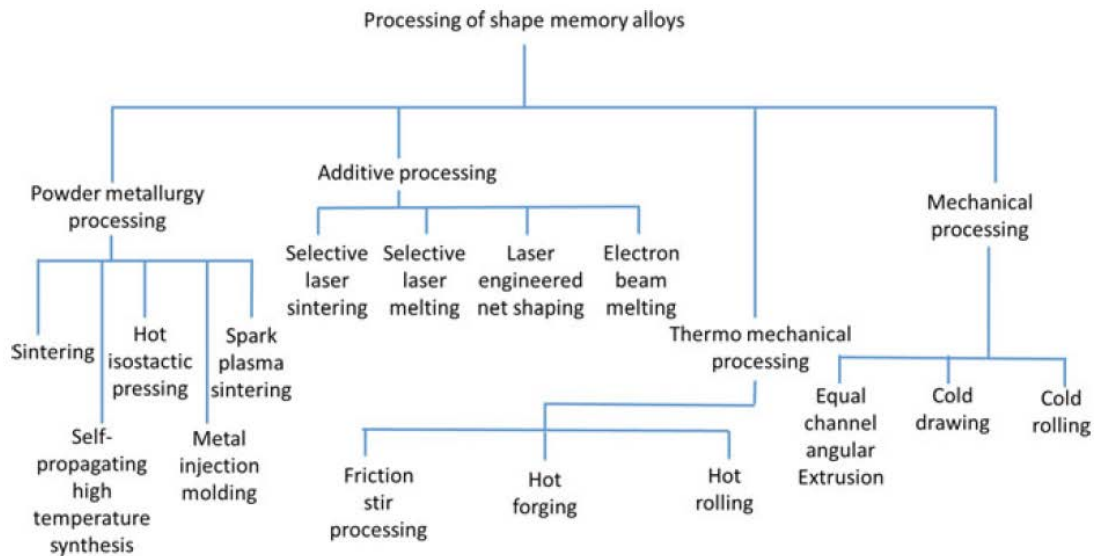
Κατεργασιμότητα των κραμάτων μνήμης σχήματος

4.1 Εισαγωγή

Η κατεργασιμότητα ενός υλικού αναφέρεται σε μια σειρά κατεργασιών που εφαρμόζονται για τη μετατροπή της πρώτης ύλης σε σχεδόν τελικό προϊόν. Υφίσταται μεγάλος κατάλογος κατεργασιών για την απόδοση του τελικού προϊόντος και πλήθος τεχνικών από τις κατεργασίες αυτές εφαρμόζονται στα κράματα μνήμης σχήματος. Η διατήρηση του φαινόμενου μνήμης σχήματος, οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων, οι μεταβολές στη μικροδομή, και ο σχηματισμός ενδομεταλλικών ενώσεων (IMCs) και καθιζήσεων είναι θέματα που σχετίζονται με τις κατεργασίες των κραμάτων μνήμης σχήματος, δεδομένου ότι οι θερμικές και μηχανικές κατεργασίες επηρεάζουν τις χημικές αντιδράσεις και το μετασχηματισμό φάσεων των κραμάτων μνήμης σχήματος [1-3]. Οι παραμέτροι κατεργασίας που επηρεάζουν αυτά τα θέματα εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθώντας μια συγκεκριμένη ταξινόμηση των τεχνικών κατεργασίας, όπως: κατεργασίες κonioμεταλλουργίας, προσθετικές κατεργασίες, θερμομηχανικές κατεργασίες και μηχανικές κατεργασίες [1-3]. Περαιτέρω ταξινομήσεις αυτών των θεμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 37, οι οποίες συζητούνται ξεχωριστά σε επόμενα κεφάλαια. Συμβατικές και προηγμένες τεχνικές κατεργασίας έχουν επιχειρηθεί να διαμορφώσουν τα κράματα μνήμης που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Τα κράματα μνήμης σχήματος όπως NiTi, FeMnSi, Fe-Mn-Si-Cr-NiCu-Zn-Al, Cu-Al-Ni και Ni-Fe-Ga αναφέρονται στη συνέχεια και χρησιμοποιούνται στις διάφορες τεχνικές κατεργασίας [1-7].

4.2 Κατεργασίες κonioμεταλλουργίας

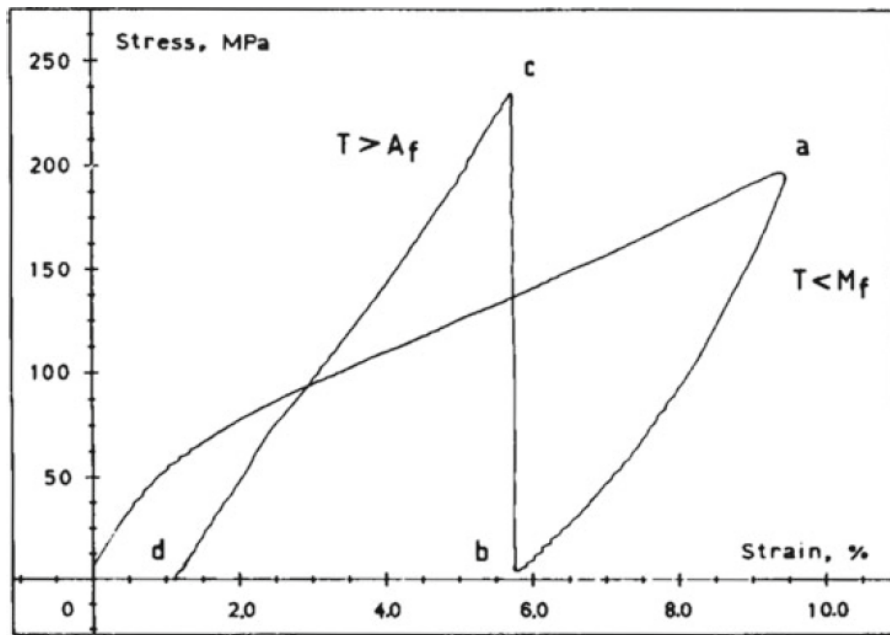
Η κonioμεταλλουργία είναι μια συμβατική μέθοδος κατεργασίας υλικού στην οποία μεταλλική σκόνη υποβάλλεται σε κατεργασία για να ληφθεί τελικό προϊόν χωρίς καμία αφαίρεση υλικού. Διάφορες τεχνικές κonioμεταλλουργίας όπως: η πυροσυσσωμάτωση (sintering), η θερμή ισοστατική συμπίεση (hot isostatic pressing), η χύτευση με έγχυση μετάλλου (metal injection molding), η αυτόματη σύνθεση υψηλών θερμοκρασιών (self-propagating high-temperature synthesis) και η πυροσυσσωμάτωση με σπινθήρα πλάσματος αναφέρονται για διάφορα κράματα μνήμης σχήματος σε μεγάλο αριθμό της βιβλιογραφίας. Τα κράματα μνήμης σχήματος NiTi, Cu-Al-Ni-Mn, Cu-Al-Ni και Fe-Mn-Si-Cr-Ni κατεργάζονται και μελετώνται με διάφορες από τις προαναφερθείσες τεχνικές κonioμεταλλουργίας [1-12]. Ωστόσο, οι περισσότερες αναφορές αφορούν το κράμα μνήμης σχήματος NiTi, λαμβάνοντας υπόψη την αποδοχή υλικών για διάφορες χρήσιμες εφαρμογές. Κάθε μία από τις προαναφερθείσες διαδικασίες συζητείται διεξοδικά παρακάτω.



Εικόνα 33. Ταξινόμηση των τεχνικών κατεργασίας των κραμάτων μνήμης σχήματος

4.2.1 Συμβατική πυροσυσσωμάτωση

Η πυροσυσσωμάτωση είναι η διαδικασία κατασκευής στερεάς μάζας υλικού με συμπίεση και μορφοποίηση, με την εφαρμογή θερμότητας ή πίεσης χωρίς τήξη του. Η συμβατική πυροσυσσωμάτωση εφαρμόζεται κυρίως στα κράματα μνήμης σχήματος NiTi [12, 13]. Σκόνες των μετάλλων Ni και Ti αναμιγνύονται και κατεργάζονται με συμβατική πυροσυσσωμάτωση προκειμένου να γίνει κράμα μνήμης σχήματος. Τα προβλήματα όπως: η ομογενοποίηση και η επίτευξη υψηλής πυκνότητας, συνδέονται με τη συμβατική πυροσυσσωμάτωση κόνεων Ni και Ti σε ισομοριακά μίγματα. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατασκευή του υλικού NiTi με συμβατική πυροσυσσωμάτωση είναι ο σχηματισμός πορώδους. Υπάρχουν κάποιοι παράγοντες όπως: η εφαρμοζόμενη πίεση, η έλλειψη ισορροπίας στη διάχυση του Ni στο Ti και του Ti στο Ni, η συστολή κατά τη διάρκεια του sintering και οι τριχοειδείς δυνάμεις, που καθορίζουν το σχηματισμό πορώδους στην συμβατική πυροσυσσωμάτωση του κράματος μνήμης σχήματος NiTi [12, 13]. Για την επίτευξη της μέγιστης ενθαλπίας μετασχηματισμού μνήμης σχήματος απαιτείται ομοιογενής μεσομεταλλική ένωση NiTi σε περίπτωση συμβατικής πυροσυσσωμάτωσης σε στοιχειακές σκόνες Ni και Ti [13]. Το NiTi που έχει υποστεί κατεργασία με συνηθισμένη πυροσυσσωμάτωση είναι συμβατό με το εμπορικά παραγόμενο κατεργασμένο υλικό NiTi όσον αφορά την επίδραση μνήμης σχήματος [13]. Η πυκνότητα του NiTi που έχει υποστεί κατεργασία με συμβατική πυροσυσσωμάτωση είναι σημαντική για να εκδηλωθεί το αποτέλεσμα της μνήμης σχήματος σε σημαντικό βαθμό [12]. Ωστόσο, έρευνες οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το πορώδες $Ti_{49}Ni_{51}$ που λαμβάνεται μέσω τυπικής πυροσυσσωμάτωσης μπορεί να εμφανίσει φαινόμενα μνήμης σχήματος μέχρι ένα σημαντικό επίπεδο, όπως φαίνεται από το σχήμα 38 και ισχυρίστηκαν ότι είναι συγκρίσιμο με το ίδιο χυτό κράμα μνήμης σχήματος.



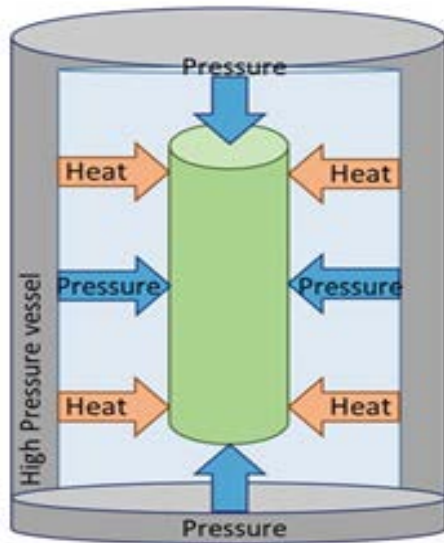
Εικόνα 34. Η ικανότητα μνήμης σχήματος του πορώδους Ti49Ni51 επιτυγχάνεται μέσω συμβατικής πυροσυσσωμάτωσης [12],

Εκτός από το κράμα μνήμης σχήματος NiTi, και άλλα υλικά όπως Fe-Mn-Si-Cr-Ni και Cu-Al-Ni μορφοποιούνται με τη συμβατική πυροσυσσωμάτωση [6, 7]. Η συμβατική πυροσυσσωμάτωση του Cu-Al-Ni έχει μελετηθεί από πολύ νωρίς και αναφέρεται επιτυχής μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Αναφέρεται ότι μπορούν να ληφθούν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιώντας κονιομεταλλουργία σε σύγκριση με τη συμβατική διαδικασία χύτευσης. Ωστόσο, δεν αναφέρονται σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες της μνήμης σχήματος [6]. Η κατεργασία του κράματος μνήμης σχήματος Fe με συμβατική πυροσυσσωμάτωση επηρεάζει σημαντικά την ψευδοελαστικότητα, την ολκιμότητα και τις μικροδομές με την εφαρμογή διαφορετικών τιμών τάσης [7]. Η θερμικά επαγόμενη αναστροφή της τάσης που επάγεται από την μαρτενσιτική δομή αναφέρεται στην περίπτωση κράματος μνήμης σχήματος Fe-Mn-Si-Cr-Ni που υποβλήθηκε σε κατεργασία με τη συμβατική μέθοδο πυροσυσσωμάτωσης [7].

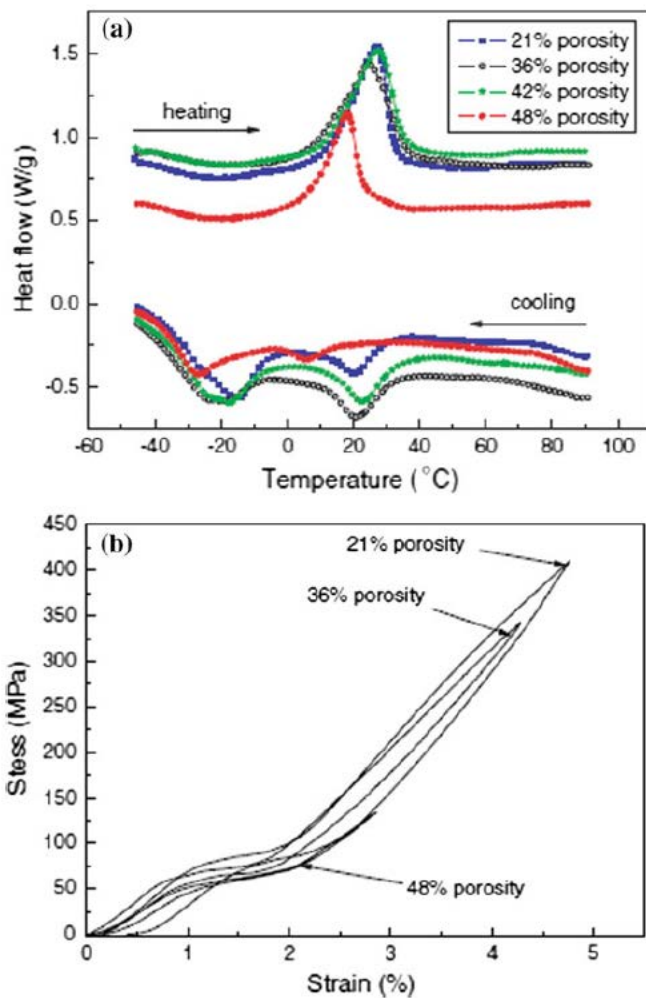
4.2.2 Θερμή ισοστατική συμπίεση

Η θερμή ισοστατική συμπίεση (HIP: Hot isostatic pressing) είναι επίσης γνωστή ως πυροσυσσωμάτωση ενισχυμένη με πίεση που αυξάνει την πυκνότητα και μειώνει το πορώδες του υλικού, το οποίο αποτελεί το κύριο μειονέκτημα της συμβατικής διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης σε περίπτωση κράματος μνήμης σχήματος [1]. Η μεταλλική σκόνη υποβάλλεται σε αυξημένη θερμοκρασία και ομοιόμορφη πίεση μέσω αερίου σε δοχείο υψηλής πίεσης όπως φαίνεται στο σχήμα 39. Το στοιχειακό μίγμα σκόνης ενθυλακώνεται σε δοχείο κενού που υποβάλλεται σε ταυτόχρονη ισοστατική πίεση και σε αυξημένη θερμοκρασία [1]. Αυτό οδηγεί στα κράματα μνήμης σχήματος που κατασκευάζονται με πορώδες 0%. Εκτός από τη χρήση δοχείου με κενό, το αέριο αργού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περίβλημα που περιβάλλει αντί του αεροστεγούς θαλάμου. Η HIP τεχνική αναφέρεται σε δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κράματα μνήμης σχήματος, τα NiTi και Cu-Al-Ni-Mn [14-17]. Αναφέρεται ότι ο επαγόμενος από την τάση μαρτενσιτικός μετασχηματισμός παρατηρείται σε ολόκληρο το μέσο στο ίδιο επίπεδο τάσης. Διάφορες περιοχές μαρτενσιτικών και ωστενιτικών δομών μετασχηματισμού φάσης της καμπύλης τάσης-επιμήκυνσης μπορούν να αναγνωριστούν εύκολα, λόγω της πυκνής δομής των κραμάτων με μνήμη σχήματος που έχουν κατεργαστεί με HIP [1]. Η παρουσία κατακρημνισμάτων και ο σχηματισμός IMCs δεν μπορούν να αποφευχθούν στην περίπτωση της HIP. Για παράδειγμα, υπάρχει σχηματισμός κατακρημνισμάτων NiTi₂ και Ni₃Ti στην περίπτωση κράματος μνήμης σχήματος NiTi [1, 11]. Η επίδραση της μνήμης σχήματος μπορεί να επιτευχθεί με κράματα μνήμης σχήματος που έχουν υποστεί κατεργασία με HIP, με έλεγχο της υπερελαστικότητας και του πορώδους [1, 17]. Η ανάκτηση μνήμης σχήματος αναφέρθηκε 100% κάτω από 100 κύκλους για κράμα μνήμης σχήματος Cu-Al-Ni-Mn που υποβλήθηκε σε κατεργασία με θερμή συμπίεση κενού [5].

Μια παραλλαγή της HIP που διερευνάται για κράματα μνήμης σχήματος NiTi ονομάζεται HIP χωρίς περίβλημα, η οποία παράγει ομογενές πορώδες υλικό με σχεδόν σφαιρικούς πόρους [14, 18]. Αυτός ο τύπος δομής οδηγεί σε αποδεκτή ψευδοελαστικότητα, καθώς δεν παρατηρείται συγκέντρωση τάσης σε σχεδόν σφαιρικούς πόρους. Αυτό έχει επίσης αποδείξει ότι ο έλεγχος του πορώδους του κράματος μνήμης σχήματος επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος [14, 18]. Ένα παράδειγμα κατεργασμένου NiTi με HIP χωρίς περίβλημα και έχει διαφορετικό πορώδες για το φαινόμενο μνήμης σχήματος φαίνεται στο σχήμα 40.



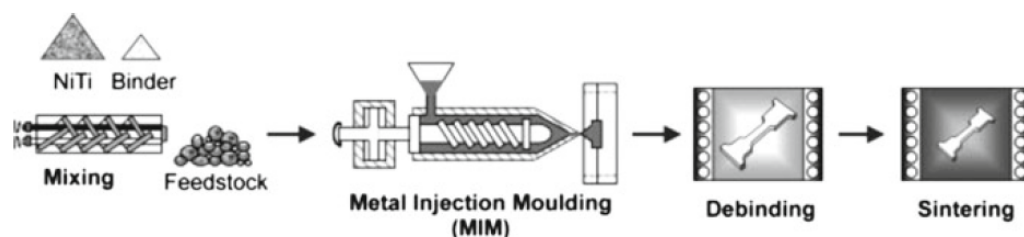
Εικόνα 35. Θερμή Ισοστατική Συμπύεση



Εικόνα 36. Επίδραση μνήμης σχήματος σε κατεργασμένο NiTi με HIP χωρίς περίβλημα (α) καμπύλη διαφορικής θερμιδομετρίας και (β) καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης [14]

4.2.3 Χύτευση με έγχυση μετάλλου

Η χύτευση με έγχυση μετάλλου είναι μια τεχνική κονιομεταλλουργίας που λειτουργεί με την έννοια της μορφοποίησης με έγχυση πλαστικού. Η χύτευση με έγχυση μετάλλου οδηγεί σε πλεονεκτήματα όπως: η γεωμετρική ακρίβεια των τεμαχίων, η υψηλή παραγωγικότητα και το χαμηλό κόστος [1]. Η χύτευση έγχυσης μετάλλου με κράματα μνήμης σχήματος NiTi αναφέρεται στα [10, 19, 20]. Η διαδικασία λειτουργεί με τέσσερα στάδια παραγωγής: (I) κατασκευή πρώτης ύλης, (II) χύτευση με έγχυση, (III) καθαρισμό και (4) πυροσυσσώματωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 41.



Εικόνα 41. Διαδικασία χύτευσης με έγχυση υλικού

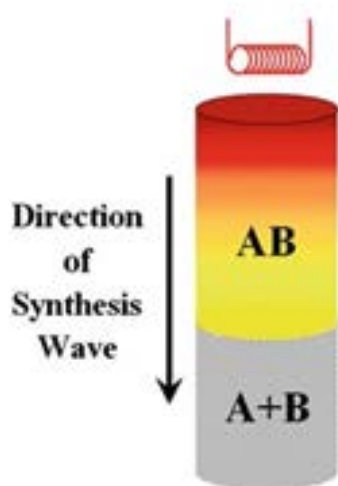
Η στοιχειακή σκόνη αναμιγνύεται με ένα συνδεδετικό υλικό στο πρώτο στάδιο της κατασκευής πρώτης ύλης. Στο επόμενο βήμα, οδηγείται στο καλούπι με ειδικά κατάλληλη θερμοκρασία και πίεση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η απομάκρυνση του συνδεδετικού μέσου, που πραγματοποιείται σε χημικό λουτρό με αυξημένη θερμοκρασία υπό κενό. Στο τέλος, η πυροσυσσώματωση διεξάγεται σε υψηλή θερμοκρασία για να ικανοποιηθεί η απαίτηση πυκνότητας του υλικού [1]. Η χύτευση με έγχυση μετάλλων υιοθετείται για την κατασκευή υλικών NiTi ειδικά για βιοϊατρικές εφαρμογές [10, 19, 20]. Ένα φαινόμενο ψευδοελαστικότητας αναφέρεται για το κράμα μνήμης σχήματος NiTi. Αναφέρεται επίσης ότι δεν παρατηρείται απώλεια δομικής ακεραιότητας μετά από 1.2×10^6 κύκλους φόρτισης / εκφόρτισης σε αέριο ή αλατούχο διάλυμα για NiTi κατασκευασμένο με χύτευση με έγχυση μετάλλου. Διαφορετική κυκλική συμπεριφορά της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης αναφέρεται για διαφορετικές θερμοκρασίες [19, 20].

4.2.4 Αυτόματη σύνθεση υψηλών θερμοκρασιών

Η αυτοματη σύνθεση υψηλών θερμοκρασιών (SHS: Self-propagating high-temperature synthesis) είναι ένας τύπος κονιομεταλλουργίας, στον οποίο το δείγμα υποβάλλεται σε «θερμική έκρηξη» από ένα από τα άκρα του [1]. Αυτή η θερμική έκρηξη διαδίδεται σε ένα δείγμα με αυτοσυντηρούμενο τρόπο όπως φαίνεται στο σχήμα 42.

Το κράμα μνήμης σχήματος NiTi κατασκευάζεται από τη διαδικασία SHS [1, 21, 22]. Η εξώθερμη αντίδραση μεταξύ Ni και Ti προκαλείται από θερμική έκρηξη και κατά συνέπεια οδηγεί στην κατασκευή των κραμάτων NiTi. Σημειώνεται ότι ο σχηματισμός των IMCs είναι δύσκολο να ελεγχθεί σε περίπτωση κράματος μνήμης σχήματος που κατεργάζεται με SHS

[21, 22]. Ο σχηματισμός πορώδους είναι επίσης ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές σε περίπτωση κατεργασίας NiTi με SHS. Ωστόσο, οι παράμετροι της διεργασίας σύνθεσης της μεταβολής του μοριακού όγκου, των θερμικών βαθμίδων του μετώπου καύσης και της εξέλιξης του αερίου ελέγχουν τον σχηματισμό πορώδους. Αναφέρεται επίσης ότι ο χειρισμός της θερμοκρασίας αντίδρασης μαζί με την προσθήκη αραιωτικών μπορεί να ελέγξει το μέγεθος πόρου στη διαδικασία SHS των κραμάτων μνήμης σχήματος [1, 21, 22]. Η περίπτωση κατεργασίας NiTi με SHS οδηγεί στο σχηματισμό διαφορετικών φάσεων όπως Ti_2Ni , Ni_3Ti και Ni_4Ti_3 που συνήθως αναφέρονται στη μήτρα του προϊόντος, η οποία στη συνέχεια προκαλεί τα αντίστοιχα φαινόμενα ευθραυστότητας [1, 21, 22]. Ένα παράδειγμα πορώδους NiTi που επεξεργάστηκε με SHS και ταυτοποίησε IMCs στις μικροδομικές εξετάσεις παρουσιάζεται στην εικόνα 43 από το άρθρο [22].

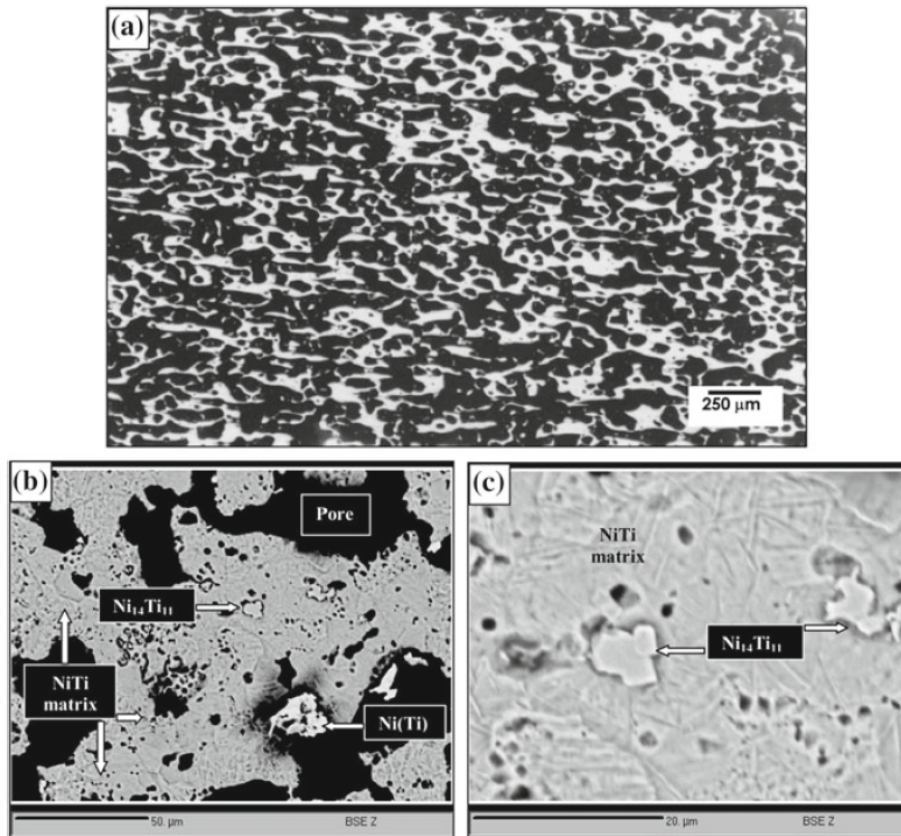


Εικόνα 42. Διαδικασία αυτοδιαδιδόμενης σύνθεσης υψηλής θερμοκρασίας

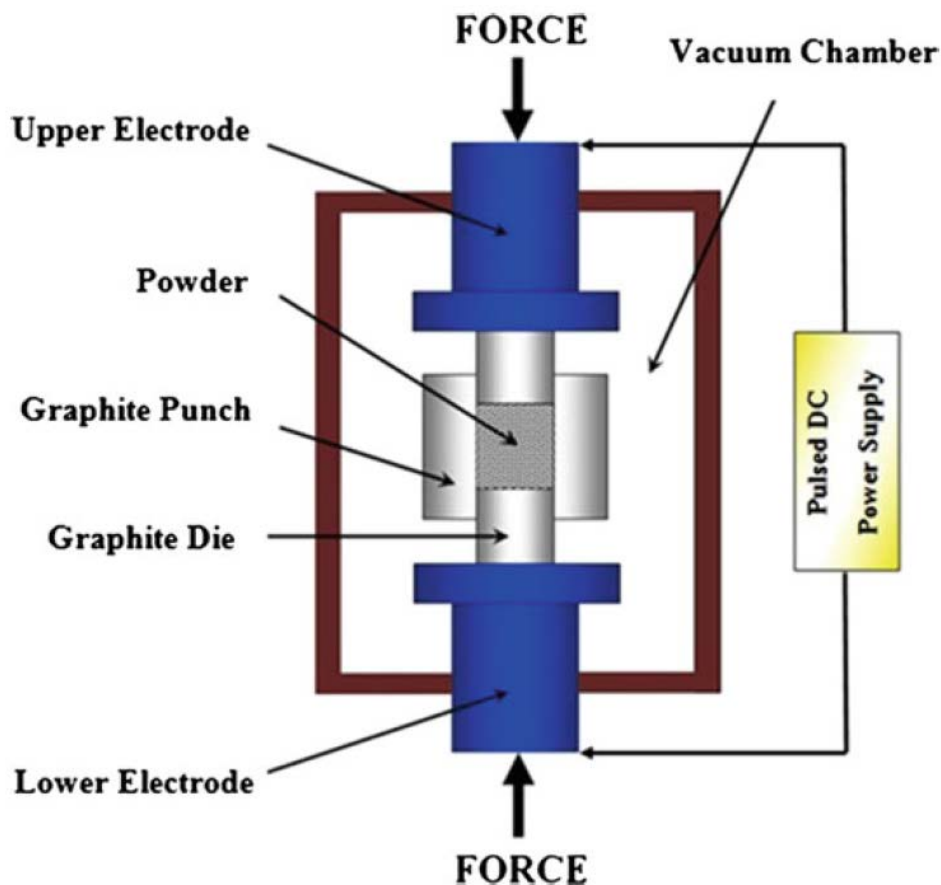
4.2.5 Πυροσυσσωμάτωση με σπινθήρες πλάσματος

Η πυροσυσσωμάτωση με σπινθήρες πλάσματος (SPS) είναι μια διαδικασία κονιομεταλλουργίας γνωστή και ως παλμική πυροσυσσωμάτωση ηλεκτρικού ρεύματος (PECS: pulsed-electric current sintering) που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία πορωδών κραμάτων με μνήμη σχήματος [1]. Στη διαδικασία SPS, οι προκραματοποιημένες (pre-alloyed) σκόνες υποβάλλονται σε συμπίεση σε μήτρα γραφίτη. Μετά από αυτό, βηματικό ρεύμα τροφοδοτείται στο συμπίεσμα, ενώ παλμικό ρεύμα παρέχει μεγάλη ενέργεια για την πρόσκρουση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή με σχηματισμό αρμών μεταξύ των σωματιδίων σκόνης σε σχετικά χαμηλή πίεση και σύντομο χρόνο κατεργασίας σε σύγκριση με άλλες κατεργασίες πυροσυσσωμάτωσης. Σχηματική παράσταση της διαδικασίας SPS φαίνεται στο σχήμα 44 [1]. Τα κράματα μνήμης σχήματος NiTi, Ni-Mn-Ga, Ni-Co-Mn-Si, Cu-Al-Ni και Cu-Al-Mn υποβάλλονται σε κατεργασία με τεχνική SPS [1, 23-27]. Αναφέρεται ότι η διαδικασία αποσύνθεσης σε κράμα μνήμης σχήματος Cu-Al-Ni δεν μπορεί

να αποφευχθεί με την κατεργασία SPS ακόμη και με την εφαρμογή της με σύντομο χρόνο κατεργασίας. Αναφέρεται επίσης ότι ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός παρατηρείται στην πλειονότητα των συμπίεσμάτων κατά τη διάρκεια της ψύξης σε συσκευή σπινθήρων πλάσματος με την παρατηρούμενη φάση του Cu_9Al_4 [25]. Η ικανότητα μνήμης σχήματος αναφέρεται για τα προαναφερθέντα κράματα που κατασκευάζονται μέσω SPS [1, 23-27].



Εικόνα 37. Μικροδομές του NiTi που κατασκευάζονται με αυτο-διαδιόμενη σύνθεση υψηλής θερμοκρασίας που παρουσιάζουν α) μια πορώδη μικροδομή, β) σχηματισμό IMCs, γ) IMCs σε μήτρα NiTi [22]



Εικόνα 44. Πυρρυσσομάτωση με σπινθήρες πλάσματος

4.3 Προσθετικές Κατεργασίες

Η προσθετική κατεργασία είναι μια προηγμένη μέθοδος επεξεργασίας του υλικού με την προσθήκη διαδοχικών στρωμάτων του υλικού για την παρασκευή ενός τελικού τμήματος / προϊόντος. Η προσθήκη του μεταλλικού στρώματος γίνεται με τη βοήθεια μεταλλικής σκόνης που κατεργάζεται με τη βοήθεια καλώς ελεγχόμενης τεχνικής επεξεργασίας [1]. Είναι επίσης δημοφιλής ως ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων ή ταχείας κατασκευής. Η προσθετική κατεργασία είναι σε θέση να παράγει πολύπλοκα μέρη και γεωμετρίες χωρίς καμία απομάκρυνση υλικού. Πρόκειται για μια προσέγγιση αειφόρου κατασκευής, η οποία οφείλεται στα πλεονεκτήματα της οικονομικής αποδοτικής κατεργασίας, της εξοικονόμησης υλικών, της εξαιρετικής ενεργειακής απόδοσης και της φιλικής προς το περιβάλλον κατεργασίας [1]. Διάφορες τεχνικές προσθετικής κατεργασίας προσθέτων όπως: η επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ, η επιλεκτική τήξη με λέιζερ, η μηχανική διαμόρφωση με λέιζερ και η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων αναφέρονται για κράματα μνήμης σχήματος και συζητούνται παρακάτω στις υποενότητες. Αυτές οι διαδικασίες έχουν διαφορετικές παραμέτρους λαμβάνοντας υπόψη διάφορες κατηγορίες, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα. 3 που διέπουν τις ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος.

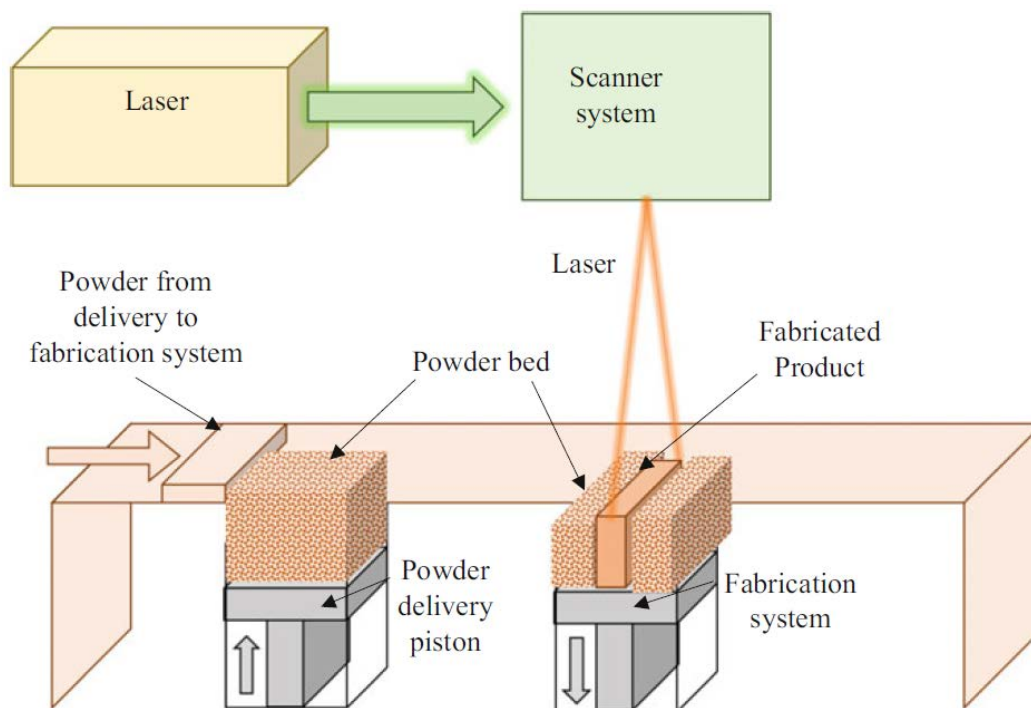
4.3.1 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και επιλεκτική τήξη με λέιζερ

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS: Selective laser sintering) είναι ένας τύπος τεχνικών προσθετικής κατασκευής, ο οποίος χρησιμοποιεί λέιζερ υψηλής ισχύος, ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή, για τη σύντηξη μικρών κονιοποιημένων υλικών που είναι διατεταγμένα για να αποκτήσουν άμεσο τρισδιάστατο (3D) σχήμα όπως φαίνεται στο σχήμα 45. Η προθέρμανση εφαρμόζεται στις μεταλλικές σκόρες στις περισσότερες περιπτώσεις για να ελαχιστοποιηθούν οι υψηλές απαιτήσεις ισχύος του λέιζερ και επίσης να αποφευχθεί η στρέβλωση και η συρρίκνωση.

Πίνακας 3

Sl. No.	Category	Parameters
1	Beam related parameters (Laser/Electron beam)	Beam power, Spot size, Pulse duration, Pulse frequency, Wavelength, Bandwidth
2	Scanning parameters	Scan speed, Spacing, and Scan pattern
3	Powder-related parameters	Particle shape, Particle size, Powder density, Powder distribution, Powder layer thickness
4	Temperature-related parameters	Powder bed temperature, Powder feeder temperature, Temperature uniformity

Η τεχνική σάρωσης με λέιζερ προσπίπτει σε πάχος στρώσης σκόνης 0,1 και χρησιμοποιεί κλειστό θάλαμο γεμάτο με αέριο άζωτο, έτσι ώστε να μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η οξείδωση. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται νέα στρώση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Τα κράματα μνήμης σχήματος όπως NiTi, Cu-Al-Ni-Mn, Cu-Al-Ni-Mn-Zr, Fe-Mn-Al-Ni και Al-Fe-V-Si αναφέρονται ως κατασκευασμένα με SLM σε διάφορες βιβλιογραφίες [26-36]. Η SLM είναι μια επιτυχημένη διαδικασία κατασκευής για την απόκτηση πορωδών κραμάτων μνήμης σχήματος με καλύτερες ιδιότητες μνήμης σχήματος, η οποία λειτουργεί με παρόμοια αρχή λειτουργίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 46 για την τεχνική SLS. Η κύρια διαφορά στη διαδικασία SLS και SLM είναι η χρήση λέιζερ διαφορετικού τύπου, όπως το CO₂ που αναφέρεται στον SLS και ο τύπος Nd: YAG που αναφέρεται στη SLM. Παρατηρείται ότι η εφαρμογή λέιζερ με καλύτερα μήκη κύματος οδηγεί στην καλή απορροφητικότητα μεταλλικών κόνεων που αναφέρεται ως ανώτερο χαρακτηριστικό της τεχνικής SLM [1].



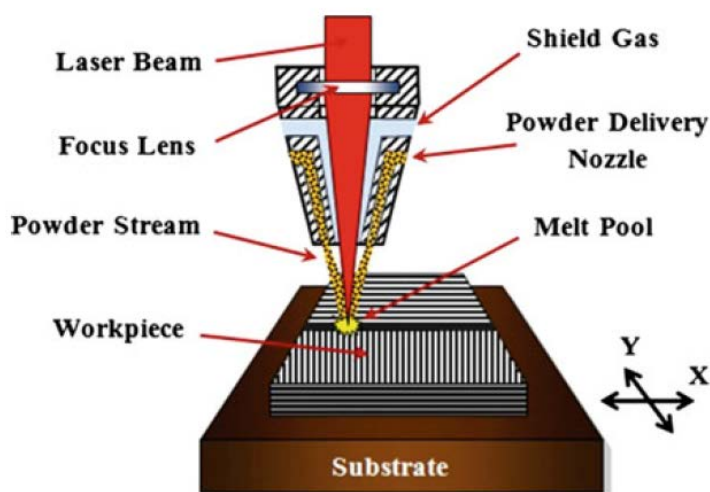
Εικόνα 45. Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και επιλεκτική τήξη με λέιζερ

Η SLM με λέιζερ ινών είναι φθηνότερη από πλευράς συντήρησης και ρύθμισης, καλύτερης ενεργειακής απόδοσης, είναι πιο συμπαγής, και έχει καλύτερη ποιότητα δέσμης. Το SLM έχει το πλεονέκτημα του σχήματος σάρωσης φακών f-theta που ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση κατά τη διαδικασία σάρωσης [1].

Η κατασκευή του υλικού NiTi από την τεχνική SLS οδηγεί στο σχηματισμό φάσεων όπως Ti_3Ni , Ti_2Ni και NiTi με συνθέσεις που κυμαίνονται από 60 έως 80% κατά μάζα [1]. Αναφέρεται επίσης ότι οι τεχνικές SLS και SHS συνδυάζονται για τη σύνθεση του υλικού NiTi, γεγονός που οδηγεί στην ομοιογένεια του πορώδους, της χημικής σύνθεσης, της βιοσυμβατότητας και του επιτυχημένου μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (στην περιοχή των $50-0^{\circ}C$) [1, 36]. Εκτός από το υλικό μνήμης σχήματος NiTi, η SLS είναι ικανή να κατασκευάζει διάφορα κράματα μνήμης σχήματος. Ο σχηματισμός πορώδους, ιζήματος, IMCs, η πυκνότητα, η θερμοκρασία μετασχηματισμού και ιδιοτήτων μνήμης σχήματος μπορεί να ρυθμιστούν από παραμέτρους του SLS όπως: το μέγεθος σκόνης, η προθέρμανση, η ισχύς λέιζερ, η διάμετρος δέσμης, το μήκος κύματος, η ταχύτητα σάρωσης και η απόσταση οπής (hatch distance) [1, 26-36]. Αναφέρεται ότι το κράμα μνήμης σχήματος NiTi κατασκευασμένο με SLM έχει ευρύτερη περιοχή θερμοκρασιών για τον μετασχηματισμό φάσης σε σχέση με το συμβατικά κατεργασμένο NiTi [1].

Μια καλή ψευδοελαστικότητα μπορεί να παραχθεί με αναστρέψιμο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και χονδρόκοκκη μικροδομή (που έχει επιταξιακή ανάπτυξη κόκκων και ανισότροπη μικροδομή), όταν το κράμα μνήμης σχήματος με βάση το Fe είναι κατασκευασμένο με τη μέθοδο SLM [32]. Ομοίως, οι ιδιότητες της μνήμης σχήματος

μπορούν να ληφθούν ικανοποιητικά από κράματα μνήμης σχήματος με βάση τον Cu που κατασκευάζονται με τη μέθοδο SLM [33-35]. Οι παράμετροι της τεχνικής της SLM καθορίζουν σημαντικά το πορώδες, το μετασχηματισμό φάσεων, τη θερμική σταθερότητα και τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος [35]. Ο σχηματισμός οξειδίων μπορεί να αποφευχθεί σε περίπτωση κατασκευής κράματος μνήμης σχήματος με τεχνική SLM [33].



Εικόνα 46. Διαμόρφωση ακριβείας με λέιζερ

Τα κράματα μνήμης σχήματος όπως NiTi, Cu-Al-Ni-Mn, Cu-Al-Ni-Mn-Zr, Fe-Mn-Al-Ni και Al-Fe-V- έχουν σημαντικές εφαρμογές στον τομέα των αισθητήρων μικροηλεκτρομηχανικών μηχανισμών (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems), της μηχανικής ιστών και του ιατρικού και χειρουργικού εξοπλισμού και των εμφυτευμάτων [1, 26-36].

4.3.2 Διαμόρφωση ακριβείας με λέιζερ

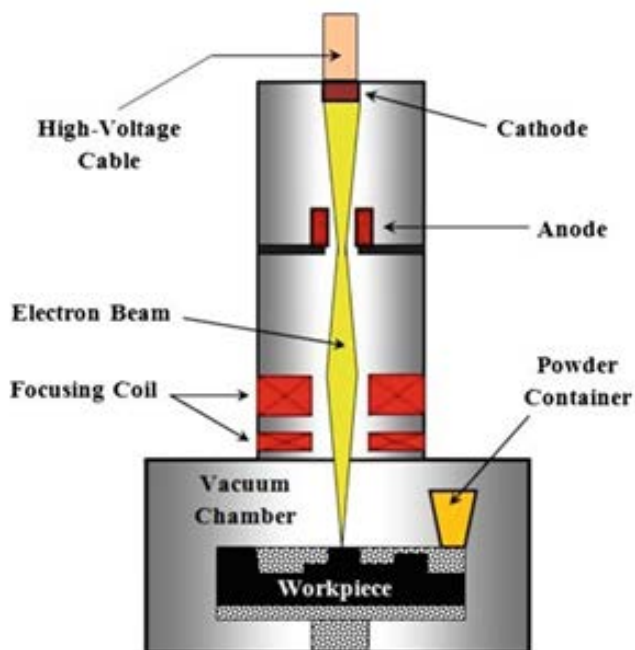
Η διαμόρφωση ακριβείας με λέιζερ (LENS: Laser engineered net-shaping) είναι ένας τύπος προσθετικής κατασκευής, στον οποίο η μεταλλική σκόνη εγχέεται στη λιωμένη δεξαμενή όπως φαίνεται στο σχήμα 46 [1]. Η κεφαλή λέιζερ ή η πλάκα υποστρώματος μετακινούνται μέσω λογισμικού 3D σχεδιασμού με υπολογιστή, το οποίο βοηθά στην εναπόθεση του υλικού ακολουθώντας σύνθετο περίγραμμα. Η προσθήκη υλικού ανά στρώση γίνεται με τη βοήθεια της κάθετης κίνησης της κεφαλής. Οι μεταλλικές σκόνες εγχέονται και κατανέμονται γύρω από την περιφέρεια της κεφαλής με τη βοήθεια πεπιεσμένου αερίου ή φυσικά με τη βαρύτητα. Η προστασία εξασφαλίζεται συνήθως με τη βοήθεια παροχής αδρανούς αερίου για πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της αντίδρασης με το οξυγόνο [1].

Το LENS εφαρμόζεται επιτυχώς και για την κατασκευή κράματος μνήμης σχήματος [1]. Το LENS μπορεί να κατασκευάσει τα προϊόντα με πλήρη πυκνότητα και ισχυρό δεσμό και

επομένως το πορώδες στο προϊόν των κραμάτων μνήμης σχήματος δημιουργείται με μερική τήξη μεταλλικής σκόνης. Το LENS εφαρμόζεται επιτυχώς για να επιτευχθεί πλήρως πυκνό και χημικά ομοιογενές ισομοριακό κράμα NiTi, ενώ ανεπιθύμητες φάσεις δεν αναφέρονται [29]. Αποδεικνύεται ότι ο σχηματισμός των IMCs όπως NiTi₂, Ni₄Ti₃ και Ni₃Ti αναφέρονται γενικά στην κατασκευή κράματος μνήμης σχήματος. Παρόλα αυτά, η διαδικασία LENS αποτρέπει τη δημιουργία αυτών των IMCs [37]. Αναφέρεται ότι οι θερμοκρασίες μετασχηματισμού αυξάνονται στην περίπτωση κατεργασμένου υλικού μνήμης σχήματος NiTi με LENS, λόγω της ταχείας στερεοποίησης κατά την κατεργασία αυτή. Ωστόσο, μπορεί το θέμα αυτό να διορθωθεί με τη βοήθεια διαδικασιών θερμικής επεξεργασίας μετά την κατασκευή [29]. Το υλικό NiTi που κατασκευάζεται με τη LENS έχει πολλές εφαρμογές σε εμφυτεύματα και μηχανική ιστών, καθώς επίσης και είναι εύκολο να κατασκευαστούν σύνθετα εξαρτήματα με αυτή. Εντούτοις, σημειώνεται ότι πρέπει να εκτελούνται διεργασίες φινιρίσματος μετά την κατασκευή του υλικού από το LENS, καθώς η τραχύτητα της επιφανείας δεν είναι ικανοποιητική για τις ιατρικές εφαρμογές [1]. Πέρα από αυτά τα πλεονεκτήματα, η LENS αναφέρεται περιορισμένα στις βιβλιογραφίες για κράματα μνήμης σχήματος.

4.3.3 Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων

Η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM: Electron beam melting) είναι μια τεχνική κατασκευής προσθήκης στρώματος υλικού με τη χρήση δέσμης ηλεκτρονίων. Η διαδικασία λειτουργεί παρόμοια με την τεχνική SLM. Δεδομένου ότι εμπλέκεται η δέσμη ηλεκτρονίων, η διαδικασία απαιτεί τη λειτουργία σε θάλαμο κενού, όπως φαίνεται στο σχήμα 47 [1]. Το EBM σχεδιάστηκε από μια εταιρεία που ονομάζεται "Arcam" και το ανέπτυξε για την κατασκευή ορθοπεδικών εξαρτημάτων και εμφυτευμάτων [1]. Η κατασκευή κραμάτων τιτανίου είναι δημοφιλής με την τεχνική EBM, ενώ τα κράματα μνήμης σχήματος σχηματίζονται περιορισμένα. Έχει αναφερθεί ότι η τεχνική EBM μπορεί να κατασκευάζει κράματα μνήμης σχήματος όπως NiTi με καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με το NiTi που κατασκευάζεται με επαγωγική τήξη υπό κενό (VIM: vacuum induction melting). Το EBM παράγει καλύτερο υλικό NiTi από άποψη ομοιογενών χημικών συνθέσεων και μειώνει τις επιμολύνσεις από άνθρακα και οξυγόνο σε σύγκριση με το VIM [38, 39]. Αποδεικνύεται ότι η ομοιογένεια σε χημικές συνθέσεις οδηγεί σε μικρή μόνο μεταβολή στις θερμοκρασίες μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και σε περιεκτικότητα σε άνθρακα περίπου 0,013% κατά βάρος σε σύγκριση με τα εμπορικά προϊόντα (0,04-0,06% κατά βάρος) [40]. Η παρουσία οξυγόνου και άνθρακα επηρεάζει τις θερμοκρασίες του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Η παρουσία του άνθρακα και του οξυγόνου επηρεάζει επίσης τον σχηματισμό TiC και Ti₄Ni₂O, προαπαιτούμενα αντίστοιχα σε περίπτωση κατασκευής NiTi με τεχνική EBM [38]. Το EBM είναι μια πιθανή τεχνική για την κατασκευή διαφόρων τύπων κραμάτων μνήμης σχήματος.



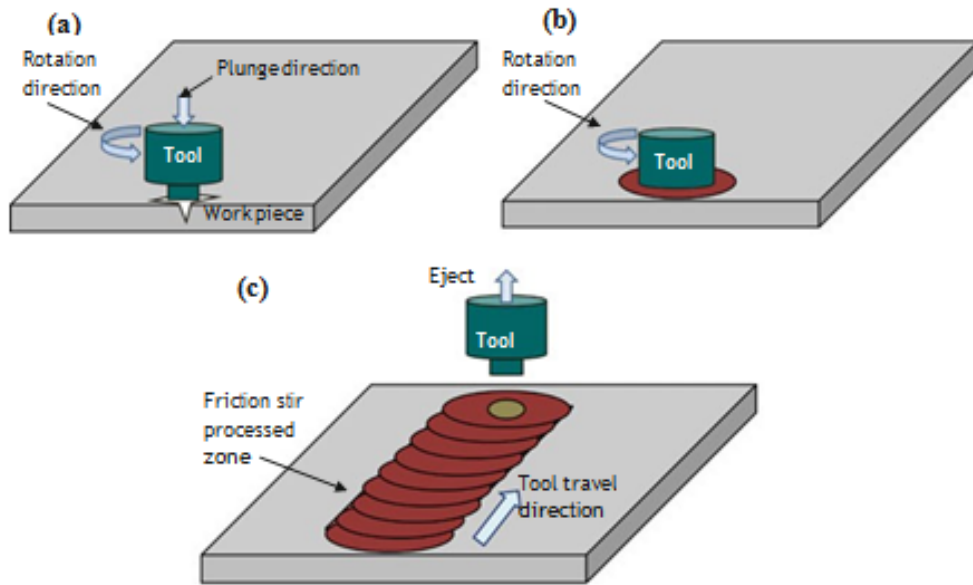
Εικόνα 38. Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων

4.4 Θερμομηχανικές κατεργασίες

Η θερμομηχανική κατεργασία αποτελεί μια κατηγορία διαδικασιών κατασκευής όπου τα υλικά υφίστανται μηχανική παραμόρφωση ή διαδικασία πλαστικής παραμόρφωσης μαζί με θερμική κατεργασία. Η κατεργασία της ανάδευσης με τριβή, η θερμή έλαση, η θερμή σφυρηλάτηση και η θερμική κατεργασία και η διέλαση με θερμότητα είναι παραδείγματα θερμομηχανικής κατεργασίας.

4.4.1 Κατεργασία τριβής με ανάδευση

Η κατεργασία τριβής με ανάδευση (FSP: Friction stir processing) είναι ένας τύπος κατεργασίας, ο οποίος λειτουργεί με την αρχή της κατεργασίας στερεάς κατάστασης. Το FSP προέρχεται από τη συγκόλληση τριβής που χρησιμοποιεί μη αναλώσιμο περιστρεφόμενο εργαλείο για να παράγει θερμότητα τριβής μέσω της δράσης τριβής μεταξύ του τεμαχίου και του εργαλείου [41-43]. Η διαδικασία FSP παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 48. Η πλαστική παραμόρφωση παράγεται λόγω της θερμότητας τριβής και της αξονικής πίεσης. Ακολούθως, το πλαστικά παραμορφωμένο υλικό αναδεύεται και αναμιγνύεται με την περιστροφή του εργαλείου και την εγκάρσια κίνηση, πράγμα που οδηγεί σε τροποποιήσεις της μικροδομής και των ιδιοτήτων [43].



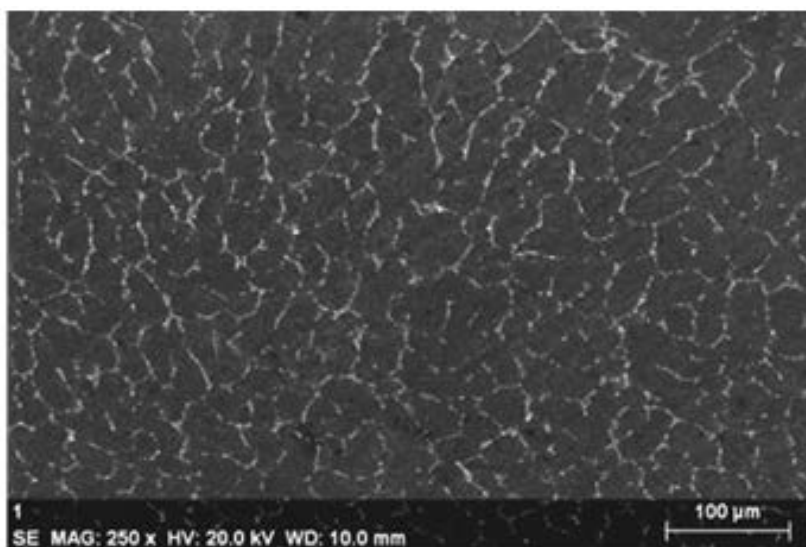
Εικόνα 39. Κατεργασία τριβής με ανάδευση (a) βύθισμα (b) σταθεροποίηση (c) κατεργασία και εξαγωγή εργαλείου

Το FSP των κραμάτων μνήμης σχήματος είναι εφικτό με ένα μη αναλώσιμο εργαλείο που έχει ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από το βασικό υλικό. Τα υλικά εργαλείων FSP, όπως το πολυκρυσταλλικό νιτρίδιο του βορίου, το καρβίδιο βολφραμίου-ρηνίου και ο χάλυβας εργαλείων, αναφέρεται ότι κατασκευάζουν διαφόρων τύπων κράματα μνήμης σχήματος [44-47]. Το FSP είναι μια τεχνική μέσω της οποίας παράγεται η επιθυμητή κατεργασμένη περιοχή σε συγκεκριμένες περιοχές και βάθη λαμβάνοντας υπόψη το σχεδιασμό εργαλείων FSP. Οι μηχανικές ιδιότητες, οι μικροδομές και οι ιδιότητες της μνήμης σχήματος είναι προσαρμοσμένες προς τις παραμέτρους FSP, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα πρόωσης, το αξονικό φορτίο, ο αριθμός των περασμάτων, ο σχεδιασμός και η γεωμετρία του εργαλείου και οι συνθήκες κατεργασίας [44-47]. Παρατηρείται ότι η ικανότητα μνήμης σχήματος και η ολκιμότητα της περιοχής του υλικού NiTi που έχει κατεργαστεί με FSP μειώνονται, όπως αναφέρεται από τους Barcellona et al. [44]. Αντίθετα, το NiTi που υποβλήθηκε σε κατεργασία FSP οδηγεί στην αύξηση της αντοχής λόγω της βελτίωσης των κόκκων, ενώ δεν παρατηρείται η μείωση της ολκιμότητας που αναφέρεται από τους London et al. [45]. Επίσης, ανέφεραν ότι οι ιδιότητες μνήμης σχήματος, συμπεριλαμβανομένης της υπερελαστικότητας, παρέμειναν ως είχαν.

Είναι αποδεδειγμένο ότι το FSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σύνθετου μεταλλικού πλέγματος από κράματα μνήμης σχήματος. Κατασκευάζεται σύνθετο αλουμίνιο-NiTi και παρατηρείται ότι είναι δυνατή η ομοιογενής κατανομή της σκόνης NiTi σε μήτρα με καλή συγκόλληση ελέγχοντας τις παραμέτρους της διεργασίας FSP, [46, 47].

4.4.2 Θερμή σφυρηλάτηση

Η θερμή σφυρηλάτηση είναι ένας τύπος θερμομηχανικής διαδικασίας κατασκευής, που χρησιμοποιεί τη θερμότητα και τη σφυρηλασία για να παραμορφώσει το υλικό, το οποίο με τη σειρά του αποκτά το επιθυμητό σχήμα. Η δύναμη σφυρηλατήσεως εφαρμόζεται μονοαξονικά με τη βοήθεια σφυρόπρεσας. Η σφυρηλασία εφαρμόζεται συνήθως για την κατασκευή πλινθωμάτων από κράματα μνήμης σχήματος [3].



Εικόνα 40. Μικροδομή του υλικού NiTi κατασκευασμένου με θερμή σφυρηλάτηση

Η θερμή σφυρηλάτηση συνιστάται για τα κράματα μνήμης σχήματος, καθώς το υλικό που κατασκευάζεται με θερμή σφυρηλάτηση παρουσιάζει λεπτότερους κόκκους λόγω δυναμικής ανακρυστάλλωσης. Ο μεταβαλλόμενος προσανατολισμός της μικροδομής ελαττώνεται με τη θερμή σφυρηλασία [48]. Ο σχεδιασμός της μήτρας και η επιλογή υλικού της για θερμή σφυρηλάτηση είναι τα πιο σημαντικά κριτήρια για κράματα μνήμης σχήματος, όπου πρέπει να εξασφαλιστεί υψηλή αντοχή στη φόρτιση [3, 48]. Αναφέρεται περαιτέρω ότι η προσθήκη εξωτερικού επικαλυπτικού ξένου υλικού σε θερμή σφυρηλασία κράματος μνήμης σχήματος χρησιμεύει ως μανδύας (jacket) και οδηγεί σε βελτιώσεις των ιδιοτήτων των κραμάτων μνήμης σχήματος με ελάχιστη ανάγκη της διαδικασίας αφαίρεσης του εν λόγω μανδύα και θερμικής επεξεργασίας. Οι ακολουθούσες διαδικασίες φινιρίσματος, όπως η μηχανική κατεργασία, αποφεύγονται, καθώς το τελικό προϊόν έχει καλύτερες διαστάσεις και φινίρισμα επιφάνειας λόγω του καλύμματος του μανδύα [3]. Το κράμα μνήμης σχήματος Ni-Mn-Ga έχει μελετηθεί σε θερμή σφυρηλάτηση. Παρουσιάζεται ότι οι ευνοϊκές παράμετροι θερμής σφυρηλάτησης μπορούν οδηγήσουν σε ένα σύνθετο τμήμα κράματος μνήμης σχήματος με εξαιρετικά αποτελέσματα μνήμης σχήματος και χωρίς σημαντικά ελαττώματα [48, 49]. Η βέλτιστη συνθήκη σχηματισμού που λαμβάνεται μετά από θερμή σφυρηλάτηση του κράματος μνήμης NiTi παρουσιάζεται μέσω της μικροδομικής αξιολόγησης στην Εικ. 49.

4.4.3 Θερμή έλαση

Η θερμή έλαση είναι μια τεχνική κατεργασίας στην οποία το υλικό θερμαίνεται και αναγκάζεται να πιεστεί μεταξύ δύο αντίρροπα στρεφόμενων κυλίνδρων (ράουλα). Στη συνέχεια, το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση που οδηγεί στην αλλαγή των διαστάσεων, όπως μείωση του πάχους και αύξηση του μήκους και του πλάτους [3]. Η θερμή έλαση κραμάτων μνήμης σχήματος απαιτεί σημαντικές ρυθμίσεις στις παραμέτρους κατεργασίας όπως είναι η θερμοκρασία κατεργασίας, η δύναμη εφελκυσμού που εφαρμόζεται στο υλικό στην έξοδο από τα ράουλα, ο τύπος λιπαντικού στη διεπιφάνεια και ο αριθμός των περασμάτων για τον έλεγχο, καθώς αυτές ρυθμίζουν την ικανότητα της μνήμης σχήματος και άλλες μηχανικές ιδιότητες [3]. Είναι πολύ σημαντικό να ρυθμιστεί η θερμοκρασία κατεργασίας. Εάν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη από ένα ορισμένο επίπεδο, το υλικό μνήμης σχήματος υφίσταται δυναμική ανακρυστάλλωση ή πλήρη αποκατάσταση της επιμήκυνσης. Περαιτέρω, η δυναμική ανακρυστάλλωση και η ανάκτηση της επιμηκύνσεως παραμένουν ατελείς λόγω του ρυθμού γρήγορης ψύξης, δεδομένου ότι αρχικά το υλικό θερμαίνεται. Τα ζητήματα της σκλήρυνσης κατά την κατεργασία και της τελικής σκληρότητας εμφανίζονται λόγω ακατάλληλης ρύθμισης παραμέτρων κατεργασίας για τα κράματα μνήμης σχήματος. Η διαδικασία ανόπτησης συνιστάται για κράματα μνήμης σε θερμή έλαση μορφής για να εξαφανιστούν οι εναπομένουσες τάσεις [3, 50].

Η συμπίεση εν θερμώ είναι ένας άλλος τύπος θερμομηχανικής κατεργασίας για το NiTi [51]. Έχει αναφερθεί ότι μεγαλύτεροι κόκκοι λαμβάνονται με αύξηση των θερμοκρασιών παραμόρφωσης ή τη μείωση των ποσοστών επιμήκυνσης. Η δυναμική ανακρυστάλλωση του NiTi επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό παραμόρφωσης, ο οποίος επηρεάζεται με τη σειρά του από τον ρυθμό επιμήκυνσης. Πρέπει να προσδιοριστεί ένας κρίσιμος βαθμός παραμόρφωσης, καθώς μεγαλύτερη παραμόρφωση - πέρα από τα όρια αυτά - οδηγεί σε λεπτότερους κόκκους, [51].

4.5 Μηχανική κατεργασία

Η μηχανική κατεργασία είναι μια κατηγορία στην οποία η επεξεργασία γίνεται με μηχανική φόρτιση, η οποία προκαλεί παραμόρφωση του υλικού και οδηγεί στην αλλαγή ιδιοτήτων. Η μηχανική κατεργασία, όπως η γωνιακή εξώθηση ίσων καναλιών, η σφυρηλασία με ψύξη και ο σχεδιασμός ψύξης για κράματα μνήμης σχήματος, συζητούνται παρακάτω.

4.5.1 Γωνιακή εξώθηση ίσων καναλιών

Η γωνιακή εξώθηση ίσων καναλιών (ECAE, Equal channel angular extrusion) είναι μια διαδικασία στην οποία πλαστική φόρτιση προκαλείται από υψηλή αξονική πίεση όπως φαίνεται στο σχήμα 49. Η ECAE είναι μια πιο αποτελεσματική κατεργασία όσον αφορά την ομοιόμορφη μικροδομή, τον έλεγχο της μορφολογίας και της υφής των υλικών και την εύκολη επεξεργασία σε σχέση με τις άλλες κατεργασίες. Η ECAE αποτελεί πρόκληση για τα κράματα μνήμης σχήματος, καθώς διαθέτει μεγάλη αντοχή ροής στον ωστενίτη μαζί με

περιορισμένη ολκιμότητα. Στην περίπτωση ECAE κραμάτων μνήμης σχήματος, ο σχεδιασμός του εργαλείου πίεσης απαιτείται να είναι αιχμηρό για να διαχειρίζεται υψηλά φορτία τα οποία που μπορεί να εισαγάγουν περιορισμούς στην τριβή. Η συμπεριφορά μετασχηματισμού και οι μικροδομικές μεταβολές του υλικού NiTi επηρεάζονται σημαντικά από τη διαδικασία του ECAE [52].

4.5.2 Ψυχρή σφυρηλάτηση

Η ψυχρή σφυρηλάτηση είναι μια κατεργασία κατά την οποία το υλικό δεν θερμαίνεται και παραμορφώνεται μηχανικά με τη βοήθεια επαρκούς φορτίου σφυρηλασίας. Ο ρυθμός καταπόνησης είναι πολύ υψηλός και με τη σειρά του προκαλεί ασταθή παραμόρφωση. Συνεπώς, η επεξεργασία των κραμάτων μνήμης σχήματος με ψυχρή κατεργασία προκαλεί χαμηλότερη ποιότητα όσον αφορά τον σχηματισμό ελαττωμάτων και την τελική επιφάνεια [3]. Έχει αναφερθεί ότι η ανόπτηση μεταξύ των διαφόρων πάσσων συνιστάται συχνά για την αποκατάσταση της ποιότητας του ψυχρού σφυρηλάτου κράματος μνήμης σχήματος [53]. Εντούτοις, η συχνή ανόπτηση σε ψυχρή σφυρηλάτηση με χαμηλή παραμόρφωση μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή σκλήρυνση του υλικού, η οποία αυξάνει στη συνέχεια την πιθανότητα σχηματισμού ελαττωμάτων. Περαιτέρω, προτείνεται ότι η ψυχρή σφυρηλασία κράματος μνήμης σχήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με στρώμα μικρού οξειδίου που απορροφά το εφαρμοζόμενο φορτίο και προστατεύει από κάτω από το υλικό [3].

4.5.3 Ψυχρή έλαση και ψυχρή ολκή

Η ψυχρή έλαση είναι μια κατεργασία στην οποία το υλικό υποβάλλεται σε ροή στο άνοιγμα μεταξύ δύο αντίρροπα στρεφομένων κυλίνδρων που επιβέλλουν θλιπτικές δυνάμεις στο υλικό. Τα κράματα μνήμης μορφής κατεργάζονται με διαδικασίες έλασης εν ψυχρώ και με συνακόλουθη κατεργασία ανόπτησης, για να προσαρμόσουν τη μικροδομή των λεπτών κόκκων. Μεγάλος αριθμός ερευνών είναι διαθέσιμος για την ψυχρή έλαση κραμάτων μνήμης σχήματος [54-56]. Έχει αναφερθεί ότι κράματα κράματος με ψυχρή έλαση (ειδικά NiTi υλικό) και συνακόλουθη ανόπτηση οδηγούν σε νανοδομημένη μικροδομή, η οποία παρουσιάζει εξαιρετική ικανότητα μνήμης σχήματος μαζί με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες [3]. Σε περίπτωση ψυχρής έλασης των κραμάτων μνήμης σχήματος, παράγοντες όπως η μείωση του πάχους κατά τη διάρκεια κάθε πάσου, η μαγνητική έλξη και η λίπανση αναφέρονται ως οι πλέον βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη μικροδομή και τις ιδιότητες [3, 54-56]. Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων είναι υποχρεωτική για να έχει το υλικό ικανοποιητική ικανότητα μνήμης σχήματος και επιθυμητές ιδιότητες [3]. Μερικές φορές, τα στρώματα οξειδίου διατηρούνται στα κράματα μνήμης σχήματος και δρουν ως λιπαντικό. Ωστόσο, παχύ στρώμα οξειδίου μπορεί να προκαλέσει ελαττώματα στην επιφάνεια των κραμάτων μνήμης σχήματος. Κράματα μνήμης σχήματος που κατεργάζεται με παχύ στρώμα

οξειδίου αναπτύσσουν επίσης προβλήματα στην ικανότητα της μνήμης σχήματος και στις ιδιότητες που προκύπτουν [54-56].

Η ψυχρή ολκή είναι ένας παρόμοιος τύπος κατεργασίας όπως η εξώθηση και η έλαση εν ψυχρώ, όπου η ράβδος ή το σύρμα από κράμα μνήμης σχήματος υποβάλλεται σε ολκή μέσω κωνικής μήτρας και τελικά το υλικό αποκτά επιμήκεις κόκκους και μειωμένες διαστάσεις [3]. Σε περίπτωση ψυχρής ολκής κραμάτων μνήμης σχήματος, απαιτείται ενδιάμεση ανόπτηση, καθώς η πλαστική παραμόρφωση είναι μεγάλη και συνοδεύεται από κράτνυση, όπως ακριβώς και με την ψυχρή έλαση. Για τα κράματα μνήμης σχήματος συνιστάται η χρήση λιπαντικών ή προστατευτικών στρωμάτων που ενισχύουν την τελική επεξεργασία και το φινίρισμα[57].

4.6 Σύνοψη

Διάφορες τεχνικές κατεργασίας, συμπεριλαμβανομένης της κονιομεταλλουργίας, της προσθετικής κατεργασίας, της μηχανικής και της θερμομηχανικής κατεργασίας για διάφορα κράματα μνήμης σχήματος εξετάζονται και συζητούνται ως προς τις βασικές αρχές της κατεργασίας, τις συνθήκες κατεργασίας, τους παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της κατεργασίας, τις μικροδομές, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές του υλικού. Οι βέλτιστες παράμετροι κατεργασίας και η μετεπεξεργασία συνιστώνται στην πλειοψηφία των τεχνικών αυτών, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις για τις ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος. Το κράμα μνήμης σχήματος NiTi είναι το πιο μελετημένο υλικό και με ευρύ φάσμα εφαρμογών. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για περαιτέρω ανάπτυξη του πεδίου.

References

1. M.H. Elahinia, M. Hashemi, M. Tabesh, S.B. Bhaduri, Manufacturing and processing of NiTi implants: a review. *Prog. Mater. Sci.* **57**(5), 911–946 (2012)
2. M. Elahinia, N.S. Moghaddam, M.T. Andani, A. Amerinatanzi, B.A. Bimber, R.F. Hamilton, Fabrication of NiTi through additive manufacturing: a review. *Prog. Mater. Sci.* **83**, 630–663 (2016)
3. A.P. Markopoulos, I.S. Pressas, D.E. Manolakos, Manufacturing processes of shape memory alloys, in *Materials Forming and Machining: Research and Development* (2015), p. 155
4. S.M. Tang, C.Y. Chung, W.G. Liu, Preparation of CuAlNi-based shape memory alloys by mechanical alloying and powder metallurgy method. *J. Mater. Process. Technol.* **63**(1–3), 307–312 (1997)
5. Z. Li, Z.Y. Pan, N. Tang, Y.B. Jiang, N. Liu, M. Fang, F. Zheng, Cu–Al–Ni–Mn shape memory alloy processed by mechanical alloying and powder metallurgy. *Mater. Sci. Eng., A* **417**(1), 225–229 (2006)
6. R.D. Jean, T.Y. Wu, S.S. Leu, The effect of powder metallurgy on Cu–Al–Ni shape memory alloys. *Scr. Metall. Mater.* **25**(4), 883–888 (1991)
7. L.G. Bujoreanu, S. Stanciu, B. Özkal, R.I. Comănesci, M. Meyer, Comparative study of the structures of Fe–Mn–Si–Cr–Ni shape memory alloys obtained by classical and by powder metallurgy, respectively, in *European Symposium on Martensitic Transformations* (EDP Sciences, 2009), p. 05003
8. B. Berthelville, J.E. Bidaux, Alternative powdermetallurgical processing of Ti-rich NiTi shape memory alloys. *Scripta Mater.* **52**(6), 507–512 (2005)
9. M. Bram, A. Ahmad-Khanlou, A. Heckmann, B. Fuchs, H.P. Buchkremer, D. Stöver, Powder metallurgical fabrication processes for NiTi shape memory alloy parts. *Mater. Sci. Eng., A* **337**(1), 254–263 (2002)
10. M. Köhl, T. Habijan, M. Bram, H.P. Buchkremer, D. Stöver, M. Köller, Powder metallurgical near-net-shape fabrication of porous NiTi shape memory alloys for use as long-term implants by the combination of the metal injection molding process with the space-holder technique. *Adv. Eng. Mater.* **11**(12), 959–968 (2009)
11. B. Yuan, C.Y. Chung, M. Zhu, Microstructure and martensitic transformation behavior of porous NiTi shape memory alloy prepared by hot isostatic pressing processing. *Mater. Sci. Eng., A* **382**(1), 181–187 (2004)
12. N. Zhang, P.B. Khosrovabadi, J.H. Lindenhovius, B.H. Kolster, TiNi shape memory alloys prepared by normal sintering. *Mater. Sci. Eng., A* **150**(2), 263–270 (1992)
13. S.M. Green, D.M. Grant, N.R. Kelly, Powder metallurgical processing of Ni–Ti shape memory alloy. *Powder Metall.* **40**(1), 43–47 (1997)
14. S.Wu, C.Y. Chung, X. Liu, P.K. Chu, J.P.Y. Ho, C.L. Chu, Y.L. Chan, K.W.K. Yeung, W.W. Lu, K.M.C. Cheung, K.D.K. Luk, Pore formation mechanism and characterization of porous NiTi shape memory alloys synthesized by capsule-free hot isostatic pressing. *Acta Mater.* **55**(10), 3437–3451 (2007)
15. M.D. McNeese, D.C. Lagoudas, T.C. Pollock, Processing of TiNi from elemental powders by hot isostatic pressing. *Mater. Sci. Eng., A* **280**(2), 334–348 (2000)
16. B. Yuan, C.Y. Chung, X.P. Zhang, M.Q. Zeng, M. Zhu, Control of porosity and superelasticity of porous NiTi shape memory alloys prepared by hot isostatic pressing. *Smart Mater. Struct.* **14**(5), S201 (2005)
17. E. Schüller, O.A. Hamed, M. Bram, D. Sebold, H.P. Buchkremer, D. Stöver, Hot isostatic pressing (HIP) of elemental powder mixtures and prealloyed powder for NiTi shape memory parts. *Adv. Eng. Mater.* **5**(12), 918–924 (2003)
18. S.L. Wu, X.M. Liu, P.K. Chu, C.Y. Chung, C.L. Chu, K.W.K. Yeung, Phase transformation behavior of porous NiTi alloys fabricated by capsule-free hot isostatic pressing. *J. Alloy. Compd.* **449**(1), 139–143 (2008)
19. L. Krone, E. Schüller, M. Bram, O. Hamed, H.P. Buchkremer, D. Stöver, Mechanical behavior of NiTi parts prepared by powder metallurgical methods. *Mater. Sci. Eng., A* **378**(1), 185–190 (2004)
20. L. Krone, J. Mentz, M. Bram, H.P. Buchkremer, D. Stöver, M. Wagner, G. Eggeler, D. Christ, S. Reese, D. Bogdanski, M. Köller, The potential of powder metallurgy for the fabrication of biomaterials on the basis of nickel-titanium: a case study with a staple showing shape memory behaviour. *Adv. Eng. Mater.* **7**(7), 613–619 (2005)
21. B.Y. Li, L.J. Rong, V.E. Gjunter, Y.Y. Li, Porous Ni–Ti shape memory alloys produced by two different methods. *Z. Metall.* **91**(4), 291–295 (2000)
22. A. Biswas, Porous NiTi by thermal explosion mode of SHS: processing, mechanism and generation of single phase microstructure. *Acta Mater.* **53**(5), 1415–1425 (2005)
23. D.C. Dunand, P. Müllner, Size effects on magnetic actuation in Ni–Mn–Ga shape-memory alloys. *Adv. Mater.* **23**(2), 216–232 (2011)
24. R.S. Kishore, R.K. Nandhakumar, V. Gokul, A. Siddharthan, Characterization of mechanochemically synthesized Cu–Al–Mn shape memory alloy powders and spark plasma sintered compacts
25. R.A. Portier, P. Ochin, A. Pasko, G.E. Monastyrsky, A.V. Gilchuk, V.I. Kolomytsev, Y.N. Koval, Spark plasma sintering of Cu–Al–Ni shape memory alloy. *J. Alloy. Compd.* **577**, S472–S477 (2013)
26. C. Shearwood, Y.Q. Fu, L.Yu, K.A. Khor, Spark plasma sintering of TiNi nano-powder. *Scripta Mater.* **52**(6), 455–460 (2005)
27. K. Ito, W. Ito, R.Y. Umetsu, S. Tajima, H. Kawaura, R. Kainuma, K. Ishida, Metamagnetic shape memory effect in polycrystalline NiCoMnSn alloy fabricated by spark plasma sintering. *Scripta Mater.* **61**(5), 504–507 (2009)
28. H. Meier, C. Haberland, J. Frenzel, Structural and functional properties of NiTi shape memory alloys produced by selective laser melting, in *Innovative Developments in Design and Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping* (2011), pp. 291–296
29. B.V. Krishna, S. Bose, A. Bandyopadhyay, Fabrication of porous NiTi shape memory alloy structures using laser engineered net shaping. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* **89**(2), 481–490 (2009)

30. C. Haberland, H. Meier, J. Frenzel, On the properties of Ni-rich NiTi shape memory parts produced by selective laser melting, in *ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems* (American Society of Mechanical Engineers, 2012), pp. 97–104
31. I.V. Shishkovsky, L.T. Volova, M.V. Kuznetsov, Y.G. Morozov, I.P. Parkin, Porous biocompatible implants and tissue scaffolds synthesized by selective laser sintering from Ti and NiTi. *J. Mater. Chem.* **18**(12), 1309–1317 (2008)
32. T. Niendorf, F. Brenne, P. Krooß, M. Vollmer, J. Günther, D. Schwarze, H. Biermann, Microstructural evolution and functional properties of Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy processed by Selective laser melting. *Metall. Mater. Trans. A* **47**(6), 2569–2573 (2016)
33. T. Gustmann, A. Neves, U. Kühn, P. Gargarella, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, J. Eckert, S. Pauly, Influence of processing parameters on the fabrication of a Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy by selective laser melting. *Addit. Manuf.* **11**, 23–31 (2016)
34. E.M. Mazzer, C.S. Kiminami, P. Gargarella, R.D. Cava, L.A. Basilio, C. Bolfarini, W.J. Botta, J. Eckert, T. Gustmann, S. Pauly, Atomization and selective laser melting of a Cu-Al-Ni-Mn shape memory alloy, in *Materials Science Forum*, vol. 802 (2014)
35. P. Gargarella, C.S. Kiminami, E.M. Mazzer, R.D. Cava, L.A. Basilio, C. Bolfarini, W.J. Botta, J. Eckert, T. Gustmann, S. Pauly, Phase formation, thermal stability and mechanical properties of a Cu-Al-Ni-Mn shape memory alloy prepared by selective laser melting. *Mater. Res.* **18**, 35–38 (2015)
36. I.V. Shishkovsky, M.V. Kuznetsov, Y.G. Morozov, Porous titanium and nitinol implants synthesized by SHS/SLS: microstructural and histomorphological analyses of tissue reactions. *Int. J. Self Propag. High Temp. Synth.* **19**(2), 157–167 (2010)
37. A. Bandyopadhyay, B. Krishna, W. Xue, S. Bose, Application of laser engineered net shaping (LENS) to manufacture porous and functionally graded structures for load bearing implants. *J. Mater. Sci. - Mater. Med.* **20**(1), 29 (2009)
38. J. Otubo, O.D. Rigo, C.M. Neto, P.R. Mei, The effects of vacuum induction melting and electron beam melting techniques on the purity of NiTi shape memory alloys. *Mater. Sci. Eng., A* **438**, 679–682 (2006)
39. J. Otubo, O.D. Rigo, C.M. Neto, M.J. Kaufman, P.R. Mei, Scale up of NiTi shape memory alloy production by EBM. In *Journal de Physique IV (Proceedings)*, vol. 112 (EDP sciences, 2003), pp. 873–876
40. J. Otubo, O.D. Rigo, C.D. Moura Neto, M.J. Kaufman, P.R. Mei, Low carbon content NiTi shape memory alloy produced by electron beam melting. *Mater. Res.* **7**(2), 263–267 (2004)
41. K. Mehta, Advanced joining and welding techniques: an overview, in *Advanced Manufacturing Technologies* (Springer International Publishing, 2017), pp. 101–136
42. K.P. Mehta, V.J. Badheka, A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants. *Mater. Manuf. Processes* **31**(3), 233–254 (2016)
43. Z.Y. Ma, Friction stir processing technology: a review. *Metall. Mater. Trans. A* **39**(3), 642–658 (2008)
44. A. Barcellona, L. Fratini, D. Palmeri, C. Maletta, M. Brandizzi, Friction stir processing of Niti shape memory alloy: microstructural characterization. *Int. J. Mater. Form.* **3**, 1047–1050 (2010)
45. B. London, J. Fino, A.R. Pelton, M. Mahoney, T.J. Lienert, T.M.S. Warrendale, Friction stir processing of Nitinol. *Friction Stir Weld. Process.* **III** (2005)
46. D.R. Ni, J.J. Wang, Z.N. Zhou, Z.Y. Ma, Fabrication and mechanical properties of bulk NiTi/Al composites prepared by friction stir processing. *J. Alloy. Compd.* **586**, 368–374 (2014)
47. M. Dixit, J.W. Newkirk, R.S. Mishra, Properties of friction stir-processed Al 1100–NiTi composite. *Scripta Mater.* **56**(6), 541–544 (2007)
48. D.Y. Cong, Y.D. Wang, X. Zhao, L. Zuo, R.L. Peng, P. Zetterström, P.K. Liaw, Crystal structures and textures in the hot-forged Ni-Mn-Ga shape memory alloys. *Metall. Mater. Trans. A* **37**(5), 1397–1403 (2006)
49. J.T. Yeom, J.H. Kim, J.K. Hong, S.W. Kim, C.H. Park, T.H. Nam, K.Y. Lee, Hot forging design of as-cast NiTi shape memory alloy. *Mater. Res. Bull.* **58**, 234–238 (2014)
50. F.B. Fernandes, K.K. Mahesh, A. dos Santos Paula, Thermomechanical treatments for Ni-Ti alloys, in *Shape Memory Alloys-Processing, Characterization and Applications* (InTech, 2013)
51. S.Y. Jiang, Y.Q. Zhang, Y.N. Zhao, Dynamic recovery and dynamic recrystallization of NiTi shape memory alloy under hot compression deformation. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **23**(1), 140–147 (2013)
52. I. Karaman, A.V. Kulkarni, Z.P. Luo, Transformation behaviour and unusual twinning in a NiTi shape memory alloy ausformed using equal channel angular extrusion. *Phil. Mag.* **85**(16), 1729–1745 (2005)
53. M.H. Wu, Fabrication of nitinol materials and components, in *Materials Science Forum*, vol. 394 (Trans Tech Publications, 2002), pp. 285–292
54. V. Demers, V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, K.E. Inaekyan, Optimization of the cold rolling processing for continuous manufacturing of nanostructured Ti–Ni shape memory alloys. *J. Mater. Process. Technol.* **209**(6), 3096–3105 (2009)
55. Y. Facchinello, V. Brailovski, S.D. Prokoshkin, T. Georges, S.M. Dubinskiy, Manufacturing of nanostructured Ti–Ni shape memory alloys by means of cold/warm rolling and annealing thermal treatment. *J. Mater. Process. Technol.* **212**(11), 2294–2304 (2012)
56. K. Gall, J. Tyber, G. Wilkesanders, S.W. Robertson, R.O. Ritchie, H.J. Maier, Effect of microstructure on the fatigue of hot-rolled and cold-drawn NiTi shape memory alloys. *Mater. Sci. Eng., A* **486**(1), 389–403 (2008)
57. J. Otubo, P.R. Mei, S. Koshimizu, Production and characterization of stainless steel based Fe-Cr-Ni-Mn-Si (-Co) shape memory alloys. *J. Phys. IV* **5**(C8), C8–427 (1995)