



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ  
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ, ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Κος ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ**

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ**

**Αθήνα, Ιούλιος 2014**

# **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί περιγράφει τη χρησιμότητα των κραμάτων μνήμης σχήματος (Shape Memory Alloys - SMA) στη σημερινή επιστήμη. Ξεκινώντας από την περιγραφή των φαινομένων στα οποία βασίζονται οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των SMA, γίνεται αναφορά στα σημεία που τα κάνει να ξεχωρίζουν από τη γενικότερη κατηγορία των έξυπνων υλικών στην οποία κατατάσσονται. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι μέθοδοι κατεργασίας των SMA συνοδευόμενες από σχετικά πειραματικά δεδομένα των δοκιμών πάνω στα οποία έχουν θεμελιωθεί τα χρήσιμα συμπεράσματα που διατυπώνονται ανά μέθοδο κατεργασίας. Ανάλογη προσπάθεια γίνεται για την κατεργασία των SMA σε επίπεδο μικρο-διαστάσεων, τομέας που έχει ήδη αποφέρει ανεκτίμητα οφέλη σε πολλούς τομείς της σύγχρονης επιστήμης (ενδεικτικά αναφέρονται οι τομείς αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική και ιατρική) και, κυρίως, δείχνει να επιφυλάσσει ακόμη περισσότερα για το άμεσο μέλλον. Τέλος, γίνεται εκτενής αναφορά στις εφαρμογές που έχουν τα SMA στη βιομηχανία και τους τομείς της επιστήμης.

# **ABSTRACT**

The following diploma thesis refers to the usage of shape memory alloys (SMA) in the science today. Starting with the description of the principles where characteristic properties of SMA based on, a reference to the points that make them distinguish from the generic category of the smart materials where they belong to is exhibited. The machining processes of SMA along with the experimental data which consist the base of useful output are listed per unique process. Particularly, the same attempt is executed regarding the micro scale manufacturing processes, a sector that has already yielded a lot of priceless benefits in several science industries (automotive, aerospace, medicine are listed indicatively) and promises even better future. Finally, a detailed reference into the SMA applications per industry is provided.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1.</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA) [1]</b> .....	<b>7</b>
2.1	<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i> 7	
2.2	<i>ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)</i> 7	
2.2.1.	ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ.....	7
2.2.2.	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ – ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ .....	8
2.2.3.	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ.....	9
2.2.4.	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡ-ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	10
2.3	<i>ΤΥΠΟΙ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ</i> 11	
2.4	<i>ΜΟΡΦΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ</i> 13	
2.5	<i>ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ</i> 13	
2.5.1.	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	14
2.5.2.	ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ.....	14
2.5.3.	ΥΠΕΡ-ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	17
2.5.4.	ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΔΟΝΗΣΗΣ .....	18
2.5.5.	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΠΗΛΛΑΙΩΣΗΣ - ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ .....	20
2.5.6.	ΧΑΜΗΛΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	20
<b>3.</b>	<b>ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA) [13]</b> .....	<b>23</b>
3.1	<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i> 23	
3.2	<i>ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)</i> 23	
3.3	<i>ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)</i> 25	
3.3.1.	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ LASER.....	26
3.3.2.	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΣΤΙΛΒΩΣΗ SMA.....	26
3.3.3.	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΥΔΑΤΟΣ.....	27
3.3.4.	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (Electrical discharge machining EDM).....	28
3.3.5.	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΡΜΑΤΟΣ (Wire electrical discharge machining WEDM).....	31
3.4	<i>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ EDM ΚΑΙ W-EDM</i> 34	
3.5	<i>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ</i> 36	
<b>4.</b>	<b>ΜΙΚΡΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)</b> .....	<b>37</b>
4.1	<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i> 37	
4.2	<i>ΜΙΚΡΟ-ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ [46]</i> 37	
4.2.1.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	37
4.2.2.	ΜΙΚΡΟ-ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ Ni-Ti.....	37
4.2.3.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ .....	38
4.2.4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟ-ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ .....	40
4.2.5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	42
4.3	<i>ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ LASER ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ</i> 43	
4.3.1.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	43
4.3.2.	ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ LASER ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ .....	43
4.3.3.	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ.....	44
4.4	<i>ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (MICRO ELECTRO DISCHARGE MACHINING) [57]</i> 44	
4.4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	44
4.4.2.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	45
4.4.3.	ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	46
4.4.4.	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ .....	47
4.4.5.	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ .....	48
4.4.6.	ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MATERIAL REMOVAL RATE MRR) ΣΤΗΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ M-EDM .....	53

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

4.4.7.	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΣΤΙΛΒΩΣΗ – ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ (ELECTRO – CHEMICAL POLISHING ECP) ΣΤΗΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ Μ-EDM.....	54
4.4.8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	56
<b>4.5</b>	<b>ΜΙΚΡΟ - ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ SMA ΜΕ LASER [63]</b>	<b>57</b>
4.5.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57
4.5.2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ ΝΙ-ΤΙ ΠΑΧΟΥΣ 0,2mm ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ MICRO-LASER .....	58
4.5.3.	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ ΝΙ-ΤΙ ΠΑΧΟΥΣ 0,2mm ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ MICRO-LASER .....	59
4.5.4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ ΝΙ-ΤΙ ΠΑΧΟΥΣ 0,2mm ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ MICRO-LASER .....	64
<b>5.</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ [77]</b> .....	<b>65</b>
5.1	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>65</b>
5.2	<b>ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ – ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ</b>	<b>65</b>
5.2.1.	Cryofit® ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ .....	65
5.2.2.	Frangibolt® ΚΟΧΛΙΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ .....	66
5.2.3.	ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗΣ ΚΙΝΗΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ SOJOURNER ΣΤΟΝ ΑΡΗ .....	67
5.2.4.	ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ .....	67
5.2.5.	ΕΞΥΠΝΑ ΦΤΕΡΑ ΑΕΡΟΠΛΑΝΩΝ .....	68
5.2.6.	ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΙ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΔΟΝΗΣΗΣ .....	68
5.3	<b>ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ</b>	<b>68</b>
5.3.1.	Flexon® ΥΠΕΡ-ΕΛΑΣΤΙΚΟΙ ΣΚΕΛΕΤΟΙ ΟΠΤΙΚΩΝ .....	69
5.3.2.	ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΗΛΕΦΩΝΩΝ .....	69
5.3.3.	ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ .....	69
5.3.4.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΡΟΜΕΝΗΣ ΠΟΡΤΑΣ.....	70
5.3.5.	ΜΠΑΣΤΟΥΝΙΑ NICKLAUS GOLF CLUB .....	70
	ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΑΛΟΡΙΦΕΡ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ .....	70
5.3.6.	.....	70
5.3.7.	ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΒΡΑΣΤΗΡΑ ΡΥΖΙΟΥ .....	71
5.3.8.	ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΑΝΘΡΩΠΙΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	71
5.3.9.	ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ .....	72
5.4	<b>ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ</b>	<b>72</b>
5.4.1.	ΒΑΛΒΙΔΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΕΓΚΑΥΜΑ (Antiscald MemrySafe® Valve).....	72
5.4.2.	ΒΑΛΒΙΔΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....	72
5.4.3.	ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ .....	73
5.4.4.	ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ Proteus® .....	73
5.4.5.	ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ .....	73
5.4.6.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΔΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΩΝ .....	74
5.5	<b>ΙΑΤΡΙΚΗ</b>	<b>74</b>
5.5.1.	ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΑ ΚΥΡΤΑ ΣΥΡΜΑΤΑ .....	74
5.5.2.	ΣΥΡΜΑ – ΒΕΛΟΝΑ Mitek Homer Mammalok® .....	75
5.5.3.	Mitek ΑΓΚΥΡΕΣ ΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	75
5.5.4.	ΠΥΡΗΝΑΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ - ΟΔΗΓΟΥ .....	76
5.5.5.	ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΑ ΕΝΔΟΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ (STENTS).....	76
5.5.6.	Simon Nitinol Filter® .....	78
5.5.7.	ΔΙΑΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΦΡΑΞΕΩΣ AMPLATZER®.....	78
5.5.8.	ΟΡΘΟΠΕΔΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ .....	78
5.5.9.	ΔΙΑΦΟΡΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ .....	79
5.6	<b>ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ</b>	<b>79</b>
5.6.1.	ΒΑΛΒΙΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΣΗΣ .....	80
5.6.2.	ΤΟΥΟΤΑ ΡΟΔΕΛΕΣ SMA ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΘΟΥΡΥΒΟΥ .....	81
5.6.3.	ΡΟΔΕΛΕΣ SMA ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ.....	81
5.6.4.	ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ ΣΥΜΠΛΕΚΤΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ.....	81
5.7	<b>ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ - ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑ</b>	<b>82</b>
5.7.1.	ΖΕΥΞΕΙΣ ΑΓΩΓΩΝ.....	82
5.7.2.	ΔΙΑΡΘΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	83
5.7.3.	ΘΡΑΥΣΗ ΒΡΑΧΩΝ.....	83
5.7.4.	ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	84

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

5.7.5.	ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΑΤΜΟΥ .....	84
5.7.6.	ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΠΥΡΗΝΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ.....	84
5.7.7.	ΣΥΣΚΕΥΗ ΤΑΝΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΥΡΜΑΤΩΝ.....	85
5.7.8.	ΕΤΙΚΕΤΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΩΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	85
5.7.9.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Sentinel® .....	85
5.7.10.	ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ .....	86
<b>5.8</b>	<b>ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ</b>	<b>87</b>
5.8.1.	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΩΣΗ Cryocon® .....	87
5.8.2.	ZIF (Zero insertion force) Connector– ΒΥΣΜΑ ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ .....	87
5.8.3.	ΜΙΚΡΟΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ .....	88
<b>5.9</b>	<b>ΜΕΛΑΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>88</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Μέσα στις τελευταίες δεκαετίες, η επιστημονική και τεχνολογική πρόοδος στην κατανόηση της συμπεριφοράς και της σχέσης της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών έχει οδηγήσει στην εμφάνιση πολλών υλικών που αποκαλούνται έξυπνα ή ευφυή υλικά.

Ως ευφυή υλικά αναφέρονται συστήματα που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, ιδιοσυχνότητα, συντελεστής απόσβεσης δονήσεων κτλ.) με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, μέσω μιας διέγερσης.

Με τη διαθεσιμότητα προηγμένων υπολογιστών και την ανάπτυξη στην επιστήμη των υλικών, οι ερευνητές μπορούν τώρα να εκτιμήσουν τις διαδικασίες, το σχέδιο, το μοντέλο και να κατασκευάσουν υλικά με την επιθυμητή απόδοση και τις κατάλληλες ιδιότητες. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται νέες εφαρμογές για υλικά με μνήμη σχήματος (shape memory materials), ηλεκτρορεολογικά και μαγνητορεολογικά ρευστά (electrorheologic and magnetorheologic fluids), πιεζοηλεκτρικά (piezoelectrics), σίδηροηλεκτρικά (ferroelectrics), μαγνητοσταλτικά (magnetostrictive), και ηλεκτροενεργά πολυμερή σώματα (electroactive polymers).

Τα τελευταία χρόνια, ερευνητές με διαφορετικούς τρόπους έχουν κάνει μεγάλες και έντονες προσπάθειες για να αναπτυχθούν οι έξυπνες ή ευφυείς δομές, οι οποίες θα μπορούν να ικανοποιούν τις συνθήκες τους, να ανιχνεύουν επικείμενη αστοχία, να ελέγχουν ή να επιδιορθώνουν ζημιές, και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα. Τέτοια διεπιστημονική και λεπτή έρευνα, που απαιτεί τη συμμετοχή επιστημόνων των υλικών, φυσικών, φαρμακοποιών, βιολόγων, και μηχανικών από διάφορους τομείς (π.χ. μηχανολόγων, ηλεκτρολόγων, πολιτικών μηχανικών, αεροναυπηγών κ.λπ.) έχει δημιουργήσει μια εντελώς νέα έρευνα για την αλληλεπίδραση των στοιχείων.

## **2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA) [1]**

---

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα κράματα μνήμης σχήματος έχουν σχεδιασθεί για εφαρμογές και συσκευές από την πρώτη κιόλας φορά που διαπιστώθηκε η ιδιότητα της μνήμης σχήματος, τη δεκαετία του 1930. Το κύριο μέρος αυτής της δραστηριότητας ξεκίνησε με την ανακάλυψη των σχετικών ιδιοτήτων του Nitinol (κράμα Νικελίου – Τιτανίου Ni-Ti) και από τότε έχουν εκδοθεί περισσότερες από 10.000 πατέντες σχετικές με εφαρμογές κραμάτων μνήμης σχήματος στις ΗΠΑ και περισσότερες από 20.000 παγκοσμίως [2].

### **2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)**

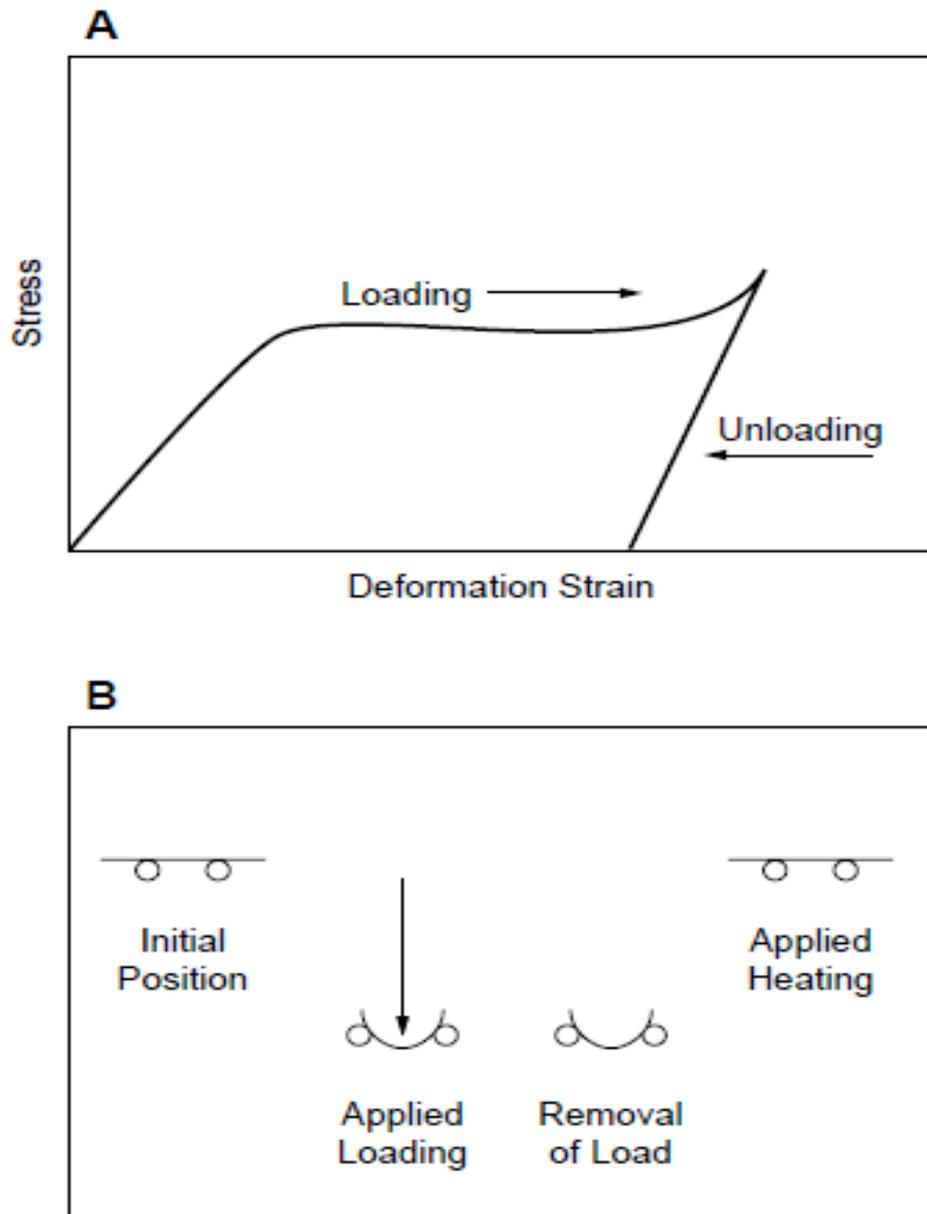
#### **2.2.1. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ**

Τα κράματα μνήμης σχήματος είναι πρωταρχικώς γνωστά για μία θεμελιώδη και μοναδική τους ιδιότητα: την ικανότητα να θυμούνται και να επανακάμπτουν από μεγάλες φορτίσεις χωρίς μόνιμη παραμόρφωση. Σε αντίθεση με τα περισσότερα από τα συμβατικά μέταλλα τα οποία επανακάμπτουν στην αρχική τους κατάσταση μόνο από μικρότερες της τάξης του 1% παραμορφώσεις, πριν εισέλθουν στην περιοχή της πλαστικής του παραμόρφωσης, τα κράματα μνήμης σχήματος υποβάλλονται σε μη διαχυτικής φύσεως, θερμοελαστική, μαρτενσιτική φάσης παραμόρφωση η οποία επιτρέπει στο κράμα να παραμορφωθεί ακολουθώντας μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία αντί του συμβατικού μηχανισμού εξάρθρωσης μέσω ολίσθησης και του δίνει τη δυνατότητα να ανακτά την αρχική κατάσταση των στελεχών του επιστρέφοντας από παραμορφώσεις μέχρι και της τάξεως του 8% ή και περισσότερο [3-6].

## 2.2.2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ – ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η πιο διαδεδομένη μορφή συμπεριφοράς μετασχηματισμού που παρατηρείται στα κράματα μνήμης σχήματος είναι η θερμική αλλοίωση σχήματος, η οποία συχνά αναφέρεται ως φαινόμενο μνήμης σχήματος (Shape memory effect SME). Ένα υλικό είναι δυνατό να παραμορφωθεί ή να φορτιστεί σε χαμηλές θερμοκρασίες και όταν θερμανθεί περαιτέρω, να αντιστρέψει αυτή την παραμόρφωση ή φόρτιση και να επανέλθει στην πρότερη κατάσταση, έχοντας απομνημονεύσει το αρχικό του σχήμα (Εικόνα 2.1). Η χαμηλής θερμοκρασίας μαρτενσιτική φάση παραμόρφωσης μετατρέπεται στην πιο σταθερή ωστενιτική φάση των αυξημένων θερμοκρασιών. Η μετάβαση αυτή συμβαίνει κατά μήκος ορισμένου εύρους θερμοκρασιών, που είναι γνωστό ως εύρος θερμοκρασιών μετασχηματισμού (Transformation temperature range TTR). Ειδικά για το κράμα Ni-Ti, το εύρος των θερμοκρασιών αυτών είναι περίπου 30 έως 50°C και είναι επίσης γνωστό ως θερμοκρασιακή υστέρηση. Η θερμοκρασία εκκίνησης ( $A_s$ ) είναι αυτή από όπου ξεκινά η ωστενιτική φάση παραμόρφωσης μέσω της θέρμανσης και η θερμοκρασία λήξης ( $A_f$ ) αυτή όπου ολοκληρώνεται. Οι αντίστοιχες θερμοκρασίες της μαρτενσιτικής φάσης παραμόρφωσης μέσω ψύξης είναι  $M_s$  και  $M_f$ .

## Shape Memory Effect



Εικόνα 2.1: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων και σχηματική αναπαράσταση εφαρμοζόμενων δυνάμεων κατά το φαινόμενο ανάκτησης μνήμης σχήματος.

### **2.2.3. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ**

Τα κράματα μνήμης σχήματος είναι δυνατό να "εκπαιδευθούν" κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να παρουσιάζουν το φαινόμενο μνήμης σχήματος προς δύο κατευθύνσεις (Two way shape memory TWSM). Παρόμοια με το φαινόμενο μνήμης σχήματος με θερμική κατεργασία,

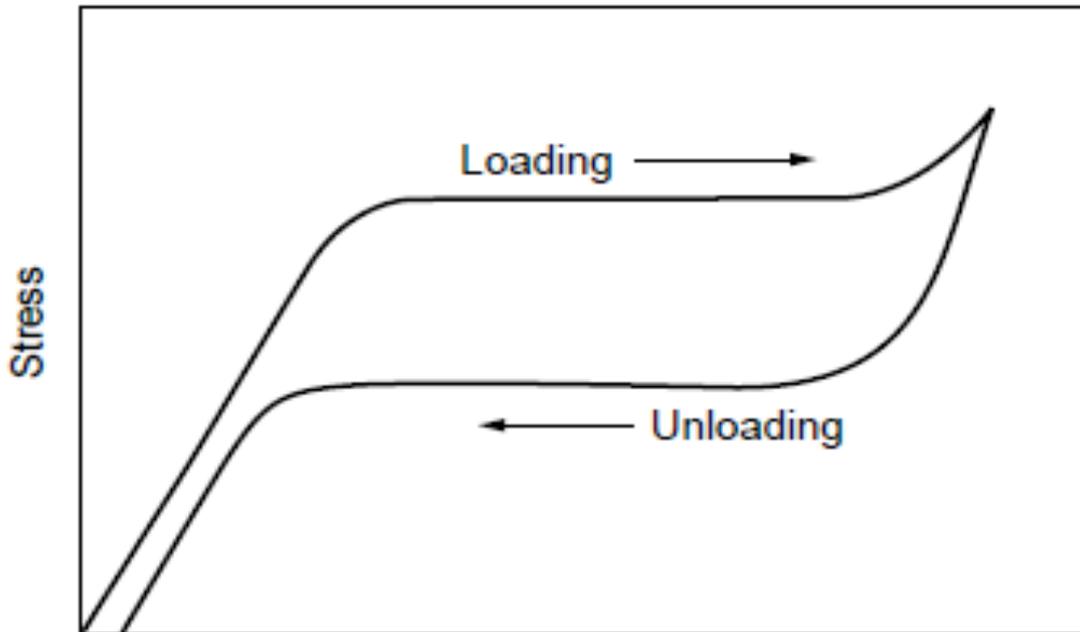
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

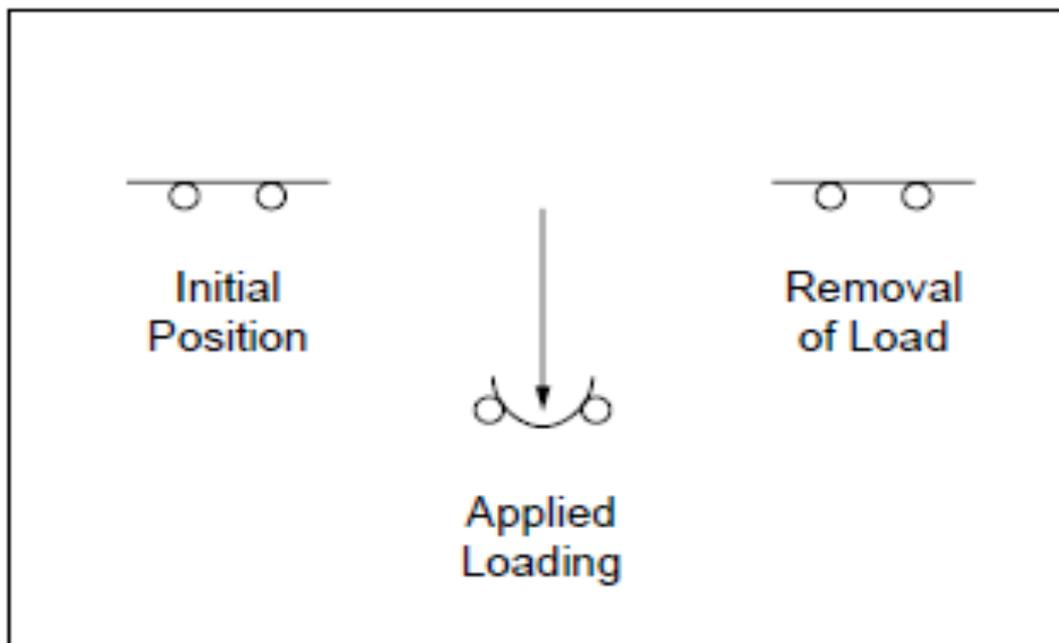
η αμφίδρομη μνήμη σχήματος επιτυγχάνεται με ειδική θερμομηχανική επεξεργασία η οποία προσδίδει στο κράμα ιδιότητες μνήμης σχήματος προς τις δύο κατευθύνσεις, ωστενιτικής και μαρτενσιτικής φάσης παραμόρφωσης. Ένα εκπαιδευμένο σχήμα στην ωστενιτική φάση παραμόρφωσης μετατρέπεται σε ένα δεύτερο σχήμα στην μαρτενσιτική φάση, μέσω ψύξης, επιτρέποντας στο υλικό να μετακινείται μεταξύ των δύο σχημάτων. Η ιδιότητα αυτή είναι θεωρητικά ιδανική για πολλές εφαρμογές υλικών με μνήμη σχήματος, οι πρακτικές εφαρμογές, όμως, είναι περιορισμένες καθώς η συμπεριφορά των κραμάτων αυτών δεν είναι αξιόπιστα σταθερή και η επεξεργασία τους απαιτεί πολύπλοκες διαδικασίες.

#### **2.2.4. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΠΕΡ-ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Το φαινόμενο αυτό, γνωστό και ως ψευδο-ελαστικότητα, περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο τα στελέχη του υλικού ανακτούν ισόθερμα τη μηχανική τους συμπεριφορά, έχοντας απομνημονεύσει το αρχικό τους σχήμα (Εικόνα 2.2). Το φαινόμενο είναι ουσιαστικά ίδιο με αυτό της μνήμης σχήματος με θερμική επεξεργασία, αν και η φάση της μετατροπής σε ωστενιτική παραμόρφωση ( $A_f$ ) λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες μικρότερες από την αναμενόμενη θερμοκρασία επεξεργασίας. Εάν στην ωστενιτική φάση εφαρμοστεί φορτίο, έχουμε μετάβαση στη μαρτενσιτική φάση, όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν είχε ψυχθεί στη μαρτενσιτική του θερμοκρασία ( $M_s$ ). Όταν το φορτίο απομακρυνθεί, το κράμα εγγενώς μεταφέρεται και πάλι στην ωστενιτική φάση στη θερμοκρασία λειτουργίας και τα στελέχη του επανακάμπτουν στην πρότερη κατάσταση (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.2: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων κατά το φαινόμενο υπερ-ελαστικότητας



Εικόνα 2.3: Εφαρμογή δυνάμεων και επαναφορά σχήματος κατά το φαινόμενο της υπερ-ελαστικότητας

### 2.3 ΤΥΠΟΙ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευασθεί πολλά κράματα που έχουν να επιδείξουν συμπεριφορά μνήμης σχήματος, σε ποικιλία τύπου και

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

βαθμού. Τα κράματα με τη μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία είναι τα: νικελίου-τιτανίου, τα τριαδικά που βασίζονται σε νικέλιο-τιτάνιο Ni-Ti-X και τα κράματα που βασίζονται στον χαλκό Cu. Οι δύο πρώτες κατηγορίες κραμάτων, συναντώνται στο 90% των σημερινών εφαρμογών κραμάτων μνήμης σχήματος [7].

Τα κράματα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti έχουν μεγαλύτερο κόστος για να τηχθούν και να γίνουν παραγωγικά από τα κράματα χαλκού Cu, προτιμώνται, όμως, για την ολκιμότητά τους, τη σταθερότητα στη συμπεριφορά τους, την αντοχή τους στη διάβρωση και τη μεγαλύτερη ηλεκτρική τους αντίσταση που χρησιμεύει στην κατασκευή ωμικών θερμαντήρων ενεργοποιητών (συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση βαλβίδων, αισθητήρων μέσω μιας θερμικής ή παλμικής διέγερσης κλπ) [7].

Τα πιο κοινά κράματα που βασίζονται στον χαλκό Cu:

- χαλκού-αργιλίου-νικελίου Cu-Al-Ni και
- χαλκού-ψευδαργύρου-αργιλίου Cu-Zn-Al,

προτιμώνται για μικρή θερμική υστέρηση που παρουσιάζουν και την προσαρμοστικότητά τους στην αμφίδρομη μνήμη σχήματος [8].

Τέλος, τα τριμερή κράματα Ni-Ti-X χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση ειδικών παραμέτρων όταν υπάρχει ανάλογη απαίτηση. Για παράδειγμα:

- το κράμα νικελίου-τιτανίου-νιοβίου Ni-Ti-Nb επιλέγεται για την ευρεία θερμική υστέρησή του
- το κράμα νικελίου-τιτανίου-σιδήρου Ni-Ti-Fe για το εξαιρετικά περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών μετασχηματισμού (Transformation temperature range TTR)
- το κράμα νικελίου-τιτανίου-χρωμίου Ni-Ti-Cr για τη σταθερότητα του εύρους θερμοκρασιών μετασχηματισμού TTR που επιδεικνύει κατά τη θερμομηχανική επεξεργασία και
- το κράμα νικελίου-τιτανίου-χαλκού Ni-Ti-Cu για την περιορισμένη θερμική υστέρηση και τη σταθερότητά της συμπεριφοράς του [8].

## 2.4 ΜΟΡΦΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Τα κράματα μνήμης σχήματος κατασκευάζονται σε πολλές από τις αναμενόμενες μορφές μεταλλικών κραμάτων: χρωματισμένο στρογγυλό καλώδιο, επίπεδο καλώδιο, σωλήνωση, τυλιγμένο σε ρολό φύλλο ή λεπτό φιλμ. Επιπλέον μορφές αποτελούν τα σχηματισμένα εξαρτήματα, κωνικά καλώδια και σωλήνες εδάφους, εφεδρικού συρμάτινου πυρήνα (νικελίου-τιτανίου Ni-Ti εξοπλισμένο με αγωγίμο ή ακτινοσκιερό υλικό), σύρμα με επίστρωση τεφλόν (PTFE), συρματόσχοινα και ενσωματωμένα σύνθετα υλικά. Τα κράματα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti είναι τα πιο άμεσα διαθέσιμα σε όλες τις παραπάνω μορφές.

Η επεξεργασία ενός κράματος μνήμης σχήματος (shape memory alloy SMA) είναι καθοριστική για τον ακριβή καθορισμό του τύπου και του βαθμού συμπεριφοράς μνήμης σχήματος που θα προσδοθεί στο κράμα. Πολλές προσαρμογές μπορούν να γίνουν στην επεξεργασία του κράματος, ώστε να βελτιστοποιηθούν συγκεκριμένες ιδιότητες του με σκοπό τη χρήση του σε συγκεκριμένη εφαρμογή. Το μεγαλύτερο βάρος, όμως, δίνεται προς την κατεύθυνση της ισορροπημένης ανάκαμψης από φορτίσεις, της καλής ολκιμότητας και της μεγάλης αντοχής. Κράματα όπως αυτά του νικελίου-τιτανίου Ni-Ti τήκονται τηρώντας αυστηρότατους κανόνες ελέγχου καθαρότητας και σύνθεσής τους, θερμαίνονται σε τεμάχια ή πλάκες, ψύχονται για να πάρουν την τελική τους μορφή και υποβάλλονται σε εξειδικευμένες θερμομηχανικές διεργασίες για να ενισχύσουν τις ιδιότητες μνήμης σχήματός τους.

## 2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Τα κράματα μνήμης σχήματος έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον μηχανικών και ερευνητών για περισσότερο από τριάντα χρόνια. Θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει αφενός από τον μεγάλο αριθμό πατεντών σχετικές με κράματα μνήμης σχήματος που έχουν εκδοθεί και αφετέρου από τον περιορισμένο αριθμό επιτυχημένων σχετικών ιδεών που έχουν δημοσιευθεί ότι η πλειοψηφία των επιτυχημένων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

ευρεσιτεχνιών δεν έχει αποδοθεί στις μοναδικές συμπεριφορές, ιδιότητες και περιορισμούς των κραμάτων μνήμης σχήματος, όπως θα έπρεπε. Η ακόλουθη ενότητα τονίζει τις συχνότερα αξιοποιούμενες ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA) στις εφαρμογές τους και πραγματεύεται τις σκέψεις γύρω από τον σχεδιασμό με κράματα μνήμης σχήματος.

### **2.5.1. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

Οι εφαρμογές των κραμάτων μνήμης σχήματος συχνά κατηγοριοποιούνται με κριτήριο την ιδιότητα του κράματος που κυρίως αξιοποιείται. Η πλειοψηφία αυτών των ιδιοτήτων είναι είτε θερμική μνήμη σχήματος (μνήμη σχήματος που επιτυγχάνεται με θερμική επεξεργασία) είτε μηχανική μνήμη σχήματος (υπερελαστικότητα), υπάρχουν, όμως, κάποιες μοναδικές που μόνο έμμεσα συνδέονται με τη γενικότερη συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης σχήματος. Γενικές κατηγορίες ιδιοτήτων δομούνται γύρω από τις ακόλουθες μοναδικές ιδιότητες.

### **2.5.2. ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ**

Η ενεργοποιούμενη μέσω θερμικής επεξεργασίας ικανότητα ενός υλικού να αλλάζει σχήμα, αποτελεί τη βάση για την κατασκευή πλειάδας εφαρμογών που μπορούν να χωριστούν σε τρεις διακριτές κατηγορίες:

- εφαρμογές που χρησιμοποιούν την αλλαγή σχήματος για να επιδείξουν κίνηση. Συναντάται, επίσης, ως “ελεύθερη ανάκαμψη” και περιγράφει τι εφαρμογές που εκμεταλλεύονται την καθαρή κίνηση της μνήμης σχήματος μέσω θερμικής επεξεργασίας [9]. Παράδειγμα αποτελεί η κινούμενη πεταλούδα της Εικόνας 2.4, που κατασκευάστηκε από την Dynalloy Inc. στην οποία χρησιμοποιείται μια ειδικά επεξεργασμένη μορφή σύρματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti, για να κινούνται εμπρός-πίσω τα φτερά της για χιλιάδες κύκλους, χωρίς σημαντικά σημάδια κόπωσης του υλικού. Το επεξεργασμένο αυτό σύρμα είναι γνωστό ως Flexinol και οι

αλλαγές στο σχήμα του επιτυγχάνονται μέσω κυκλικής θέρμανσης από ηλεκτρικό ρεύμα. Η μικρή μάζα του σώματος της πεταλούδας είναι επαρκής για να επεκτείνει το κράμα νικελίου –τιτανίου Ni-Ti όταν ψύχεται, την ίδια στιγμή, όμως, μπορεί να κλείσει τα φτερά όταν θερμανθούν πέραν του ισχυρότερου ωστενιτικού σχήματός τους.



Εικόνα 2.4 : Πεταλούδα από Flexinol, κατασκευή Dynalloy Inc.

- εφαρμογές ενεργοποιητών, οι οποίες σχεδιάζονται για την παραγωγή έργου. Ένα απλουστευμένο παράδειγμα αποτελεί

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

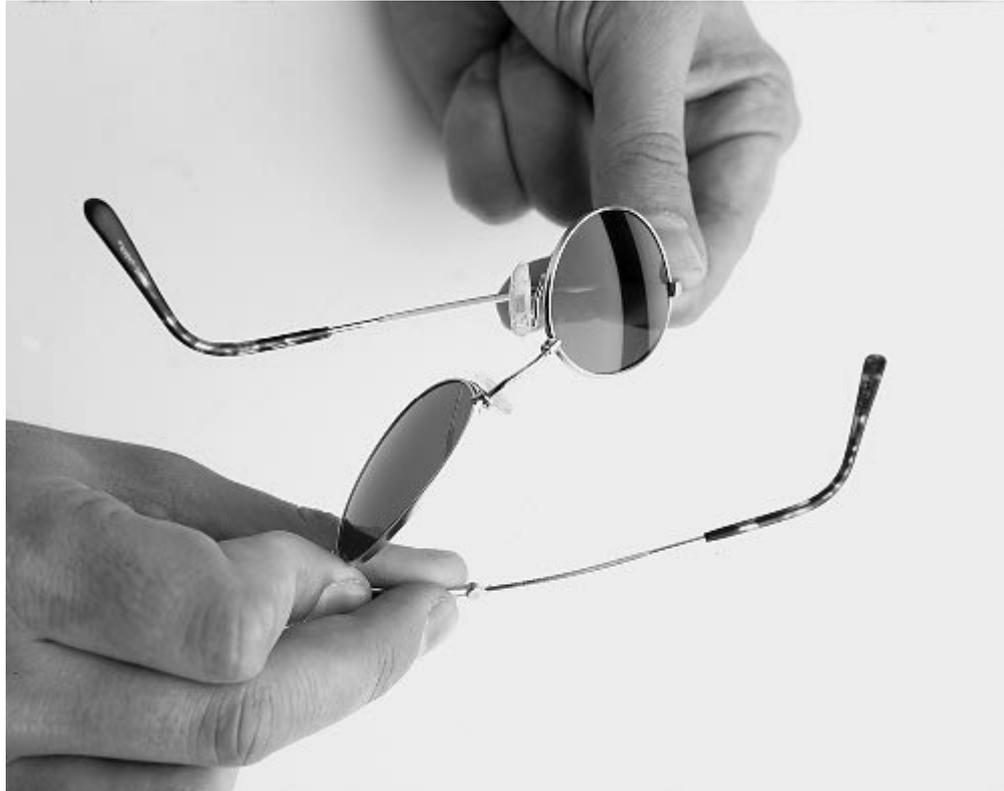
ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

μια μάζα που εξαρτάται από μηχανικό ελατήριο, κατασκευασμένο από κράμα μνήμης σχήματος. Όταν ψύχεται, στην ασθενέστερη μαρτενσιτική φάση, παραμορφώνεται και το ελατήριο εκτείνεται από τη μάζα. Όταν θερμαίνεται, στην ωστενιτική φάση, το ελατήριο ανακτά το σχήμα του εφαρμόζοντας δυνάμεις ικανές να σηκώσουν το βάρος, έχοντας ως αποτέλεσμα την παραγωγή έργου.

- εφαρμογές που αξιοποιούν τις φορτίσεις που παράγονται από τον περιορισμό της ανάκτησης του σχήματος του υλικού. Περιορισμένος αριθμός εφαρμογών αξιοποιεί την ιδιότητα μεταβολής της αντοχής του υλικού μεταξύ της μαρτενσιτικής και της ωστενιτικής φάσης παραμόρφωσης, με σκοπό να παράγει ένα είδος φόρτισης που μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε μια δύναμη σύσφιξης. Ένα δημοφιλές παράδειγμα αποτελεί μια σύζευξη από κράμα μνήμης σχήματος το οποίο διαστέλλεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ όταν θερμανθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, συστέλλεται και αποκτά σχήμα ικανό για την ένωση δύο σωλήνων.

### **2.5.3. ΥΠΕΡ-ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ**

Σε αντίθεση με τις εφαρμογές κραμάτων μνήμης σχήματος που επιτυγχάνονται με θερμική επεξεργασία του υλικού, οι οποίες ταξινομούνται σε διάφορους τύπους, όπως είδαμε παραπάνω, οι εφαρμογές που εκμεταλλεύονται την ιδιότητα της μηχανικής μνήμης σχήματος ορίζονται ως αυτές που απαιτούν πλήρη επαναφορά του σχήματος του κράματος μετά από υψηλές φορτίσεις που έχουν εφαρμοστεί στο υλικό, στη θερμοκρασία λειτουργίας. Πολλά παραδείγματα εφαρμογών που αξιοποιούν την ιδιότητα της υπερ-ελαστικότητας συναντώνται στην ιατρικό κλάδο, ένα από τα πιο χαρακτηριστικά, όμως, είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 2.5, ο εύκαμπτος σκελετός γυαλιών που έχει εμπορική ονομασία Flexon και κατασκευάζεται από την Marchon Eyewear, Inc.



Εικόνα 2.5 :Εύκαμπτος σκελετός Flexol, από την Marchon Eyewear, Inc.

#### 2.5.4. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΔΟΝΗΣΗΣ

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας τόσο στη μαρτενσιτική όσο και στην ωστενιτική φάση παραμόρφωσης ενός κράματος μνήμης σχήματος, σχετίζονται έμμεσα με την ιδιότητα τους να απομνημονεύουν το σχήμα τους. Κάθε υλικό μπορεί να προβλεφθεί έτσι, ώστε να λειτουργεί είτε στη μία είτε στην άλλη φάση του, λειτουργώντας, όμως, υποχρεωτικά σε μία μόνο από αυτές κάθε φορά. Η απορρόφηση ενέργειας των κραμάτων μνήμης σχήματος έχει επιδείξει εξαιρετικά χαρακτηριστικά απόσβεσης δόνησης, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές απόσβεσης. Οι τύποι των συσκευών που εκμεταλλεύονται αυτή την ιδιότητα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες απόσβεσης:

- μαρτενσιτικές συσκευές απόσβεσης οι οποίες λειτουργούν αξιοποιώντας μόνον τη μαρτενσιτική φάση παραμόρφωσης του κράματος μνήμης σχήματος (SMA). Ενέργεια απορροφάται από τον μαρτενσίτη κατά τη διαδικασία αναπροσανατολισμού του και υπάρχει η δυνατότητα να φιλοξενήσει μεγάλα φορτία υψηλού εύρους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

και χαμηλής συχνότητας. Προσφέρονται τα πιο ποιοτικά χαρακτηριστικά απόσβεσης από τις τρεις κατηγορίες συσκευών και, παρόλο που δεν υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς των στρωμάτων του υλικού που δέχονται τη μέγιστη φόρτιση χωρίς την μετέπειτα εφαρμογή θέρμανσης, παρέχονται εξαιρετικές ιδιότητες απόσβεσης σε ένα ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα.

- συσκευές απόσβεσης των οποίων τα στοιχεία απόσβεσης της μαρτενσιτικής φάσης μετασχηματισμού είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν κοντά στο εύρος των μαρτενσιτικών θερμοκρασιών μετάβασης για να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση σε απορρόφηση των κραδασμών τη πηγής. Τα παραπάνω στοιχεία απόσβεσης προσφέρουν ιδανικές ιδιότητες για χαμηλής έντασης και υψηλής συχνότητας δονήσεις, μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας [10]. Μια εφαρμογή των παραπάνω συσκευών θα μπορούσε να είναι η κατασκευή υλικών σκι, για την απόσβεση των κραδασμών όταν τα πέδιλα βρίσκονται σε επαφή με το χιόνι [7].
- υπερ-ελαστικές συσκευές απόσβεσης αξιοποιούν το φαινόμενο υστέρησης που παρατηρείται στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για να πετύχουν ιδιότητες όμοιες με αυτές που έχει ένα κομμάτι λάστιχο. Τα υπερ-ελαστικά υλικά είναι προτεταμένα για να πετύχουν την κορυφή της παραπάνω γραφικής παράστασης και οι όποιες επιπρόσθετες φορτίσεις αφομοιώνονται εύκολα μεταβάλλοντας το εφαρμοζόμενο φορτίο. Η ιδιότητα αυτή βελτιστοποιεί ένα συνδυασμό ικανότητας απόσβεσης, ευελιξία ανάκτησης σχήματος και εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας [10]. Σε αντίθεση με τα μαρτενσιτικά στοιχεία απόσβεσης, οι υπερ-ελαστικές συσκευές ανακτούν το αρχικό το αρχικό τους σχήμα όταν απομακρύνεται το φορτίο δόνησής τους. Οι συσκευές αυτές τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής στην απόσβεση δονήσεων από φυσικά φαινόμενα (πχ ανεμοθύελλες, σεισμοί κλπ) τα οποία παραμορφώνουν τα στοιχεία τους και, όταν η έντασή τους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

μειώνεται, ανακτούν το αρχικό σχήμα τους απορροφώντας τους καταστροφικούς σε διαφορετική περίπτωση κραδασμούς [11].

#### **2.5.5. ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ - ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ**

Η διάβρωση-σπηλαίωση είναι ένα φαινόμενο που πλήττει εξοπλισμούς και μηχανήματα σε πολλούς κλάδους της βιομηχανίας. Μικρές φυσαλίδες εκρήγνυνται με δυσμενείς επιπτώσεις, προκαλώντας ρήγματα και διάβρωση σε μεταλλικές επιφάνειες με αποτέλεσμα τη μείωση διάρκειας ζωής τους και το οικονομικό κόστος.

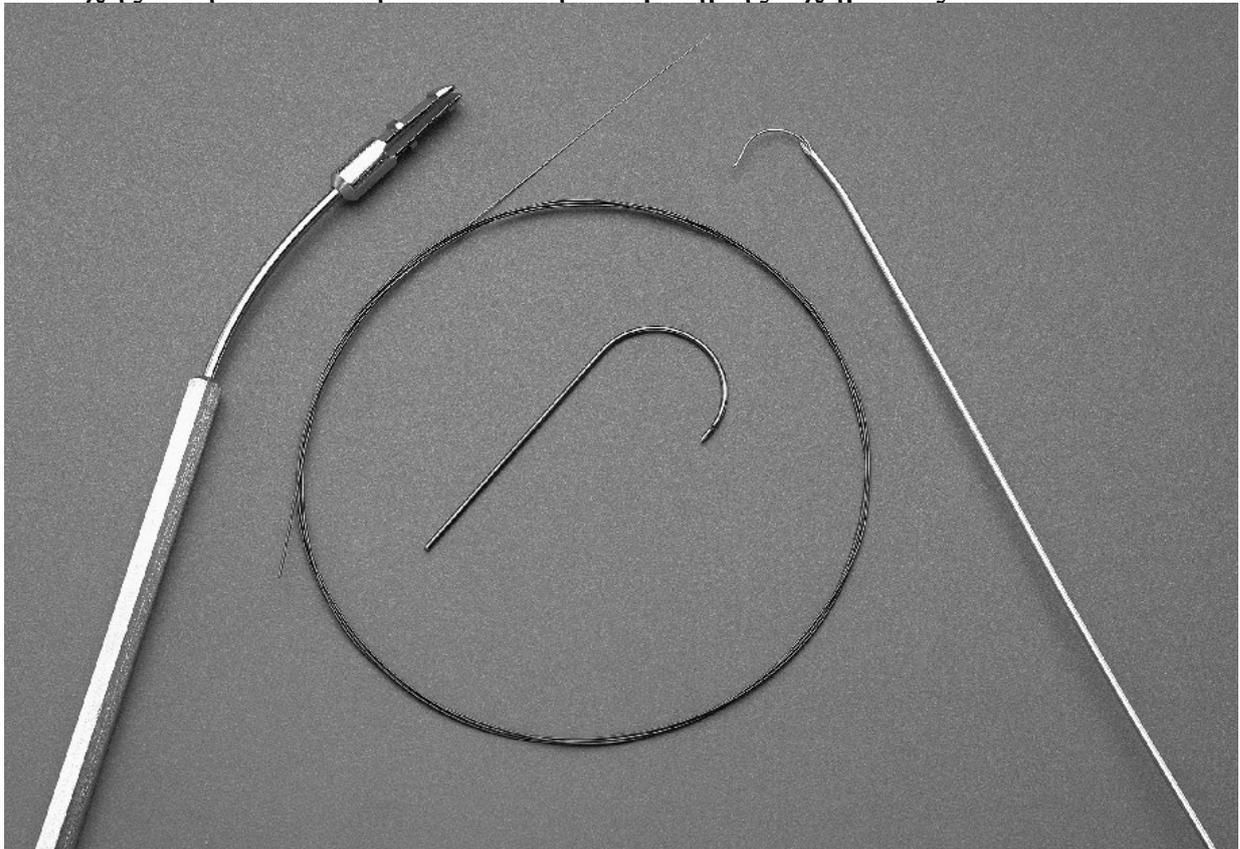
Και οι δύο φάσεις μετασχηματισμού των κραμάτων μνήμης σχήματος, μαρτενιτική και ωστενιτική, παρουσιάζουν αξιοσημείωτη αντίσταση στο φαινόμενο διάβρωσης-σπηλαίωσης, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα αστοχίας υλικού όταν εκτίθενται σε δυνητική σπηλαίωση. Μελέτες που έχουν γίνει για τη διερεύνηση της απόδοσης του κράματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti σε ανοξειδωτους χάλυβες, έχουν δείξει ότι και οι δύο φάσεις μετασχηματισμού τους έχουν σημαντικές δυνατότητες για την κάλυψη και προστασίας εξοπλισμού που έχει υποστεί φθορά από σπηλαίωση-διάβρωση. Η επένδυση νικελίου-τιτανίου Ni-Ti μπορεί να εφαρμοσθεί σε μηχανήματα, υδραυλικά, συμπιεστές μεγάλων υδροηλεκτρικών γεννητριών και προπέλες πλοίων [12].

#### **2.5.6. ΧΑΜΗΛΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Τα χαρακτηριστικά της μαρτενιτικής φάσης μετασχηματισμού των κραμάτων μνήμης σχήματος είναι μαλακά και εύκαμπτα σε αντίθεση με τον άκαμπτο και ελαστικό χαρακτήρα της ωστενιτικής φάσης μετασχηματισμού. Η ευαισθησία αυτή της μαρτενιτικής φάσης και το χαμηλό, μη γραμμικό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές που απαιτούν παραμορφωσιμότητα και άριστα χαρακτηριστικά κόπωσης. Αυτή η ιδιότητα αξιοποιείται μεμονωμένα ή σε συνδυασμό με κάποια ακόμη ιδιότητα της μνήμης σχήματος σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή στην κόπωση.

Ένα κλασσικό παράδειγμα εφαρμογής που αξιοποιεί το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας είναι το ιατρικό εργαλείο της Εικόνας 2.6, το

οποίο σχεδιάστηκε από την St.Jude Medical, Inc. και χρησιμοποιείται από τους χειρουργούς κατά τη διάρκεια επεμβάσεων ανοιχτής καρδιάς για τον ακριβή προσανατολισμό συσκευής συγκράτησης ιστού. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, απαιτούνται προσαρμογές στη γεωμετρία του εργαλείου για να προσαρμοστεί πλήρως στις ιδιαιτερότητες του κάθε ασθενούς, οι οποίες επιτυγχάνονται με την κάμψη του (ευρισκόμενο στη μαρτενσιτική φάση λειτουργίας) εργαλείου σε κατάλληλη γωνία. Μετά την ολοκλήρωση της επέμβασης, το εργαλείο αποστειρώνεται σε αυτόκλειστο χώρο όπου εκτίθεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και μεταβαίνει στην ωστενιτική φάση λειτουργίας του ανακτώντας το απομνημονευμένο, αρχικό του σχήμα. Χάρη στην ικανότητα του υλικού να επανακάμπτει επανειλημμένα από μεγάλες φορτίσεις, τα εργαλεία αυτά είναι εμπορεύσιμα για το συνδυασμό αντοχής στην κόπωση και ιδιοτήτων μνήμης σχήματος.



Εικόνα 2.6 : Ιατρικό εργαλείο συγκράτησης ιστού, κατασκευασμένο από την St.Jude Medical, Inc. Διακρίνονται η ευέλικτη μαρτενσιτική λαβή Ni-Ti, υπερ-ελαστικό σύρμα-οδηγός, σχηματισμένο συστατικό σωλήνα Ni-Ti, το ίδιο σύρμα οδηγός εντός μικρής διαμέτρου σωλήνα.

### **3. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA) [13]**

---

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα τελευταία χρόνια το κομμάτι εκείνο των έξυπνων υλικών όπως τα κράματα μνήμης σχήματος και ειδικά αυτά που βασίζονται στο νικέλιο-τιτάνιο (Ni-Ti) χρησιμοποιούνται συνήθως στον ιατρικό κλάδο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι ιατρικές εφαρμογές περιλαμβάνουν σκελετούς γυαλιών, χειρουργικά εμφυτεύματα stent, ορθοδοντικά καλώδια. Η βιομηχανική εφαρμογή περιλαμβάνει συσκευές σύνδεσης και ζεύξης, ενεργοποιητές αεροδιαστημικής, μικρο-ηλεκτρο-μηχανικά συστήματα (MEMS), κεραίες συσκευών κινητής τηλεφωνίας [14].

Οι ιδιότητες που έχουν φέρει τα κράματα τέτοιων τύπων στη θέση που βρίσκονται σήμερα είναι η ικανότητα επαναφοράς από υψηλές φορτίσεις και οι δυνάμεις επαναφοράς που ασκούν στον εαυτό τους [15-17], η άμεση απόκριση ενεργοποίησής τους, το φαινόμενο μνήμης σχήματος, η ψευδο-ελαστικότητα, η υψηλή αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση, η μεγάλη ολκιμότητα και η αντοχή στην κόπωση [18-19]. Τα κράματα Ni-Ti μπορούν να ανακάμπτουν ελαστικά από παραμορφώσεις έως και 8% των αρχικών τους διαστάσεων.

Πέρα από τα SMA νικελίου-τιτανίου Ni-Ti, τα κράματα μνήμης σχήματος με βάση τον χαλκό Cu και τον σίδηρο Fe έχουν επίσης μεγάλη αποδοχή από τη βιομηχανία [19-20]. Η εφαρμογή των κραμάτων αυτών στους τομείς της σύγχρονης επιστήμης απαιτεί την εκμετάλλευση συγκεκριμένων κάθε φορά ιδιοτήτων από τις παραπάνω. Το μέσο για την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας τους είναι η κατεργασία τους με τρόπο που να αναδεικνύει τα χαρακτηριστικά του κράματος σε κάθε περίπτωση.

#### **3.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)**

Οι εφαρμογές των κραμάτων μνήμης σχήματος στον ιατρικό και τον βιομηχανικό κλάδο απαιτούν ακριβείς διαστάσεις και ανοχές,

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

βέλτιστες συνθήκες κατεργασίας και χαμηλό κόστος παραγωγής. Ως εκ τούτου, η ζήτηση κατασκευής και κατεργασίας των συσκευών κραμάτων μνήμης σχήματος αυξάνεται ανάλογα, όπως άλλωστε και η απαίτηση ακρίβειας των μηχανών κατεργασίας τους. Η μηχανική κατεργασία των SMA μπορεί να εκτελεστεί είτε με συμβατικές μεθόδους εκμεταλλευόμενοι το μηχανικό έργο που προδίδεται στο αντικείμενο κατεργασίας από τις μηχανές κοπής, αφαίρεσης και διαμόρφωσης υλικού (τόρνος, φρέζα) είτε με προηγμένες μεθόδους. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες [21-23] για να καταγραφούν τα χαρακτηριστικά των μεθόδων συμβατικών κατεργασιών των SMAs και το κοινό συμπέρασμα ήταν ότι οι ειδικές ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος οδηγούν σε δυσκολίες στη μηχανική τους κατεργασία, λόγω της σκλήρυνσης των στελεχών του κράματος, και την προσκόλληση θραυσμάτων υλικού στην επιφάνεια του εργαλείου κατεργασίας. Επιπλέον, ο μεγάλος χρόνος κατεργασίας, η υψηλή φθορά του εργαλείου κοπής, η σκλήρυνση και η χαμηλή ποιότητα φινιρίσματος της επιφάνειας κατεργασίας είναι μερικές ακόμη αιτίες που περιορίζουν ακόμη περισσότερο τη χρήση των συμβατικών μεθόδων κατεργασίας των SMAs.

Τις τελευταίες δεκαετίες τα κράματα μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται ευρέως στον βιομηχανικό τομέα. Οι κλάδοι της ηλεκτρονικής, της ιατρικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής απαιτούν συσκευές μικρών διαστάσεων, υψηλής ακρίβειας και χαμηλού κόστους [24]. Η συμβατική κατεργασία των SMAs, όμως, έρχεται σε αντίθεση με την απαίτηση αυτή καθώς συνδέεται με αντιξοότητες όπως υψηλή θερμοκρασία κατεργασίας που έχει αποτέλεσμα μέσης στάθμης ακρίβεια και σχετικά υψηλό κόστος κατεργασίας. Με βάση τα παραπάνω, η συμβατική κατεργασία των SMAs αποτελεί μια τεχνική που ακόμη βελτιώνεται, για την κατασκευή μικροσυσκευών με ικανοποιητική ακρίβεια. Αποτελεί μια πρόκληση για τη σύγχρονη επιστήμη αφού καταπιάνεται με την ανίχνευση των δυνατοτήτων κατεργασίας κραμάτων SMAs και το επόμενο διάστημα θα επικεντρωθεί στα κράματα Ni-Ti, τα οποία αποτελούν τον κύριο όγκο εφαρμογών των SMAs και παράλληλα ένα ενδιαφέρον πεδίο για περαιτέρω μελέτη και πειραματισμούς.

Με τις υφιστάμενες συνθήκες οι μη συμβατικές κατεργασίες θεωρούνται περισσότερο εφαρμόσιμες για την επεξεργασία κραμάτων μνήμης σχήματος SMAs.

### **3.3 ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)**

Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες κατεργασίας των κραμάτων μνήμης σχήματος SMAs, κάποιες μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας έχουν επιστρατευθεί, όπως κατεργασία με laser, ηλεκτροδιάβρωση (electro discharge machining - EDM), ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (WIRE-EDM), υβριδική κατεργασία κλπ. Ωστόσο, και οι μη συμβατικές κατεργασίες έχουν περιορισμούς στην εφαρμογή τους [21,25,26]

Η κατεργασία με laser και η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατεργασία των SMAs. Η κατεργασία με laser εφαρμόζεται κυρίως σε λιγότερο θερμικά και ηλεκτρικά αγωγικά υλικά. Παρ' όλα αυτά κατά την κοπή με laser η επιφάνεια κατεργασίας του υλικού και οι γειτονικές σε αυτήν ζώνες πρέπει να υποστούν περαιτέρω αφαίρεση υλικού [27].

Τα περισσότερο αγωγικά σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, οποιασδήποτε σκληρότητας κράματα SMA μπορούν να κατεργαστούν εύκολα και αποτελεσματικά με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM). Η μέθοδος EDM είναι εναλλακτική μέθοδος αυτής με laser, όταν πρόκειται να κατεργαστούμε υλικά με περίπλοκο σχήμα [28].

Η μέθοδος κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (WIRE-EDM) είναι ηλεκτρο-θερμική διαδικασία και έχει το πλεονέκτημα να κατεργάζεται με ακρίβεια απλές και σύνθετες δομές. Μικρο-εξαρτήματα με υψηλό βαθμό ακρίβειας, χαμηλές παραμένουσες τάσεις και ποιοτικό φινίρισμα επιφάνειας μπορούν να διαμορφωθούν με τη μέθοδο αυτή [29]. Στη τελική φάση της κατεργασίας, η ενέργεια που παράγεται ανά παλμό του εργαλείου φθίνει, προκαλώντας φθίνουσα μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού λόγω των χαμηλών παραμενουσών τάσεων, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτόν υψηλού επιπέδου φινίρισμα.

### 3.3.1. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ LASER

Μελέτη της κατεργασίας SMA με femtosecond laser [30] περιέγραψε τη μέθοδο και την τεχνική για την κατασκευή κατεργασμένων τεμαχίων υψηλής ακρίβειας. Η κατεργασία femtosecond laser είναι ουσιαστικά ένας θερμικός μηχανισμός που προκαλεί υψηλό ποσοστό εισχώρησης στο υλικό και σημαντική αναδιοργάνωση των στελεχών του. Οι χαμηλότερες δέσμες laser εξασφαλίζουν υψηλή ποιότητα κοπής και χαμηλό κόστος. Η υψηλή ποιότητα κοπής, χωρίς σημαντική ανακατανομή των στρωμάτων του υλικού και η ακρίβεια κοπής, επίσης επιτυγχάνονται με τη χρήση laser υψηλής συχνότητας.

Επιπλέον μελέτες ενός ενεργοποιητή για ιατρικές εφαρμογές, χρησιμοποιώντας κατεργασία SMA με laser [31,32] κατέγραψαν τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των SMA. Παράλληλα, όμως, τέθηκε σε αμφισβήτηση μια χαρακτηριστική ιδιότητα των κραμάτων μνήμης σχήματος, αυτή της υψηλής υστέρησης. Τέλος, η γεωμετρία και οι διαστάσεις των κατεργαζόμενων υλικών καθώς και το αν βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων, καθορίζονται από τις ανοχές της κατεργασίας με laser και της ηλεκτροστύλβωσης.

### 3.3.2. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΣΤΥΛΒΩΣΗ SMA

Η μελέτη της ηλεκτροχημικής στύλβωσης [33] με παραμέτρους όπως η σύνθεση ηλεκτρολύτη, η εφαρμογή ρεύματος, ο χρόνος κατεργασίας και το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων, έδωσε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την κατεργαζόμενη επιφάνεια:

- ο ουδέτερος ηλεκτρολύτης αφαιρεί το υλικό με γρηγορότερο ρυθμό, παράλληλα, όμως, προκάλεσε σημαντικό αριθμό οπών μικρο-διαστάσεων στην επιφάνεια κατεργασίας, σε σχέση με τον όξινο ηλεκτρολύτη
- ο όξινος ηλεκτρολύτης έχει μικρότερο ρυθμό αφαίρεσης υλικού και μικρότερο αριθμό μικρο-οπών στην κατεργαζόμενη επιφάνεια
- μικρότερη επιφανειακή τραχύτητα της επιφάνειας επιτυγχάνεται με την εφαρμογή υψηλότερου ρεύματος και μικρότερου διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων

- το υψηλό ρεύμα προκαλεί χαμηλή ποιότητα κατεργαζόμενης επιφανείας
- ο συντελεστής απόδοσης επιδρά στην ηλεκτροχημική αντίδραση.

Δεδομένα προσομοίωσης και πειραμάτων της ηλεκτροχημικής κατεργασίας κραμάτων Ni-Ti αναλύθηκαν εκ νέου [34] και διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους, λόγω των διαφορετικών πηγών ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, καθώς ο συντελεστής αποβολής του υλικού αυξάνεται με τη στιγμιαία πυκνότητα και τον συντελεστή απόδοσης.

### 3.3.3. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΥΔΑΤΟΣ

Η μελέτη της κατεργασίας SMA κράματος μνήμης σχήματος Ni-Ti από τους Kong M C, Axinte D, Voie W [25], εστιάζει σε δύο ειδών κατεργασίες, την απλή κατεργασία με δέσμη ύδατος (plain water jet machining PWJ) και την κατεργασία δέσμης ύδατος με λειαντικά στοιχεία (abrasive water jet machining AWJ) κατεργασία με έγχυση νερού. Τα συμπεράσματα δείχνουν ότι :

- η AWJ κατεργασία διαθέτει μεγαλύτερο έλεγχο βάθους στη διαδικασία φρεζαρίσματος (milling operation) σε σχέση με την PWJ κατεργασία του κράματος Ni-Ti
- επίσης, η AWJ έχει μεγαλύτερη θερμική ισχύ, εξ' αιτίας των επιπτώσεων της ταχύτητας των λειαντικών σωματιδίων της PWJ
- η ευρύτερη περιοχή σύγκρουσης του τεμαχίου με λειαντικά σωματίδια υψηλής ταχύτητας μπορεί να υπερβεί τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του κράματος Ni-Ti, γεγονός που θα προκαλούσε την τήξη του υλικού. Αυτό συνεπάγεται αλλαγή της φάσης του κράματος από μαρτενσίτη σε ωστενίτη
- πιθανές ρωγμές και μετάδοσή τους στο υλικό ξεκινούν ευκολότερα στα κράματα τύπου Ni-Ti<sub>2</sub> που περιέχουν δύο μέρη Ti προς ένα μέρος Ni από ότι στα Ni-Ti με ίση περίπου αναλογία.

Το γενικότερο συμπέρασμα είναι ότι η AWJ αποτελεί μια αποτελεσματική και αποδοτική μέθοδο κατεργασίας του SMA

κράματος Ni-Ti, λαμβάνοντας υπ' όψιν την πολυπλοκότητα δομής και μετασχηματισμού φάσης του.

Τα αποτελέσματα μιας ακόμη πειραματικής μελέτης για τη μηχανική κατεργασία φύλλων κράματος μνήμης σχήματος Ni-Ti [35] συγκρίθηκαν με αυτά των κατεργασιών WJM και μικρο-φρεζαρίσματος (micro-milling). Η WJM υπερτερεί στον χρόνο κοπής (μικρός χρόνος), τη θερμική επίδραση της κατεργασίας στο υλικό (δεν φορτίζεται σε μεγάλο βαθμό θερμικά το υλικό κατά την κατεργασία και έτσι αποφεύγονται οι ανεπιθύμητες παραμορφώσεις) και το κόστος κοπής (χαμηλό), σε σύγκριση με το μικρο-φρεζάρισμα. Στον αντίποδα, η τραχύτητα παραμένει και απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για την αφαίρεση ανωμαλιών από την επιφάνεια.

### **3.3.4. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (Electrical discharge machining EDM)**

Κατά τη μέθοδο ηλεκτροδιάβρωσης, σπινθήρες ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιούνται για να τήξουν και να εξατμίσουν το προς αποβολή υλικό. Το διηλεκτρικό ρευστό έχει το ρόλο του μέσου μεταξύ του ηλεκτροδίου και του τεμαχίου. Με τη μέθοδο EDM έχουμε τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε με μεγάλη ακρίβεια σχήματα υψηλής πολυπλοκότητας και σύνθεσης.

#### **3.3.4.1 ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MATERIAL REMOVAL RATE MRR) ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (EDM)**

Ο ρυθμός αποβολής του κατεργαζόμενου υλικού (material removal rate MRR) αποτελεί έναν από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα κατεργασίας των υλικών. Τα αποτελέσματα της έρευνας της EDM κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης ενός κράματος μνήμης σχήματος νικελίου-αργιλίου-σιδήρου Ni-Al-Fe [36] αξιολογήθηκαν σε συνάρτηση του ρυθμού αποβολής υλικού MRR, του λόγου φθοράς του ηλεκτροδίου (electrode wear ratio EWR), της τραχύτητας και της διατομής της επιφανειακής τοπογραφίας της επιφάνειας κατεργασίας. Τα συμπεράσματα ήταν:

- ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR του τριαδικού κράματος SMA Ni-Al-Fe είναι στενά εξαρτώμενος από την ενέργεια εκκένωσης

και αυξάνεται με την αύξηση της έντασης του ρεύματος εκκένωσης

- ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR γενικά εξαρτάται από θερμοκρασία τήξης και τη θερμική αγωγιμότητα του κράματος SMA. Υψηλότερη θερμοκρασία τήξης οδηγεί σε μικρότερο MRR
- υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα του κράματος προκαλεί μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς ενέργειας στην περιβάλλουσα επιφάνεια της κατεργασίας, οδηγώντας σε μείωση του ρυθμού αποβολής υλικού MRR
- υψηλή μέγιστη ένταση του ρεύματος εκκένωσης και συνεπώς πυκνότητα ρεύματος, προκαλεί μεγαλύτερο ρυθμό τήξης και εξάτμισης υλικού, άρα και αύξηση ρυθμού αποβολής υλικού MRR
- ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR επηρεάζεται ακόμη από τον αριθμό των παλμών του ηλεκτροδίου ανά ώρα. Αύξησή τους προκαλεί μεγαλύτερο ρυθμό τήξης και εξάτμισης υλικού, λόγω της συσσωρευμένης ενέργειας εκκένωσης που φέρει, αυξάνοντας τελικά το ρυθμό αποβολής υλικού MRR [37]
- ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR αυξάνεται όταν διατίθεται περιστροφικό ηλεκτρόδιο αντί στάσιμου, αφού η αφαίρεση των αποβλίπτων του υλικού είναι μεγαλύτερη και πιο αποτελεσματική, βοηθούμενη από τη φυγόκεντρο δύναμη του περιστρεφόμενου ηλεκτροδίου [38]
- η πολικότητα του ηλεκτροδίου καθορίζει σημαντικά τον MRR. Η θετική πολικότητα συνδυάζεται με μεγαλύτερο MRR, λόγω της αυξημένης μεταφοράς ενέργειας. Το τίμημα που πληρώνουμε είναι η αύξηση του λόγου φθοράς του ηλεκτροδίου (electrode wear ratio EWR), ο οποίος συνήθως έχει όμοια συμπεριφορά με τον MRR [38]
- η συγκέντρωση του διηλεκτρικού ρευστού και των προσθέτων παίζουν ρόλο στο ρυθμό μετάδοσης ενέργειας από το ηλεκτρόδιο στο κατεργαζόμενο τεμάχιο και την περιβάλλουσα επιφάνεια και συνεπώς επηρεάζουν τον MRR και τον EWR [39,40]

#### **3.3.4.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ SMA ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ EDM**

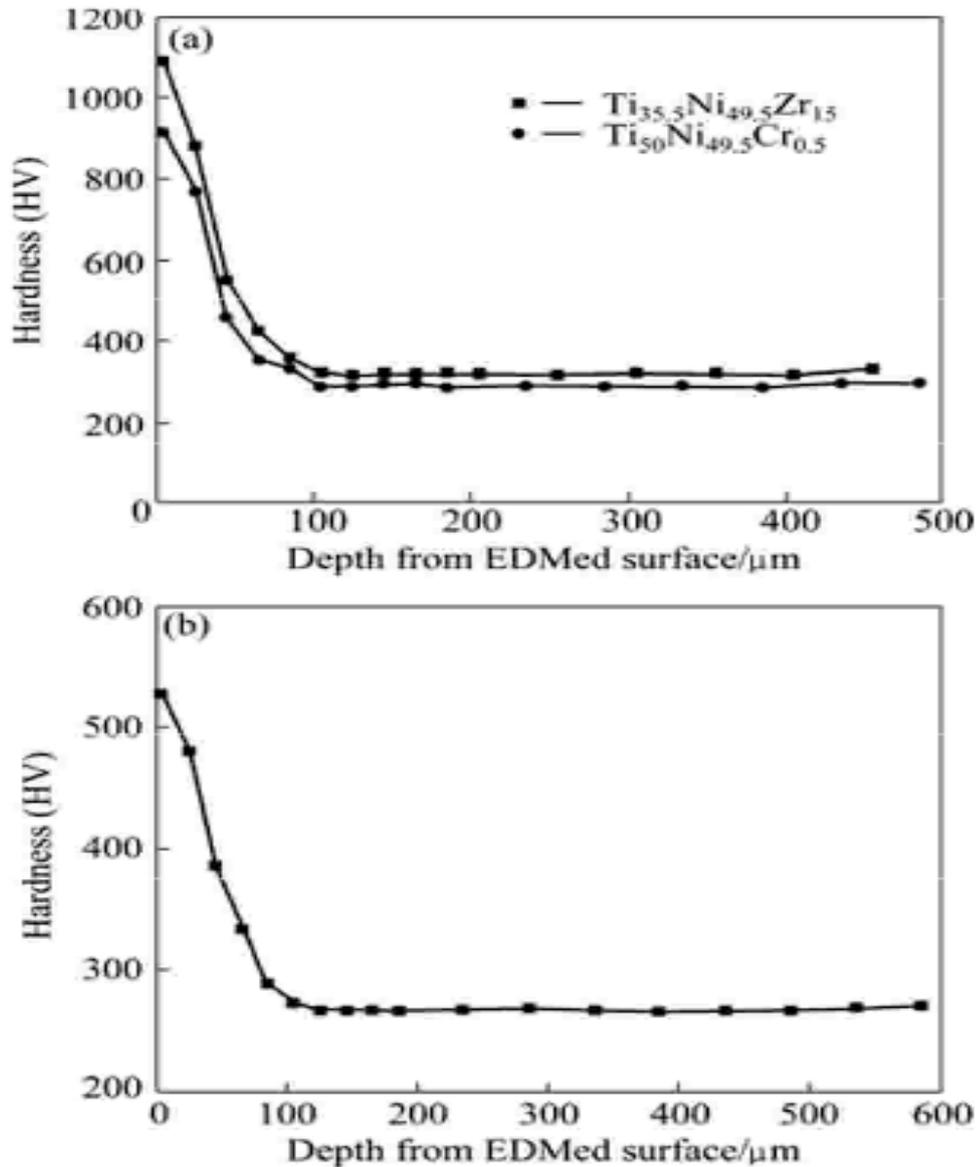
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

Η τραχύτητα της επιφάνειας κατεργασίας αυξάνεται ανάλογα με το μέγιστο της έντασης του ρεύματος και των παλμών ανά ώρα. Το αυξημένο μέγιστο της έντασης ρεύματος παράγει ενέργεια σπινθήρων εκκένωσης που χτυπούν κρουστικά την επιφάνεια και οδηγούν σε υψηλότερα επίπεδα διάβρωσης του υλικού και μεγαλύτερη τραχύτητά του.

Κράματα με χαμηλό σημείο τήξεως και θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζουν υψηλότερη τραχύτητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας [36]. Επίσης, ο υψηλός αριθμός παλμών ανά ώρα παράγει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας εκκένωσης για την τήξη και της εξάτμιση του κατεργαζόμενου κράματος δημιουργώντας μεγαλύτερους κρατήρες και, συνεπώς, μεγαλύτερη τραχύτητα επιφανείας.

Όπως συμβαίνει σε κάθε είδους κατεργασία, οι καλές συνθήκες κοπής βελτιώνουν την ποιότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου προκαλώντας, όμως, μεταβολές στα στρώματα κάτω από την κατεργαζόμενη επιφάνεια, λόγω της μεγάλης παραγωγής θερμότητας [38]. Η επιφάνεια κατεργασίας αποτελείται από στρώματα που μπορούν να αναταξινομηθούν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, οξειδία, μολυσματικούς παράγοντες από το εργαλείο κοπής και τη ζώνη που επηρεάζεται από τη ροή θερμότητας και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σκληρότητας στην επιφάνεια του κράματος. Η αύξηση της σκληρότητας της εξωτερικής επιφάνειας προκύπτει από τη σημαντική σκλήρυνση των ανωτέρων στρωμάτων του υλικού και την κόπωσή του. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται το διάγραμμα της σκληρότητας διαφόρων κραμάτων μνήμης σχήματος SMAs (TiNiZr, TiNiCr [38] και NiAlFe [36]) σε συνάρτηση με το βάθος από της επιφάνεια κατεργασίας, τα οποία κατεργάζονται με τη μέθοδο EDM. Φαίνεται ότι η σκληρότητα του κράματος σε βάθη κοντινά στην επιφάνεια κατεργασίας μπορεί να πάρει πολύ υψηλές τιμές [41]. Η σκληρότητα παραμένει περίπου ίδια σε βάθη μεγαλύτερα των 100μm.



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα σκληρότητας επιφανείας κράματος SMA σε κατεργασία EDM, σε συνάρτηση με το βάθος από την κατεργαζόμενη επιφάνεια (a) για κράματα Ti-Ni-Zr, Ti-Ni-Cr [38] και (b) για κράμα Ni-Al-Fe [36]

### 3.3.5. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΡΜΑΤΟΣ (Wire electrical discharge machining WEDM)

#### 3.3.5.1 ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MATERIAL REMOVAL RATE MRR) ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΡΜΑΤΟΣ (WEDM)

*Η Wire electrical discharge machining (WEDM) είναι ένας τύπος της ήδη γνωστής EDM στην οποία το υλικό έχει διαβρωθεί από την επιφάνεια, χρησιμοποιώντας τον αριθμό των*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

*σπινθήρων που παράγεται από το σύρμα. Τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας και η ικανότητα ανάκτησης του σχήματος των SMA κραμάτων τύπου τιτανίου-νικελίου-ζirkονίου Ti-Ni-Zr και τιτανίου-νικελίου-χρωμίου Ti-Ni-Cr μελετήθηκαν από τους HSIEH S F *etal* [42] όπου η διάβρωση του κράματος γίνεται με σειρά διακριτών σπινθήρων. Ο ρυθμός τροφοδοσίας του καλωδίου που παράγει τους σπινθήρες αυξάνεται με την αύξηση των παλμών ανά ώρα. Η ενέργεια εκκένωσης που προσδίδεται στο κράμα SMA αυξάνεται με την αύξηση των παλμών ανά ώρα, προκαλώντας αύξηση του ρυθμού αποβολής υλικού MRR. Και στην κατεργασία WEDM, ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR σχετίζεται με τη θερμοκρασία τήξεως και τη θερμική αγωγιμότητα του κράματος. Ωστόσο, δεν εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες και την κρυσταλλική δομή των υλικών. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών κατεργασίας των τριμερών κραμάτων SMA.*

### **3.3.5.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ SMA ΣΕ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ WEDM**

Τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει σχετικά με την τραχύτητα κατά την κατεργασία WEDM είναι:

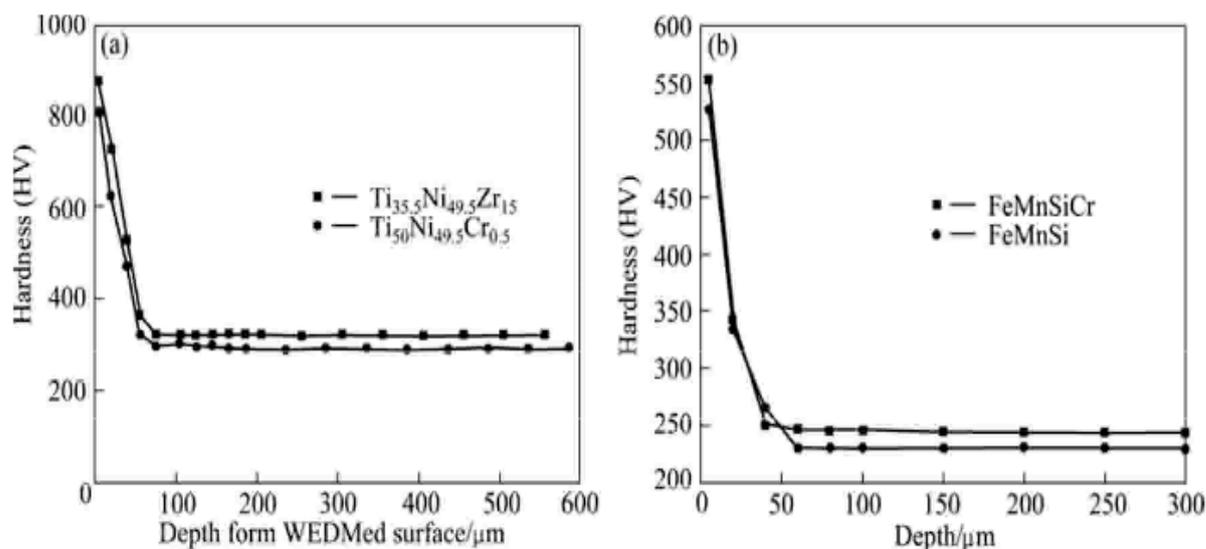
- η τραχύτητα της επιφάνειας κατεργασίας αυξάνει με την αύξηση της διάρκειας παλμών
- συνδέεται και με τον αριθμό των κρατήρων που εμφανίζονται στην επιφάνεια από τους σπινθήρες εκκένωσης [43]
- αυξάνεται με την αύξηση των παλμών ανά ώρα και της μέγιστης τιμής της έντασης του ρεύματος εκκένωσης
- περισσότεροι παλμοί ανά ώρα δημιουργούν περισσότερους και βαθύτερους κρατήρες, αυξάνοντας την τραχύτητα της επιφάνειας
- η τραχύτητα εξαρτάται ακόμη από τη θερμοκρασία τήξεως και τη θερμική αγωγιμότητα του κράματος. Χαμηλό σημείο τήξεως και θερμική αγωγιμότητα προκαλούν μεγαλύτερη τραχύτητα [43]

- οι εκτεταμένοι παλμοί ανά ώρα παράγουν μεγαλύτερη ενέργεια εκκένωσης προς τήξη και εξάτμιση του κράματος, διεισδύοντας βαθύτερα στο υλικό και προκαλώντας βαθύτερους κρατήρες.

Πέρα από τους κρατήρες, οι ρωγμές σχηματίζονται στις ζώνες τήξης του υλικού και δημιουργούνται νέες μεταξύ των κρατήρων και των ψυχρότερων στρωμάτων του υλικού [44-45].

Η ποιότητα της κατεργαζόμενης επιφάνειας, τέλος, εξαρτάται από το υλικό του σύρματος, το διηλεκτρικό ρευστό, την εφαρμοζόμενη πίεση στην επιφάνεια κατεργασίας και το ρυθμό μεταφοράς αποβλήτων από την περιοχή κατεργασίας.

Οι παραμένουσες τάσεις και η πυκνότητα των ρωγμών προκύπτουν από την πλαστική παραμόρφωση ή τη φάση μετασχηματισμού του τεμαχίου, ενώ το βάθος διείσδυσής τους είναι μικρό. Η σκληρότητα των παραμορφωμένων στρωμάτων του υλικού είναι αυξημένη σε σχέση με τη σκληρότητά του υλικού πριν την κατεργασία. Οι αλλαγές στην επιφάνεια κατεργασίας καθορίζονται κυρίως από τη θερμοκρασία κατεργασίας και το ρυθμό ψύξης της επιφάνειας κατεργασίας. Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται το διάγραμμα της σκληρότητας διαφόρων κραμάτων μνήμης σχήματος SMAs (TiNiZr, TiNiCr [42], FeMnSiCr και FeMnSi [45]) σε συνάρτηση με το βάθος της επιφάνειας μέτρησης από της επιφάνεια κατεργασίας, τα οποία κατεργάζονται με τη μέθοδο WEDM. Φαίνεται ότι η σκληρότητα του κράματος σε βάθη κοντινά στην επιφάνεια κατεργασίας είναι υψηλότερη από αυτή των μεγαλύτερων βαθών. Η σκληρότητα παραμένει περίπου ίδια σε βάθη μεγαλύτερα των 50-60μm.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα σκληρότητας επιφανείας κράματος SMA σε κατεργασία WEDM, σε συνάρτηση με το βάθος από την κατεργαζόμενη επιφάνεια (a) για κράματα Ti-Ni-Zr, Ti-Ni-Cr [42] και (b) για κράμα Fe-Mn-Si-Cr και Fe-Mn-Si [45].

### 3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ EDM ΚΑΙ W-EDM

Αξιοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα που διατίθενται μέχρι σήμερα, πρέπει να τονιστεί ότι η καταγραφή της συμπεριφοράς των κραμάτων μνήμης σχήματος κατά τη διάρκεια των διαφόρων μεθόδων κατεργασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους των μεθόδων αυτών, όπως πχ το ηλεκτρικό ρεύμα που εφαρμόζεται (ένταση, μέγιστη τιμή), το ηλεκτρόδιο (υλικό, αγωγιμότητα, πολικότητα), το διηλεκτρικό υλικό, ο ρυθμός μετάδοσης ενέργειας στο ηλεκτρόδιο. Προσπαθώντας να διατηρήσουμε τιμές αναφοράς στις παραμέτρους, ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις ιδιότητες των κραμάτων, ανάλογα με τη σύστασή τους, έχουμε ως αποτέλεσμα τον πίνακα της Εικόνας 3.3, όπου φαίνονται τα ποσοστά ανάκτησης σχήματος διαφόρων κραμάτων SMA, μετά από ποικίλες ποσοστιαίες παραμορφώσεις που αναγράφονται στην κεφαλίδα κάθε στήλης.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι τα κατεργαζόμενα με EDM ή WEDM κράματα SMA νικελίου-τιτανίου Ni-Ti (θεωρώντας πάχος 0,6mm) παρουσιάζουν τέλεια ανάκτηση σχήματος σε κάμψεις 3% και 5% και ελαφρά μειωμένη σε κάμψη 8%. [38]

Τα κράματα SMA με βάση τον χαλκό Cu (θεωρώντας πάχος 1mm) κατεργαζόμενα με EDM ή WEDM, παρουσιάζουν λίγο χειρότερη συμπεριφορά από αυτά του Ni-Ti.[41]

Ένα κράμα SMA Ni-Al-Fe παρουσιάζει μειωμένη επαναφορά από κάμψεις 2-5% και δεν επανέρχεται από κάμψη 8%, λόγω της εύθραυστης μήτρας τους. [43]

Η εξήγηση των ερευνητών [45]για τη μειωμένη επαναφορά των κραμάτων από φορτίσεις 8% και άνω είναι ότι επαναπροσδιορίζεται το πάχος των στελεχών του υλικού και σηματοδοτείται η αναδιατύπωση της ελαστικότητας του υλικού. Επίσης, η δημιουργία καρβιδίων και οξειδίων στη ζώνη τήξης του υλικού αντιστέκεται στην πλήρη επαναφορά του κράματος μετά από τόσο υψηλές φορτίσεις.

Alloy	Shape recovery/%		
	$\epsilon=3\%$	$\epsilon=5\%$	$\epsilon=8\%$
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49.5</sub> Cr <sub>0.5</sub> (annealed)	100	100	90
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49.5</sub> Cr <sub>0.5</sub> (EDMed)	100	99	83
Ti <sub>35.5</sub> Ni <sub>49.5</sub> Zr <sub>15</sub> (annealed)	100	100	88
Ti <sub>35.5</sub> Ni <sub>49.5</sub> Zr <sub>15</sub> (EDMed)	100	98	82
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49.5</sub> Cr <sub>0.5</sub> (WEDMed)	100	99	85
Ti <sub>35.5</sub> Ni <sub>49.5</sub> Zr <sub>15</sub> (WEDMed)	100	99	86
Ti <sub>35.5</sub> Ni <sub>48.5</sub> Zr <sub>16</sub> (annealed)	100	97	90
Ti <sub>35.5</sub> Ni <sub>48.5</sub> Zr <sub>16</sub> (EDMed)	96	91	80
Ni <sub>60</sub> Al <sub>48.5</sub> Fe <sub>15.5</sub> (annealed)	42	35	–
Ni <sub>60</sub> Al <sub>48.5</sub> Fe <sub>15.5</sub> (EDMed)	30	25	–

Alloy	Shape recovery/%		
	$\epsilon=3\%$	$\epsilon=6\%$	$\epsilon=12\%$
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> (annealed)	100	100	86
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> (EDMed)	100	98	75
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> (annealed)	100	100	87
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> (EDMed)	100	99	75.5
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>40</sub> Cu <sub>10</sub> (annealed)	100	100	86.5
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>40</sub> Cu <sub>10</sub> (EDMed)	100	98	74

Εικόνα 3.3: Ιδιότητα ανάκτησης σχήματος για διάφορα κράματα SMA, μετά

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

από κατεργασία τους EDM, WEDM, ή ανόπτησή τους [38,41,43,45].

### 3.5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Οι παραπάνω αναφορές δείχνουν ότι οι κατεργασίες EDM και WEDM των κραμάτων SMA έχουν συσχετισθεί άμεσα με παραμέτρους, όπως η διάρκεια των παλμών, το ρεύμα εκκένωσης και η τάση εκκένωσης.

Περιορισμένη έρευνα έχει γίνει για την κατεργασία των κραμάτων Ni-Ti με τη μέθοδο WEDM και τις κατάλληλες παραμέτρους, ώστε να επιτυγχάνονται βέλτιστα αποτελέσματα. Δεν έχει γίνει επαρκής μελέτη για τις θερμοκρασίες κατεργασίας των κραμάτων αυτών και τις παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια κατεργασίας και τις γειτονικές σε αυτήν. Ίσως το βάρος της επερχόμενης έρευνας θα έπρεπε να διοχετευτεί προς αυτή την κατεύθυνση.

Επίσης, ανάλυση των μη ηλεκτρικών παραμέτρων όπως το διηλεκτρικό υλικό, η μορφή του κύματος μετάδοσης ενέργειας, το υλικό του σύρματος στην WEDM κατεργασία και η διάμετρός του.

Τέλος, η κατεργασία υψηλών θερμοκρασιών τριμερών κραμάτων SMA είναι ένα ακόμη πεδίο σχετικά ανεξερεύνητο και υποσχόμενο να δώσει σημαντικά συμπεράσματα στην έρευνα.

## **4. ΜΙΚΡΟ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)**

---

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται εργασίες που αφορούν την παρασκευή προϊόντων σε μικρο-κλίμακα. Παρουσιάζονται διάφορες μικρο-κατεργασίες όπως φρεζάρισμα, κοπή με laser, ηλεκτροδιάβρωση και συγκόλληση και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

### **4.2 ΜΙΚΡΟ-ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ [46]**

#### **4.2.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**

Στην πρώτη εργασία που περιγράφεται αναλυτικά, εξετάζεται η ικανότητα φρεζαρίσματος ενός SMA κράματος με τη χρήση κοπτικής αιχμής εργαλείου καρβιδίου [47]. Τα πρώτα αποτελέσματα ελήφθησαν από την επεξεργασία απλών αυλακιών εφαρμόζοντας εργαλεία επικαλυμμένα με υμένιο τιτανίου-αργιλίου-νικελίου Ti-Al-Ni. Η κατεργασία αξιολογήθηκε με κριτήρια παραμέτρους όπως η φθορά του κοπτικού εργαλείου, οι δυνάμεις κοπής και η ποιότητα κατεργασίας. Η φθορά του εργαλείου και η ποιότητα κατεργασίας του τεμαχίου αναλύεται με μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίων και ομοεστιακό μικροσκόπιο λευκού φωτός. Παρά την χαμηλή ικανότητα κατεργασίας του κράματος Ni-Ti, επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα σχετικά με τη φθορά του εργαλείου κοπής και την ακρίβεια σχήματος των φρεζαρισμένων αυλακιών. Απαραίτητη για αυτόν το σκοπό είναι η εφαρμογή της ελάχιστης δυνατής ποσότητας λιπαντικού, το οποίο μειώνει τις ανωμαλίες τραχύτητας του τεμαχίου σε σχέση με μια ξηρή κατεργασία, αυξάνουν την ποιότητα της κατεργασίας και επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής του υλικού. Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων, διαφορετικές δομές θα μπορούσαν παραχθούν από την κατεργασία μικρο-φρεζαρίσματος.

#### **4.2.2. ΜΙΚΡΟ-ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΚΡΑΜΑΤΟΣ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ Ni-Ti**

Μικροσυσκευές κατασκευασμένες από κράμα μνήμης σχήματος Ni-Ti βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στην ιατρική επιστήμη καθώς και στην κατασκευή μικρο-ενεργοποιητών [47-49]. Οι συσκευές αυτές

κατασκευάζονται συνήθως με κοπή laser [50-51]. Το πλεονέκτημα της μεθόδου laser είναι ότι μπορεί να παράγει συσκευές διαστάσεων μικρότερες από μόλις 100 $\mu\text{m}$  ή λεπτές μεμβράνες Ni-Ti [52-53]. Για την παραγωγή εξαρτημάτων σε μια κλίμακα της τάξης των 100 $\mu\text{m}$  έως μερικά mm από μασίφ κράμα Ni-Ti, η μέθοδος μικρο-φρεζαρίσματος αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για την εφαρμογή της σε ένα τμήμα της παραγωγής ή την παραγωγή μικρών παρτίδων. Ωστόσο, τα κράματα Ni-Ti παρουσιάζουν δυσκολίες στην κατεργασία τους [51,54]. Λόγω της υψηλής ολκιμότητας και του έργου που απαιτείται για την κατεργασία, η ποιότητα κατεργασίας του τεμαχίου είναι συχνά φτωχή και η φθορά του εργαλείου κοπής απαράδεκτα υψηλή. Για τους λόγους αυτούς, μια προσαρμοσμένη στρατηγική κατεργασίας κραμάτων Ni-Ti είναι απαραίτητη [55] και με τον τρόπο αυτό, θα μπορούσαν πολλές διαφορετικές δομές να παραχθούν με τη μέθοδο του μικρο-φρεζαρίσματος, οι οποίες ακόμη δεν έχουν μελετηθεί και αποτελούν πεδίο ανάπτυξης νέων εφαρμογών για τα κράματα Ni-Ti.

#### 4.2.3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ

Η ονομαστική σύνθεση του εξεταζόμενου κράματος μνήμης σχήματος Ni-Ti έχει περιεκτικότητα 50,8% Ni. Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης έχουν προσδιοριστεί με θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης (differential scanning calorimetry DSC) και είναι:

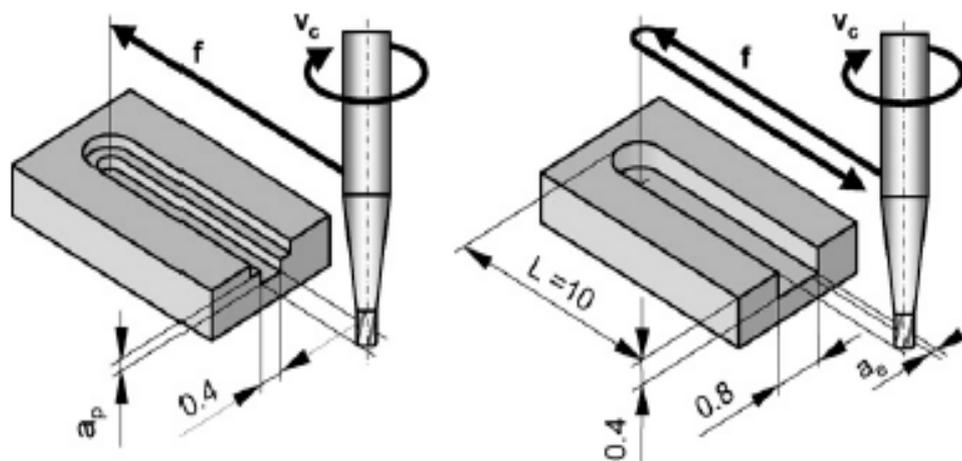
- η θερμοκρασία εκκίνησης (As) της ωστενιτικής φάσης παραμόρφωσης  $A_s = -46 \text{ }^\circ\text{C}$
- η θερμοκρασία λήξης (Af) της ωστενιτικής φάσης παραμόρφωσης  $A_f = 13 \text{ }^\circ\text{C}$
- η θερμοκρασία εκκίνησης (Ms) της μαρτενσιτικής φάσης παραμόρφωσης  $M_s = -37 \text{ }^\circ\text{C}$
- η θερμοκρασία λήξης (Mf) της μαρτενσιτικής φάσης παραμόρφωσης  $M_f = -103 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η επιμήκυνση κατά τη θραύση του υλικού είναι  $\epsilon_f = 18,3\%$  και η αντοχή του σε εφελκυσμό  $R_m = 763 \text{ MPa}$ . Το εύρος των τιμών φόρτισης που προκαλείται στη μαρτενσιτική φάση είναι από 516 έως 557 MPa. Τα δείγματα κράματος Ni-Ti συνδέονται με ένα

πιεζοηλεκτρικό, τριών μερών δυναμόμετρο. Τα εργαλεία κοπής ήταν καρβίδια επικαλυμμένα με λεπτό στρώμα Ti-Al-Ni. Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε CNC εργαλειομηχανή Kern HSPC 2522. Ο εγκατεστημένος υψηλής συχνότητας άξονας διαθέτει εύρος ταχυτήτων 15.000-60.000 rpm. Προκειμένου να διαχωριστεί η κατεργασία μικροφρεζαρίσματος από τις δονήσεις, τα απόβλιττα και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η εργαλειομηχανή τοποθετήθηκε σε κλιματιζόμενο δωμάτιο. Τα πειράματα εκτελέστηκαν τόσο χωρίς ψυκτικό μέσο όσο και με λάδι εστέρα, για ελάχιστη ποσότητα λίπανσης (minimum quantity lubrication MQL).

Η ανάλυση της φθοράς του εργαλείου και της ποιότητας κατεργασίας του τεμαχίου διενεργήθηκε με μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (scanning electron microscopy SEM). Πριν το μικροφρεζάρισμα, η επιφάνεια του τεμαχίου έχει φρεζαριστεί από κοπτικό εργαλείο. Κατόπιν, το τεμάχιο έρχεται σε επαφή με έναν μηχανικό αισθητήρα. Μετά από προθέρμανση της ατράκτου για περισσότερα από 30 λεπτά, το περιστρεφόμενο εργαλείο βαθμονομήθηκε με ένα σύστημα μέτρησης laser.

Η στρατηγική κατεργασίας περιγράφεται στην Εικόνα 4.1. Το εργαλείο κοπής βρίσκεται αρχικά εκτός του τεμαχίου. Αρχικά, ένα αυλάκι φρεζάρεται με την πλήρη διάμετρο του εργαλείου να βρίσκεται σε λειτουργία. Στη συνέχεια η κατεργασμένη σχισμή διανοίγεται με μετωπικό φρεζάρισμα, ενώ η επιλεγμένη στρατηγική κοπής είναι ομόρροπου φρεζαρίσματος. Ο αναγκαίος αριθμός κοπών για την κατεργασία των θυλακίων εξαρτάται από το πλάτος κοπής ( $a_e$ ). Τελικά, τα δύο αυτά στάδια επαναλαμβάνονται έως ότου η κατεργασία των θυλακίων ολοκληρωθεί.



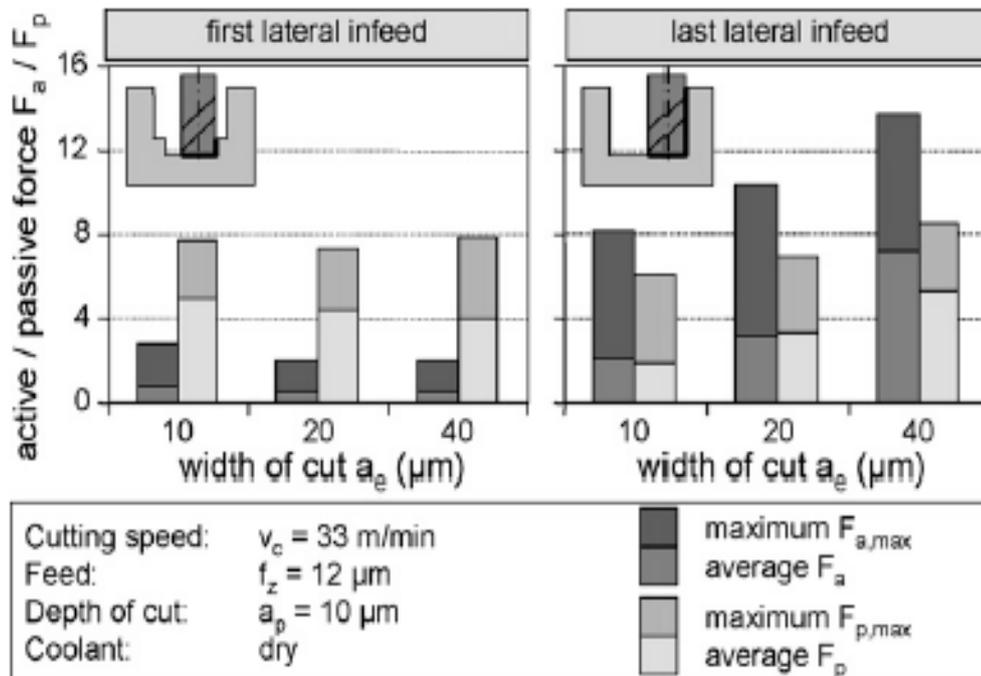
Εικόνα 4.1 : Στρατηγική κατεργασίας για μικρο-φρεζάρισμα κράματος μνήμης σχήματος Ni-Ti [55].

#### 4.2.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟ-ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

Συγκριτικά με την κατεργασία συμβατικών υλικών, το πλάτος και το βάθος κοπής πρέπει να μειώνονται σημαντικά, γιατί υπάρχει σοβαρός κίνδυνος θραύσης του εργαλείου. Πειράματα δείχνουν ότι η κατεργασία με μικρο-φρεζάρισμα είναι πολύ ευαίσθητη στο βάθος κοπής, όταν δεν υπάρχει λίπανση. Μόνο η κοπή έως συγκεκριμένο βάθος  $a_p$  έχει ως αποτέλεσμα ένα τεμάχιο κατεργασίας αποδεκτής ποιότητας. Ένα ακόμη πρόβλημα είναι η εμφάνιση ανωμαλιών στην επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και για την αντιμετώπισή τους, το πλάτος κοπής  $a_e$  πρέπει να κυμαίνεται εντός αποδεκτού εύρους τιμών.

Η Εικόνα 4.2 δείχνει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη μετωπική κατεργασία μικρο-φρεζαρίσματος κράματος Ni-Ti, σε συνάρτηση με το πλάτος κοπής  $a_e$ . Οι ενεργητικές δυνάμεις αναπτύσσονται στη επιφάνεια εργασίας του εργαλείου κοπής, κατά την ακτινική διεύθυνση. Η αξονική παραμόρφωση του εργαλείου προκαλείται από τις παθητικές δυνάμεις. Από το διάγραμμα της Εικόνας 4.2 φαίνεται ότι οι παθητικές δυνάμεις  $F_p$  είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις ενεργητικές  $F_a$  της επιφάνειας κοπής. Το φαινόμενο είναι σύνηθες στις μικρο-κατεργασίες όπου η παραμόρφωση του εργαλείου χαρακτηρίζεται από μια δέσμη συνιστωσών πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Το λεγόμενο “όργωμα” εμφανίζεται, όπως χαρακτηριστικά αποκαλείται το

φαινόμενο. Έτσι, το κοπτικό εργαλείο φρεζαρίσματος απομακρύνεται κατά την αξονική διεύθυνση.



Εικόνα 4.2 : Ενεργητικές  $F_a$  και παθητικές  $F_p$  ασκούμενες δυνάμεις εξαρτώμενες από το πλάτος κοπής  $a_e$ , κατά τη διάρκεια μετωπικής κατεργασίας μικροφρεζαρίσματος κράματος μνήμης σχήματος Ni-Ti, για την πρώτη και την τελευταία πλευρική πρόωση αντίστοιχα.

Μια ακόμη παράμετρος που μπορεί να μεταβάλλει τη στάθμη των παθητικών δυνάμεων είναι η μεταβολή του ρυθμού πρόωσης. Πειραματικά, όμως, αποδεικνύεται ότι ακόμη και μεγάλη αύξησή του, δεν επιφέρει παρά πολύ μικρές μειώσεις των παθητικών δυνάμεων  $F_p$ , των οποίων η μείωση μας ενδιαφέρει.

Αυξάνοντας το μήκος του κατεργαζόμενο τεμαχίου  $L$  σε  $2L$ , παρατηρούμε ότι μεγάλο μέρος των αποβλίτων δε διαχωρίζεται από την επιφάνεια κοπής του κράματος, συνθήκη που δυσχεραίνει την περαιτέρω κατεργασία. Ακόμη και με βέλτιστες συνθήκες κοπής, δεν υπάρχει δίοδος για ολοκλήρωση της κατεργασίας αν δεν εφαρμοστεί επαρκής λίπανση.

Βελτιώνοντας τις συνθήκες κατεργασίας, διοχετεύουμε μείγμα εστέρα με ελάχιστη παροχή  $1 \text{ ml/min}$  με πεπιεσμένο αέρα στην επιφάνεια κοπής. Άμεση διαπίστωση είναι ότι, σε σύγκριση με το μικροφρεζάρισμα χωρίς λίπανση, μηδαμινές ανωμαλίες εμφανίζονται

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

στην αιχμή του κοπτικού εργαλείου φρεζαρίσματος και το κατεργαζόμενο τεμάχιο έχει υψηλής ποιότητας κοπή σε όλες τις επιφάνειές του. Τα αποτελέσματα αλλάζουν όψη και είναι μη αποδεκτής ποιότητας όταν υπερβούμε το όριο παροχής λίπανσης (minimum quantity lubrication LQM).

Αναζητώντας τον κατάλληλο συνδυασμό πλάτους κοπής και βάθους κοπής, ώστε να έχουμε τις λιγότερες δυνατές συμφύσεις, καταλήγουμε στις βέλτιστες διαστάσεις. Η ποιότητα κοπής είναι καλής ποιότητας, αν και μεμονωμένες συμφύσεις ελαχίστων διαστάσεων μπορούν ακόμη και τώρα να ανιχνευθούν.

Αφού επιλεχθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων έτσι, ώστε να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε ποιότητα κοπής και φθορά κοπτικών εργαλείων, η διαδικασία ολοκλήρωσης του μικρο-φρεζαρίσματος ξεκινά. Οι επιφάνειες τελειοποιούνται και η ποιότητά τους βελτιώνεται εντός των επιθυμητών ορίων. Τελικά, το κάτω μέρος των κατεργαζόμενων σχισμών και θυλακίων είναι, εντός των ορισμένων ανοχών, μεγαλύτερων διαστάσεων από το άνω μέρος τους, λόγω της ολοένα και αυξανόμενης ακτινικής εκτροπής του κοπτικού εργαλείου κατά την κατεργασία.

#### 4.2.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υψηλή ολκιμότητα του κράματος Ni-Ti σε συνδυασμό με την υψηλή τάση πρόσφυσης μεταξύ των στρωμάτων του, καθιστά την κατεργασία του μικρο-φρεζαρίσματος αρκετά δύσκολη. Τα περιθώρια για τις τιμές των παραμέτρων ώστε να έχουμε ποιοτική κατεργασία είναι περιορισμένα. Απαραίτητη είναι η χρήση λιπαντικού για την επίτευξη ποιοτικής κατεργασίας, τηρώντας ευλαβικά τα όρια ασφαλείας, γιατί διαφορετικά έχουμε αντίθετα αποτελέσματα. Αυξάνοντας το πλάτος κοπής και το ρυθμό πρόωσης του εργαλείου κοπής, έχουμε βελτίωση της ποιότητας του τεμαχίου και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου, χωρίς, όμως, να αποφεύγεται εντελώς η δημιουργία ανωμαλιών στην επιφάνεια κατεργασίας. Τηρώντας του παραπάνω κανόνες μπορούμε να υπολογίζουμε το μικρο-φρεζάρισμα σαν μια μέθοδο ασφαλούς και αποδοτικής κατεργασίας και κατασκευής μικρο-υλικών και εξαρτημάτων.

## 4.3 ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ME LASER ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

### 4.3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Λίγες μόνο μέθοδοι κατεργασίας μικρο-διαστάσεων SMA υλικών είναι διαθέσιμες. Το κύριο πρόβλημα είναι να κρατηθούν ανέπαφες οι ιδιότητες μνήμης σχήματος από τη μεταφορά θερμότητας και τις μηχανικές τάσεις που ασκούνται στην περιβάλλουσα περιοχή της επιφάνειας κατεργασίας. Κατά την κατεργασία, παραμορφώσεις που οφείλονται στις παραπάνω αιτίες, πρέπει να αποφεύγονται για να διατηρείται η ποιότητά της σε αποδεκτά επίπεδα. Ειδικά στην κατεργασία πολύπλοκων γεωμετριών και σε εύρος διαστάσεων δεκάτων του χιλιοστού, οι συνθήκες αυτές είναι δύσκολο να τηρηθούν. Προς το παρόν, η έλλειψη καταλλήλων μεθόδων για την κατασκευή συνδυασμών επιθυμητών σχημάτων κραμάτων μνήμης σχήματος με διαφορετικά είδη υλικών, περιορίζει σημαντικά την εφαρμογή των μικρο-κατασκευών κραμάτων SMA.

Στο Laser Centrum Hannover οι έρευνες που εκπονούνται έχουν στόχο την εύρεση μεθόδων αφαιρετικής διαμόρφωσης μικρο-κατεργασίας και μεθόδων συγκόλλησης κραμάτων SMA με τη χρήση ακτινοβολίας laser, με απώτερο στόχο τη χρήση τους στην βιομηχανία παραγωγής μικρο-συσκευών. Η συγκόλληση γεωμετριών υψηλής ανάλυσης και η τυχόν επιρροή των μεθόδων κατεργασίας με laser στις ιδιότητες μνήμης σχήματος του κράματος, είναι τα κύρια ζητούμενα των ερευνών αυτών [56].

### 4.3.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ME LASER ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

Μια εναλλακτική μέθοδος μικρο-κατεργασίας που φιλοδοξεί να ικανοποιήσει τις παραπάνω απαιτήσεις είναι αυτή με laser τιτανίου-ζαφειρίου Ti-Sapphire πολύ χαμηλών παλμών.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ακριβής εστίαση και η δυνατότητα άριστης ενεργειακής διοχετεύσης η οποία δεν επιτρέπει να σπαταλάται ενέργεια σε παράγοντες που δεν εισφέρουν στην αύξηση της ποιότητας κατεργασίας, όπως αύξηση θερμοκρασίας περιβάλλουσας περιοχής κατεργασίας. Επίσης, μπορεί να επιτύχει

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

πολύ υψηλά επίπεδα ενεργειακής ισχύος και εξαιρετικά χαμηλή διάρκεια παλμών. Με τη χρήση της μεθόδου laser χαμηλών παλμών μπορούμε να έχουμε αποβολή μεταλλικού υλικού χωρίς να υπάρχουν σχεδόν καθόλου υπολείμματα τηγμένου υλικού. Με τον τρόπο αυτόν, ελαχιστοποιείται η θερμική επιρροή της κατεργασίας στις χαρακτηριστικές ιδιότητες του κράματος μνήμης σχήματος [56].

#### 4.3.3. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Από τη στιγμή που τα κράματα Ni-Ti είναι τα πιο διαδεδομένα SMA, οι έρευνες επικεντρώνονται σε αυτά. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων μνήμης σχήματος των κραμάτων που επηρεάζονται από τη μέθοδο κατεργασίας με laser, η δομή και η υφή των κόκκων υλικού εξετάζονται ερευνητικά. Το επόμενο βήμα της έρευνας, μετά τη μελέτη του κράματος Ni-Ti, θα εκπονηθεί σε κράματα μνήμης σχήματος με βάση τον χαλκό Cu. Η επιλογή των γεωμετριών που πρόκειται να συγκολληθούν θα γίνει βάσει των απαιτήσεων διάφορων εφαρμογών μικρο-τεχνολογίας και της εργοστασιακής μηχανικής επεξεργασίας, σχετικά με μικρο-ενεργοποιητές και μικρο-κατασκευές ιατρικού τομέα [56].

#### 4.4 ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ SMA ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (MICRO ELECTRO DISCHARGE MACHINING) [57]

##### 4.4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος μικρο-κατεργασίας κραμάτων μνήμης σχήματος με ηλεκτροδιάβρωση (Micro Electro Discharge Machining ή μEDM), είναι μια κοινή μέθοδος κατασκευής μικρο-εξαρτημάτων και συσκευών που χρησιμοποιούνται στην ιατρική και τη βιομηχανία γενικότερα. Καθώς η μέθοδος μEDM προκαλεί αλλαγές στις γειτονικές περιοχές της επιφάνειας κατεργασίας του υλικού, η αξιοπιστία και η ακρίβειά της γίνεται όλο και πιο σημαντική, όσο μικραίνει η κλίμακα των κατασκευαζόμενων προϊόντων. Προκειμένου να χαρακτηριστεί η επίδραση της μεθόδου μEDM στη γειτονική ζώνη της επιφάνειας κατεργασίας, εκτελέστηκαν βασικές μεταλλουργικές έρευνες σε

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

ψευδο-ελαστικά κράματα μνήμης σχήματος νικελίου –τιτανίου Ni-Ti [58]. Η αποβολή υλικού κατά την μEDM εξαρτάται από τις συνθήκες ηλεκτρικής εκκένωσης μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου, εν μέσω του διηλεκτρικού υγρού. Το υλικό αποβάλλεται με τήξη και εξάτμισή του, με διακριτούς σπινθήρες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρων διαφόρων διαμέτρων και βαθών, ανάλογα με την ηλεκτρική ενέργεια εκκένωσης. Η μικροδομή της ζώνης τήξης χαρακτηρίζεται από κοιλότητες, ρωγμές και καθίζηση. Ρωγμές στην επιφάνεια κατεργασίας οι οποίες διαδίδονται κάθετα, εντός του υλικού, είναι συνέπεια τυχαίων και αλληπάλληλων θερμικών διεργασιών. Στη ζώνη τήξης, ανιχνεύθηκαν σημαντικές καθιζήσεις. Ο ρυθμός αποβολής υλικού (Material Removal Rate MRR), ο οποίος αποτελεί μια βασική παράμετρο στην κατασκευαστική διαδικασία, αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την ηλεκτρική ενέργεια εκκένωσης, επιτυγχάνοντας εμπορικά ενδιαφέρουσες τιμές, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο χαλκού-βολφραμίου Cu-W. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μικρο-δομής απαιτούν την απομάκρυνση της γειτονικής ζώνης κατεργασίας, για να εξασφαλιστεί η ποιότητα των χαρακτηριστικών του υλικού. Αυτό είναι εφικτό με μια απλή κατεργασία μEDM, ακολουθούμενη από ηλεκτρολυτική στίλβωση.

#### 4.4.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Λόγω της ιδιότητας μνήμης σχήματος των SMA, είναι δύσκολο να κατεργαστούν και να πάρουν ορισμένο, μόνιμο σχήμα [59-60]. Η διαμόρφωσή τους επιτυγχάνεται με μικρο-ηλεκτροδιάβρωση μEDM. Η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί τήξη στην επιφάνεια του κράματος και αλλαγές στις γειτονικές της ζώνες. Ωστόσο, έχει μια ισχυρή επίδραση κατά την κατασκευή μικροσκοπικών συστατικών με λεπτά πάχη τοιχωμάτων, με αποτέλεσμα να απαιτείται η αφαίρεση υλικού των κοντινών σε αυτή επιφανειών. Για να έχουμε, λοιπόν, το επιθυμητό αποτέλεσμα στην μEDM, απαιτείται αυστηρή τήρηση των προδιαγραφών και των κανόνων κατεργασίας.

#### 4.4.3. ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η μικρο-κατεργασία μEDM είναι μια διαδικασία κατά την οποία το κοπτικό εργαλείο – ηλεκτρόδιο επιδρά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χωρίς να υπάρχει επαφή μεταξύ τους. Η αποβολή υλικού είναι αποτέλεσμα που επιφέρει η συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ ηλεκτροδίου - εργαλείου - τεμαχίου, εν μέσω διηλεκτρικού ρευστού. Με τον τρόπο αυτόν, το μέταλλο τήκεται κατά την επιφάνεια, εξατμίζεται μερικώς και απομακρύνεται από την περιοχή. Κατά συνέπεια κρατήρες από την ηλεκτροδιάβρωση σχηματίζονται στην επιφάνεια. Ο ρυθμός αποβολής υλικού (material removal rate MRR) καθορίζεται από το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και την ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης. Ο μηχανισμός αποβολής υλικού καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες και τη μικροδομή του υλικού, έτσι ώστε η κατεργασία να είναι κατάλληλη, ανεξάρτητα από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, για υλικά που είναι δύσκολο να κατεργαστούν και να κοπούν. Λόγω του χαμηλού όγκου τήξης μEDM είναι κατάλληλη για την κατεργασία εξαρτημάτων ελαχίστων διαστάσεων.

Προκαλούμενες από την τοπικά υψηλή πυκνότητα ενέργειας της θερμικής κατεργασίας, τοπικές περιοχές τήξης δημιουργούνται στην επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου, παράγοντας μια ζώνη επηρεαζόμενη από τη θερμότητα (heat affected zone HAZ) στο υλικό του τεμαχίου. Κατά συνέπεια, είναι πιθανό να συμβούν δομικές αλλαγές στην επιφάνεια καθώς και στη γειτονική της ζώνη. Επιπροσθέτως, προκαλούμενες από την τοπικά επικρατούσα θερμική επιρροή, παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται στην επιφάνεια κατεργασίας, οι οποίες ίσως κατά τη διάρκεια της κατεργασίας μας απαλλάξουν από τη δημιουργία ρωγμών. Κάθε επιφάνεια η οποία έχει εκτεθεί σε μεγάλο αριθμό ποικίλων επιδράσεων, όπως περιγράφηκε παραπάνω, θα έχει σημαντικά μειωμένη διάρκεια ζωής, ειδικά μετά από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, γεγονός που ίσως οδηγήσει στην αστοχία του υλικού σε ακραία περίπτωση [61,62].

#### 4.4.4. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

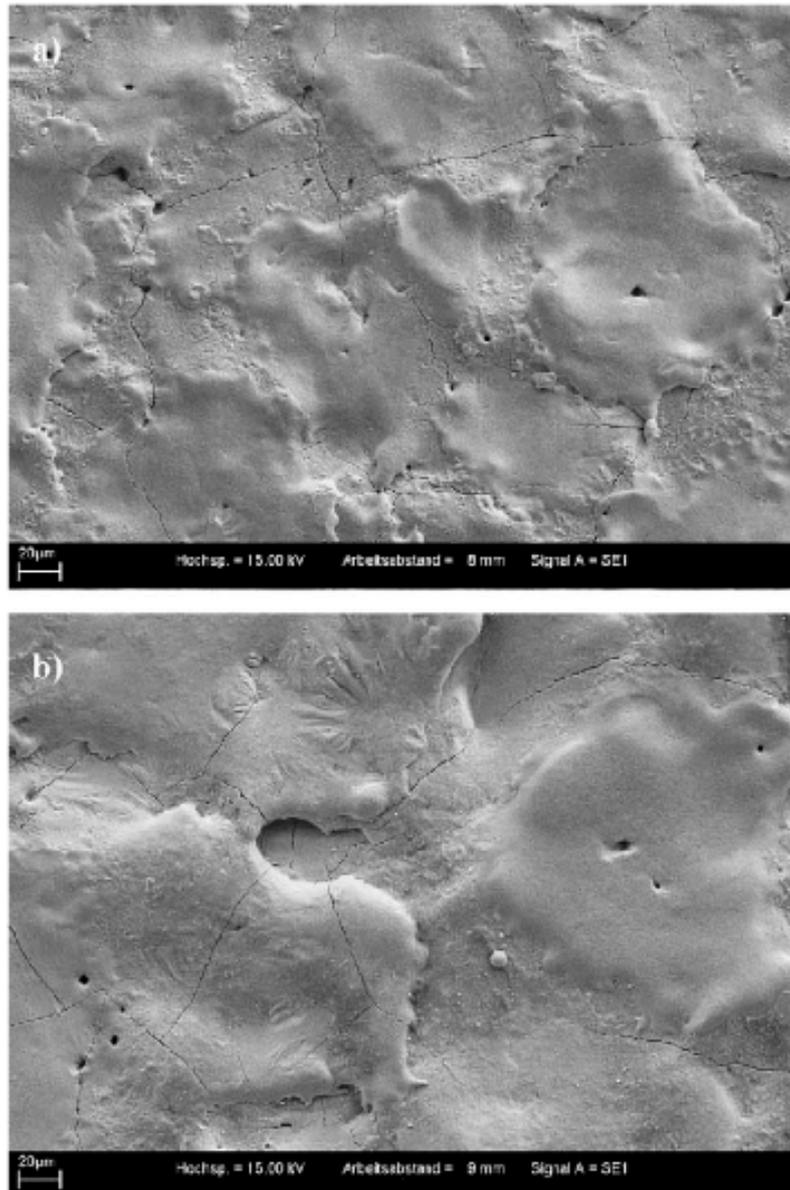
Σκοπός των ερευνών ήταν ο προσδιορισμός των μεταβολών στην επιφάνεια που προκαλούνται από τη μικρο-κατεργασία m-EDM κραμάτων νικελίου-τιτανίου Ni-Ti [62]. Τα πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν σε θερμοκρασία δωματίου ωστενιτικής φάσης κράμα Ni-Ti, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο χαλκού-βολφραμίου Cu-W, ευρισκόμενο σε διηλεκτρικό ρευστό από συνθετικά παράγωγα υδρογονανθράκων. Η πιο καθοριστική παράμετρος της κατεργασίας είναι η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης. Χαρακτηρίζει την ενέργεια που παράγεται στην περιοχή εκκενώσεως και καθορίζει το ρυθμό αποβολής υλικού MRR καθώς και την επίδραση επί της μικρο-δομής της γειτονικής ζώνης κατεργασίας, όπως και την ακεραιότητα της επιφάνειας κατεργασίας. Η εισροή της ενέργειας εκκένωσης διαφοροποιείται ανάλογα με τις παραμέτρους της κατεργασίας m-EDM, ενώ την ίδια στιγμή οι σχετικές με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού παράμετροι έχουν κρατηθεί σταθερές. Διατηρώντας σταθερή τάση ρεύματος εκκένωσης, η ενέργεια εκκένωσης ήταν ανάλογη της έντασης του ρεύματος εκκένωσης, αυξανόμενη σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος και μειούμενη σε μικρότερες.

Καταγραφή των επιδράσεων επί της επιφανείας έγινε μέσω της μελέτης της επιφανειακής τραχύτητας με ομοεστιακό μικροσκόπιο σάρωσης με laser (confocal laser scanning microscope CLSM) και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (scanning electron microscope SEM, Perthometer). Στον τομέα των μεταλλογραφικών ερευνών σε όλα τα μέρη του υλικού χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (scanning electron microscope SEM) και μέτρηση μικροσκληρότητας (micro hardness measuring). Ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR ως μέτρο για την ταχύτητα απομάκρυνσης υλικού, προσδιορίστηκε με την απώλεια μάζας ανά μονάδα χρόνου, μετρημένη σε κλίμακα ακριβείας. Τελευταίο βήμα της πειραματικής διαδικασίας ήταν να ερευνηθεί το κατά πόσον η κατεργασμένη με μ-EDM επιφάνεια εργασίας ήταν δυνατό να τελειοποιηθεί με τη χρήση οποιασδήποτε μεθόδου ηλεκτροχημικής στίλβωσης.

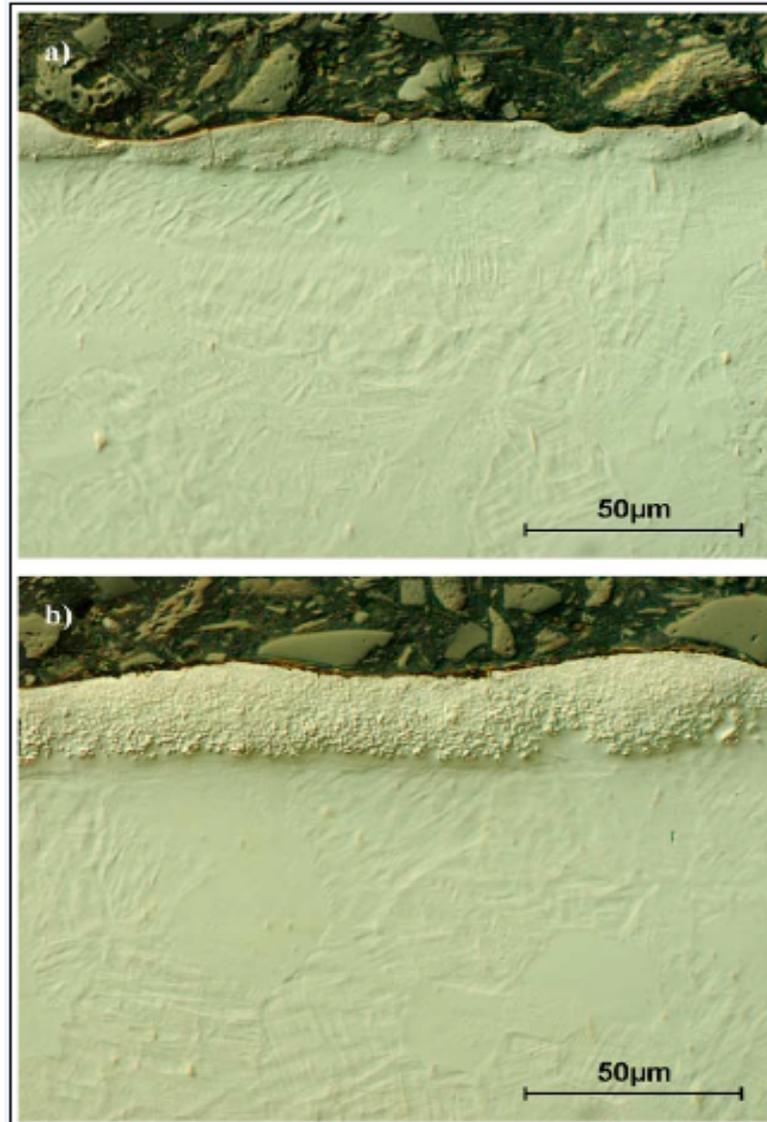
#### 4.4.5. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Η επιφάνεια κατεργασίας χαρακτηρίζεται από μια ζώνη τήξης η οποία δημιουργείται από την επίδραση των μεμονωμένων σπινθήρων ηλεκτρικής εκκένωσης. Τοπογραφία επιφανείας κράματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti μετά από κατεργασία μEDM, η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους κατεργασίας (ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης, διηλεκτρικό ρευστό), φαίνεται στην Εικόνα 4.3, για δύο διαφορετικές παραμέτρους κατεργασίας.

Χαρακτηρίζεται από κρατήρες λόγω της ενέργειας εκκένωσης και σταγόνες τηγμένου υλικού. Με την αύξηση της έντασης του ρεύματος, η ενέργεια εκκένωσης αυξάνεται, δημιουργώντας κρατήρες μεγαλύτερης διαμέτρου και βάθους, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτόν στη δημιουργία μιας περισσότερο αξιοσημείωτης τραχύτητα επιφάνειας. Αύξηση της συχνότητας του ρεύματος οδηγεί παρόμοια σε τραχύτερη επιφάνεια. Για τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα, η τραχύτητα κυμαίνεται από 10 έως 30 $\mu\text{m}$  (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.3 : Τοπογραφία επιφανείας κράματος Ni-Ti μετά από κατεργασία µEDM, με τη χρήση έντασης ρεύματος: a)  $I=2A$  και b)  $I=4A$  [ 57].



Εικόνα 4.4 : Επίδραση της έντασης του ρεύματος και της συχνότητάς του στην τραχύτητα της επιφάνειας κατεργασίας με τη μέθοδο μEDM, για δύο διαφορετικά ζεύγη παραμέτρων: a)  $I=2A$  και  $f=10KHz$  b)  $I=4A$  και  $f=5KHz$  [57 ].

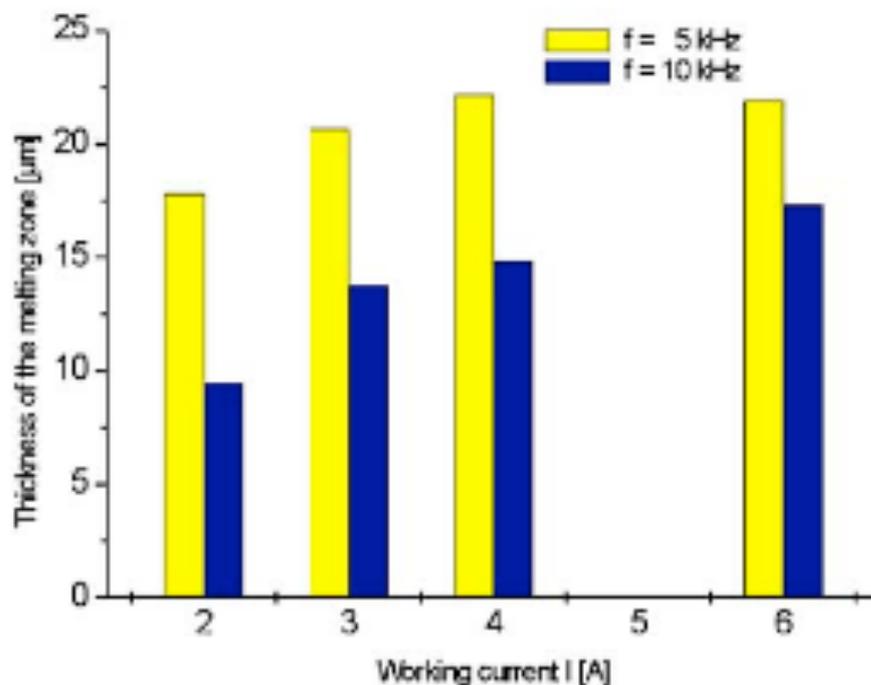
Παρόμοια με την τραχύτητα επιφάνειας, το πάχος της ζώνης τήξης εξαρτάται καθοριστικά από τις παραμέτρους κατεργασίας. Στη μαλέτη των διατομών του κράματος μπορεί να μετρηθεί απ' ευθείας και κυμαίνεται μεταξύ 5 και 22 $\mu m$ , για τις επιλεγμένες παραμέτρους κατεργασίας. Η Εικόνα 4.5 παρουσιάζει την επίδραση της έντασης και της συχνότητας του ρεύματος στο πάχος της ζώνης τήξης. Φαίνεται ότι το πάχος αυξάνεται με την αύξηση της έντασης του ρεύματος, αφού αυξάνεται και η ενέργεια της ηλεκτρικής εκκένωσης. Η Εικόνα 4.6 δείχνει ότι η τραχύτητα της ζώνης τήξης αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση της έντασης του ρεύματος εκκένωσης, λόγω των ολοένα και

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

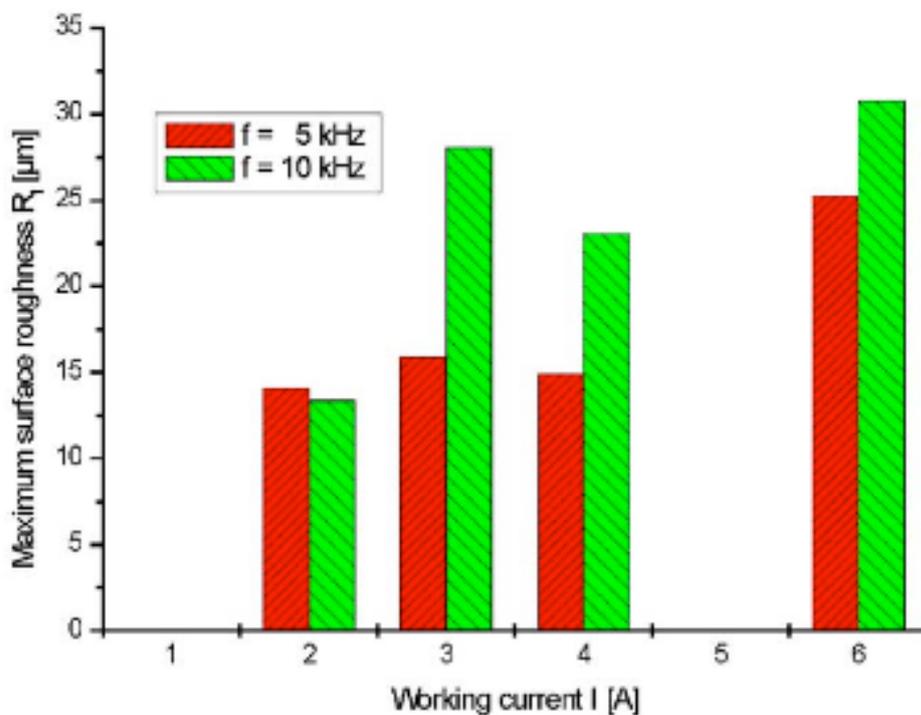
ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

μεγαλύτερων σχηματιζόμενων κρατήρων. Εκτός από τους κρατήρες που δημιουργούνται από την ηλεκτροδιάβρωση, σχηματίζονται και ρωγμές στη ζώνη τήξης. Έχουν ξεκινήσει τοπικά, μεταξύ των στρωμάτων που έχουν υψηλή θερμοκρασία λόγω της εκκένωσης και των ψυχρότερων στρωμάτων του υλικού. Οι μικροί όγκοι τήξης υλικού προκαλούν υψηλό ρυθμό ψύξης, με αποτέλεσμα ταχεία αύξηση της τάσης διαρροής. Οι περιοχές που έχουν παραμορφωθεί πλαστικά κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας δε μπορούν να επανέλθουν στην αρχική κατάσταση, καταλήγοντας σε ρωγμές κάθετες στην επιφάνεια του υλικού. Ο λόγος δεν είναι αυτός που πιστεύονταν αρχικά, η υπέρβαση του ορίου θερμικής αντοχής του υλικού αλλά η υπερβολική και απότομη εφαρμογή θερμότητας. Με άλλα λόγια, το συνολικό φορτίο θερμότητας είναι πιθανώς ανεκτό από το υλικό αλλά η θερμότητα που λαμβάνει σε τόσο μικρό χρόνο οδηγεί σε ρωγμές. Παρατηρώντας έναν και μόνο διακριτό σπινθήρα εκκένωσης, βλέπουμε ότι ακόμη και η ενέργεια αυτού μπορεί να προκαλέσει ρωγμές στο υλικό, υπερβαίνοντας το όριο αντοχής σε εφελκυσμό.

Παρατηρώντας τη διάδοση των ρωγμών, είναι εφικτό να αξιολογηθεί η πυκνότητά τους και η μέση ελεύθερη διαδρομή τους εντός του υλικού. Αυξάνοντας της ένταση του ρεύματος εκκένωσης και ταυτόχρονα δημιουργώντας μεγαλύτερων διαστάσεων κρατήρες εκκένωσης, η μέση ελεύθερη οδός διάδοσης ρωγμών γίνεται μεγαλύτερη ενώ η πυκνότητα των ρωγμών στον ίδιο χρόνο μειώνεται. Οι εμφανείς στην επιφάνεια ρωγμές διαδίδονται κάθετα στην επιφάνεια του υλικού, μέχρι τους πρόποδες της ζώνης τήξης. Μια περαιτέρω διάδοση των ρωγμών εντός του εσωτέρου υλικού, όπως παρατηρείται στα χαλύβδινα εργαλεία, δεν παρατηρείται εδώ. Πέρα από τις κάθετα στην επιφάνεια του υλικού διαδιδόμενες ρωγμές, κάποιες λίγες ρωγμές παρατηρήθηκαν παράλληλα στην επιφάνεια, ιδιαίτερα σε υψηλές τιμές της έντασης του ρεύματος εκκένωσης.

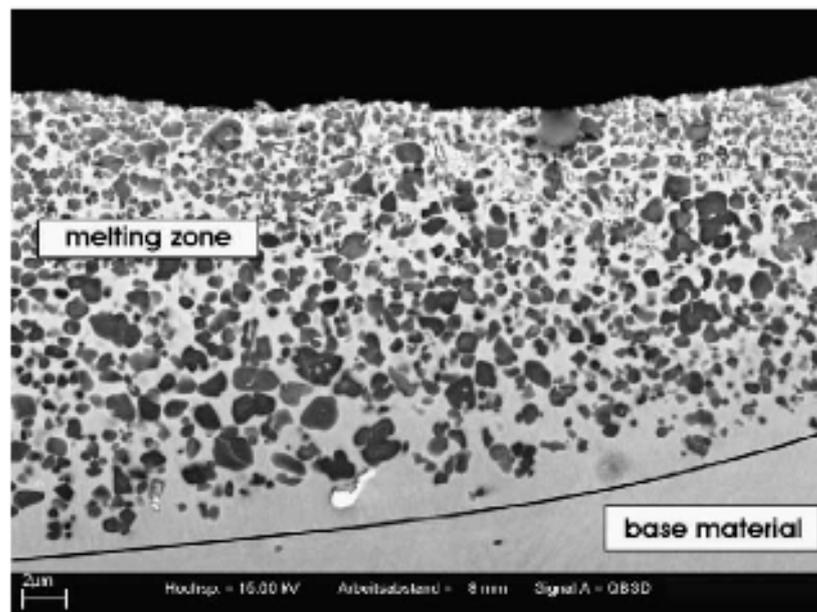


Εικόνα 4.5 : Ζώνες τήξης κράματος Ni-Ti μετά από κατεργασία μEDM, μετρημένα σε τομές του υλικού, για διάφορες τιμές της έντασης ρεύματος εκκένωσης και της συχνότητάς του [57].



Εικόνα 4.6 : Προσδιορισμός της επιφανειακής τραχύτητας κράματος Ni-Ti μετά από κατεργασία μEDM, για διάφορες τιμές της έντασης του ρεύματος εκκένωσης και της συχνότητάς του [57].

Διερεύνηση της ζώνης κοντά στην επιφάνεια κατεργασίας, με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM, αποκαλύπτει υψηλή συγκέντρωση κατακρημνισμάτων στη ζώνη τήξης (Εικόνα 4.7). Με ανάλυση ακτίνων-X διαπιστώνουμε ότι πρόκειται για καρβίδια τιτανίου Ti, τα οποία πιθανότατα προέρχονται από την πυρόλυση των μορίων υδρογονανθράκων στο διηλεκτρικό ρευστό. Ο άνθρακας αντιδρά με το άκρως δραστικό τιτάριο, σχηματίζοντας TiC, σε υψηλό βαθμό συγκέντρωσης. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας της ζώνης τήξης μεταξύ 1000 και 1300 HV, σημαντικά υψηλότερη από αυτή του αντίστοιχου μη προσβεβλημένου υλικού. Κάτω από την επιφάνεια τήξης και εντός της ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα (heat affected zone HAZ), δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες αλλαγές στη δομή και τη σκληρότητα του υλικού.



Εικόνα 4.7 : Συγκέντρωση κατακρημνισμάτων καρβιδίων τιτανίου TiC εντός της ζώνης τήξης κράματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti, μετά από κατεργασία μEDM [57].

#### 4.4.6. ΡΥΘΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ (MATERIAL REMOVAL RATE MRR) ΣΤΗΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ Μ-EDM

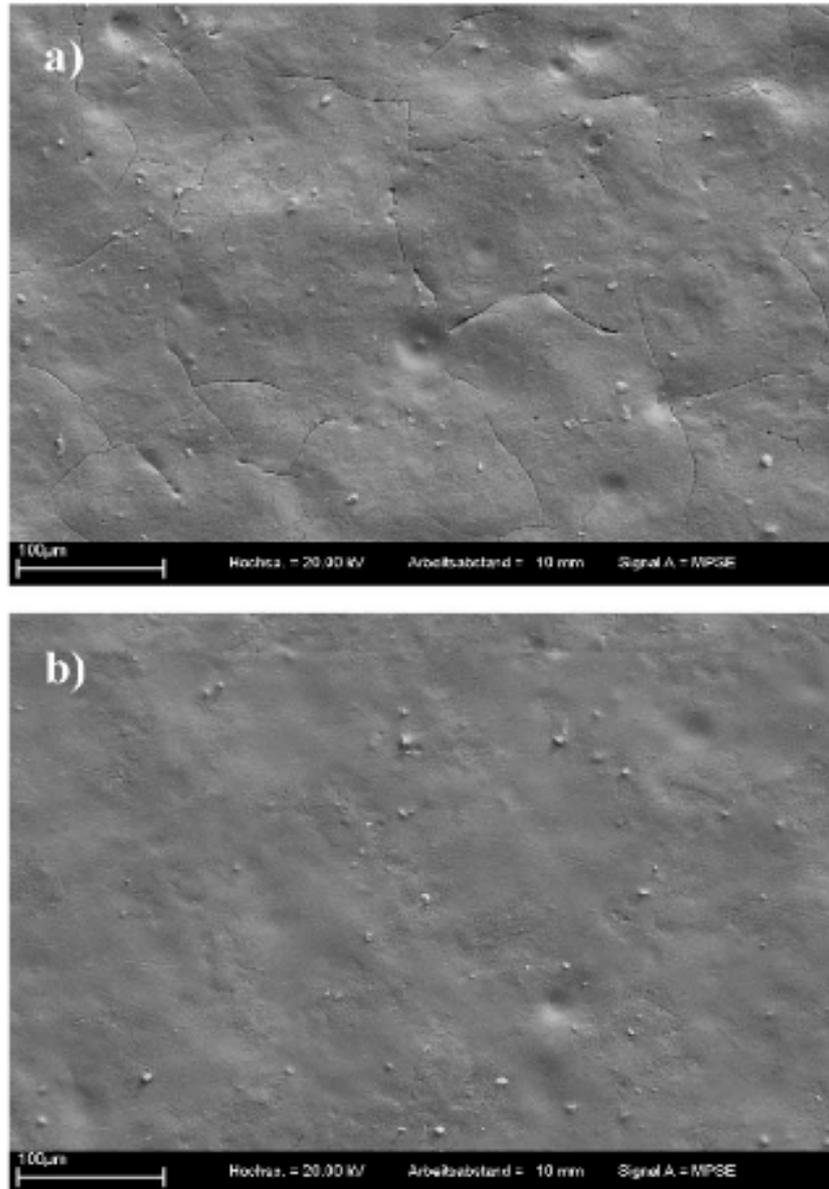
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

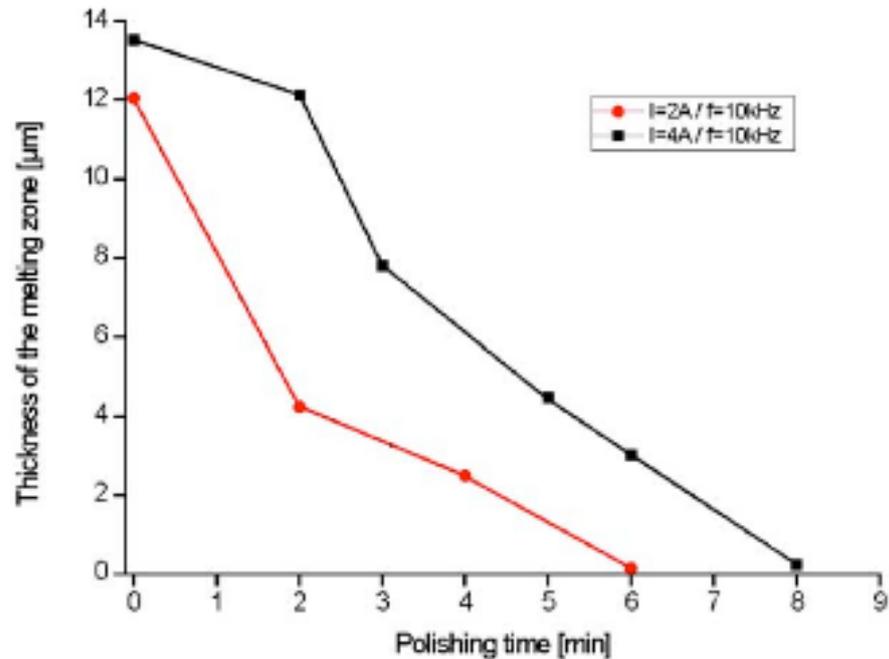
Για την αξιολόγηση της ποιότητας της κατεργασίας μEDM θεωρείται ως κριτήριο ο ρυθμός αποβολής υλικού (material removal rate MRR), ο οποίος χαρακτηρίζει και την ταχύτητα αποβολής υλικού. Είναι το μέγεθος που προσδιορίζει τον όγκο του αφαιρούμενου υλικού στη μονάδα του χρόνου και συνεπώς αποτελεί σημαντική συνιστώσα της κατεργασίας. Η ταχύτητα αποβολής υλικού αυξάνεται με την ένταση του ρεύματος εκκένωσης, η οποία έχει σημαντικά μεγαλύτερη επίδραση την ταχύτητα αποβολής από τη συχνότητά του. Η μέγιστη δυνατή ένταση του ρεύματος εκκένωσης  $I=4A$ , η οποία περιορίζεται από την τήξη του ηλεκτροδίου, μπορεί να επιτύχει ρυθμό αποβολής υλικού  $MRR=4mm^3/min$ .

#### **4.4.7. ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΣΤΙΛΒΩΣΗ – ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ (ELECTRO – CHEMICAL POLISHING ECP) ΣΤΗΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ Μ-EDM**

Λόγω του γεγονότος ότι οι παραπάνω περιγραφείσες μεταβολές οι οποίες προκαλούνται από την κατεργασία μEDM στην επιφάνεια του υλικού μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία του, είναι απαραίτητη η περαιτέρω κατεργασία της με μια πρόσθετη διαδικασία φινιρίσματος. Στην περίπτωση μας, η μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η ηλεκτροχημική στίλβωση (electro-chemical polishing ECP) με η χρήση ηλεκτρολύτη που περιέχει 75% οξικό οξύ  $CH_3COOH$  και 25% υπερχλωρικό οξύ  $HClO_4$  [62]. Στο αρχικό στάδιο της διεργασίας ECP απομακρύνονται οι ακμές των κρατήρων που έχουν προκληθεί από την ηλεκτροδιάβρωση, εξαιτίας των ισχυρών τοπικών γαλβανικών ρευμάτων, οδηγώντας σε μια μικρή μείωση του πάχους της ζώνης τήξης (Εικόνα 4.8). Για μεγαλύτερης διάρκειας κατεργασία στίλβωσης, η απομάκρυνση υλικού συνεχίζεται ομογενώς, επεκτεινόμενη σε ολόκληρη την επιφάνεια του δείγματος. Με τη χρήση της μεθόδου ECP, οι ζώνες τήξης διαστάσεων 10-14 $\mu m$  που έχουν δημιουργηθεί από την κατεργασία μEDM είναι δυνατό να εξαλειφθούν σε αποδεκτό χρόνο κατεργασίας (8min), (Εικόνα 4.9). Τελικά, όλες οι στίλβωμένες επιφάνειες του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι απαλλαγμένες από ζώνες τήξης, ρωγμές και καθιζήσεις.



Εικόνα 4.8 : Τοπογραφία επιφάνειας κράματος Ni-Ti μετά από κατεργασία µEDM και ηλεκτροχημική στίλβωση ECP, παρατηρούμενη με μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης SEM, για σταθερές παραμέτρους κατεργασίας έντασης ρεύματος εκκένωσης  $I=2A$  και συχνότητα ρεύματος  $f=10KHz$  και μεταβαλλόμενο χρόνο στίλβωσης: a) $t=2min$  και b) $t=5min$  [ 57].



Εικόνα 4.9 : Βελτίωση (μείωση) πάχους ζώνης τήξης επιφάνειας κατεργασίας κράματος Ni-Ti μετά από κατεργασία m-EDM, σε σχέση με το χρόνο διάρκειας της διεργασίας στίλβωσης, για δύο διαφορετικές τιμές της έντασης ρεύματος εκκένωσης και σταθερή συχνότητα ρεύματος [57].

#### 4.4.8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξαρτήματα μικρο-διαστάσεων από κράματα μνήμης σχήματος Ni-Ti μπορούν να κατασκευαστούν με σκοπό την εμπορική τους διάθεση με μικρο-κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης μEDM, με τη χρήση κατάλληλου ηλεκτροδίου χαλκού-βολφραμίου Cu-W και διηλεκτρικού ρευστού τύπου Aralux. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε ότι οι δομικές αλλαγές που θα συμβούν στην επιφάνεια κατεργασίας θα εξαρτώνται αποκλειστικά από τις παραμέτρους της κατεργασίας (ένταση ρεύματος εκκένωσης, ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης, συχνότητα ρεύματος εκκένωσης). Καθίζηση καρβιδίων τιτανίου TiC στη ζώνη τήξης οδηγούν στην υπόθεση ότι οι ιδιότητες μνήμης σχήματος του υλικού θα μπορούσαν να έχουν χαθεί στη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα της κατεργασίας (heat affected zone HAZ). Λαμβάνοντας υπ' όψιν την παρατήρηση αυτή και μελετώντας το δίκτυο των ρωγμών στη ζώνη τήξης του υλικού, συμπεραίνουμε ότι η ζώνη τήξης και ένα μέρος της επιφάνειας που επηρεάζεται από τη θερμότητα HAZ, είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν με μια πρόσθετη διεργασία φινιρίσματος. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μέσω κατεργασίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

χαμηλής ενέργειας είτε μέσω ηλεκτρο-χημικής αφαίρεσης της ζώνης τήξης και της γειτονικής περιοχής.

## 4.5 ΜΙΚΡΟ - ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΟΣ SMA ME LASER [63]

### 4.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρά το γεγονός ότι τα SMA κράματα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti αποτελούν ένα είδος λειτουργικού υλικού με ιδιότητες μνήμης σχήματος, υπερ-ελαστικότητας και καλής βιο-συμβατότητας, παράγοντες που τα έχουν καταστήσει ευρέως χρησιμοποιούμενα σε πολλούς τομείς [64-67], οι επιτυχείς εφαρμογές σε κάθε νέο υλικό εξαρτώνται, εκτός από τα εγγενή χαρακτηριστικά του, από την επίλυση των δυσκολιών που πιθανώς παρουσιάζει στις κατεργασίες συγκόλλησής του [68]. Όμως, λίγες μόνο τεχνικές συγκόλλησης για την ένωση τμημάτων κραμάτων Ni-Ti αναφέρονται στη βιβλιογραφία έως σήμερα. Για παράδειγμα, η συγκόλληση με τη χρήση αδρανούς αερίου βολφραμίου (Tungsten inert gas TIG) προκαλεί, αποδεδειγμένα, υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, λόγω της εκτεταμένης ζώνης που επηρεάζεται από τη θερμότητα (heat affected zone HAZ) [69]. Σύμφωνα με μελέτη σχετικά με την ικανότητα συγκόλλησης δύο μερών κράματος Ni-Ti, πάχους 2mm, με τη μέθοδο υψηλής ενεργειακής δέσμης πλάσματος, επιτυγχάνεται ικανοποιητική συγκόλληση και η αντοχή των συγκολλημένων μερών φτάνει τα 750 MPa, η οποία είναι το 62,2% της αντοχής του αρχικού μετάλλου και το κάταγμα εμφανίζεται στο κέντρο της συγκολλήσεως [70]. Η συγκόλληση τμημάτων κραμάτων Ni-Ti και γενικότερα SMA με χρήση δέσμης laser, αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για αυτή την κατηγορία των υλικών επειδή με κατάλληλο έλεγχο και ορισμό των παραμέτρων της κατεργασίας, μπορούμε να αναπαράγουμε σταθερά, επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα. Η μελέτη των Hu, Wang [71] πάνω στη διατήρηση των ιδιοτήτων μνήμης σχήματος και τη διάβρωση των τμημάτων κράματος Ni-Ti πάχους 2mm, που συγκολλήθηκαν με laser CO<sub>2</sub> και των Tuissi A. και Falvo A. [72-73], σχετικά με την επίδραση της συγκόλλησης τμημάτων κράματος Ni-Ti με laser νεοδυμίου Nd στις μηχανικές του ιδιότητες, έδειξαν ότι η ιδιότητα της αμφίδρομης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

μνήμης σχήματος είναι μερικώς διατηρημένη στο συγκολλημένο υλικό. Ωστόσο, υψηλότερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης παρατηρήθηκαν στο συγκολλημένο υλικό, σε σχέση με τα αρχικά τμήματα του υλικού. Τέλος, το συγκολλημένο υλικό, είναι λιγότερο επιρρεπές σε σκασίματα και χαραμάδες διάβρωσης από το αρχικό υλικό, όπως επιβεβαιώνει και η μελέτη των Yan, YANGang και Liu [74].

Μία ακόμη μελέτη των ιδιοτήτων συγκολλημένων κραμάτων Ni-Ti, των Gugel, Schuermann, Theisen [75], έδειξε ότι η στατική αντοχή σε εφελκυσμό και η κόπωση λεπτών συρμάτων κράματος Ni-Ti που συγκολλήθηκαν με laser νεοδυμίου Nd, φτάνουν στο 75% περίπου των αντίστοιχων τιμών των μη συγκολλημένων συρμάτων Ni-Ti.

Οι παραπάνω μελέτες αναφέρονται, κυρίως, σε συγκολλημένες επιφάνειες κραμάτων Ni-Ti με πάχος μεγαλύτερο από 1,5mm. Όμως, η συγκόλληση πολύ λεπτών φύλλων ή συρμάτων κραμάτων Ni-Ti είναι αυτή που έχει φωτεινό μέλλον στην ιατρική και τους υπόλοιπες τομείς των εφαρμογών της. Στη συνέχεια, θα επιχειρηθεί να ερευνηθεί η μικροδομή και οι ιδιότητες φύλλων κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm, που έχουν συγκολληθεί με impulse micro-laser [76].

#### **4.5.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ NI-TI ΠΑΧΟΥΣ 0,2mm ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ MICRO-LASER**

Φύλλα κράματος Ni50,6-Ti49,4 (κλάσμα σε mole), πάχους 0,3mm χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την έρευνα που περιγράφουμε [76]. Τα φύλλα που τελικά χρησιμοποιούνται, είναι προϊόν διέλασης των αρχικών που επιφέρει μείωση του πάχους τους κατά 22% περίπου. Για να αφαιρεθεί το επιφανειακό στρώμα αζώτου που παράγεται κατά τη διέλαση, τα φύλλα Ni-Ti ήταν διαποτισμένα με προπανόνη C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O και, για τον καθαρισμό τους, βυθίζονται για 15min σε διάλυμα μίγματος υδροφθορικού οξέος HF και νιτρικού οξέος HNO<sub>3</sub> και στη συνέχεια ξεπλένονται με καθαρό νερό. Μετά από αυτή τη διαδικασία, τα φύλλα Ni-Ti έφθασαν να έχουν πάχος 0,2mm. Οι διαστάσεις των δειγμάτων συγκόλλησης είναι 0,2mmX40mmX60mm. Η πηγή laser που χρησιμοποιήθηκε είναι η Nd:YAG SL-80, μέσης ισχύος 80W, κατασκευασμένη στην Ιταλία [76].

Μετά τη συγκόλληση, οι δοκιμές αντοχής σε κοπή έγιναν από σπινθήρα κοπής και οι δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό έγιναν από μηχάνημα INSTRON 5540. Η μορφολογία καταγμάτων της επιφάνειας ανιχνεύθηκε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο Quanta 200 [76]. Μεταλλογραφικός έλεγχος της συγκολλημένης επιφάνειας έγινε σε εγκάρσια διεύθυνση, με τη χρήση διαλύματος μίγματος υδροφθορικού οξέος HF και νιτρικού οξέος HNO<sub>3</sub>. Η μικρο-δομή παρατηρήθηκε με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο 4XB-TV. Το συγκολλημένο και το αρχικό υλικό ανοπτήθηκαν σε θερμοκρασία 500°C, σε κενό για 1 ώρα, και το SMA των ανοπτημένων υλικών ελέγχθηκε με μετρήσεις θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης (differential scanning calorimetry DSC) που έγιναν σε θερμοκρασίες από -60 έως 200°C, υπό ελεγχόμενο ρυθμό ψύξης-θέρμανσης 10 °C/min [76].

#### **4.5.3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ ΝΙ-ΤΙ ΠΑΧΟΥΣ 0,2mm ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ MICRO-LASER**

##### **4.5.3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΡΩΓΜΩΝ**

Οι τιμές αντοχής των συγκολλημένων φύλλων Ni-Ti σε εφελκυσμό φαίνονται στην Εικόνα 4.11 [76], για διάφορες τιμές παραμέτρων της κατεργασίας που εμφανίζονται στην Εικόνα 4.10 [76]. Παρατηρούμε ότι για τις τιμές παραμέτρων του συνδυασμού 8 (ποσοστό ισχύος 21%, συχνότητα παλμών 4Hz και διάρκεια παλμών 1,9msec), το συγκολλημένο τεμάχιο έχει αντοχή σε εφελκυσμό 683 MPa, που αντιστοιχεί στο 97% της αντοχής του αρχικού, μη συγκολλημένου φύλλου Ni-Ti.

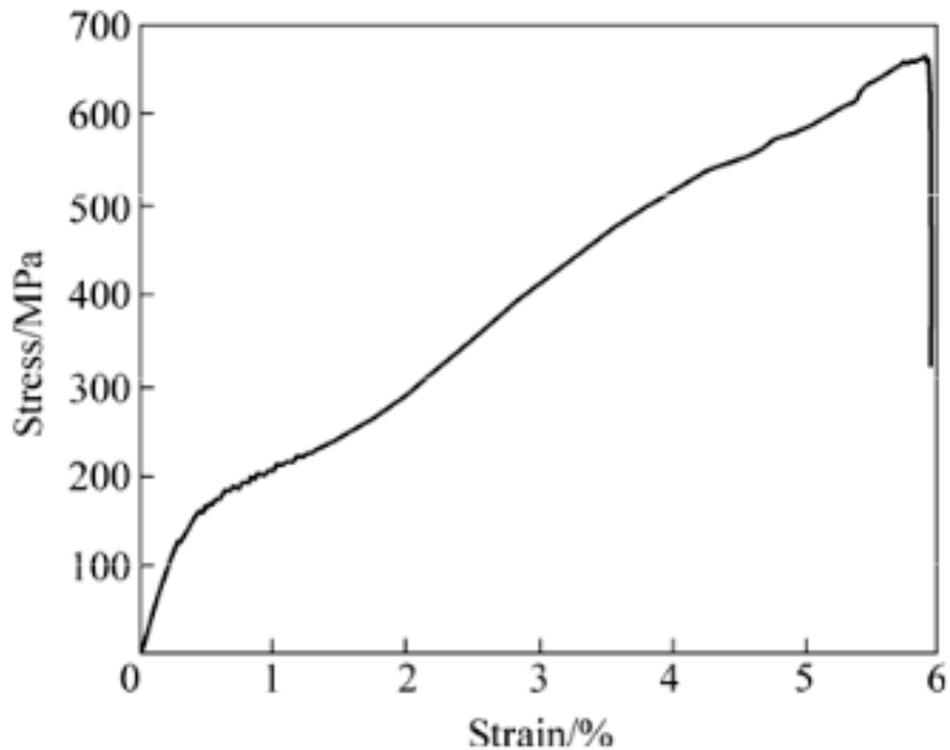
Weld sample No.	Power percent/%	Impulse width/ms	Impulse frequency/Hz
1	15	1.5	4
2	15	1.9	5.5
3	15	2.3	7
4	18	1.5	5.5
5	18	1.9	7
6	18	2.3	4
7	21	1.5	7
8	21	1.9	4
9	21	2.3	5.5

Εικόνα 4.10 : Παράμετροι (παροχή ισχύος, διάρκεια παλμών δέσμης laser, συχνότητα laser) μικρο-κατεργασίας συγκόλλησης με τη χρήση laser, φύλλων κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm [76].

Sample No.	Tensile strength/MPa
1	522
2	265
3	613
4	397
5	450
6	353
7	445
8	683
9	623
Base metal	705

Εικόνα 4.11 : Αντοχή σε εφελκυσμό συγκολλημένων φύλλων κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm με τη χρήση laser, για διάφορες τιμές παραμέτρων (παροχή ισχύος, διάρκεια παλμών δέσμης laser, συχνότητα laser), που αντιστοιχούν στην Εικόνα 4.10 [76].

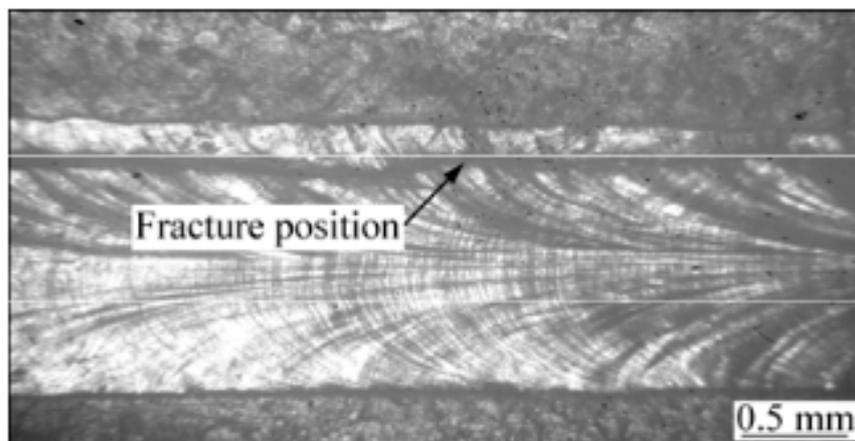
Η Εικόνα 4.12 [76] απεικονίζει το γράφημα τάσεων-παραμορφώσεων του συγκολλημένου δείγματος 8, που αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 4.12 : Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων συγκολλημένων φύλλων κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm με τη χρήση laser [76].

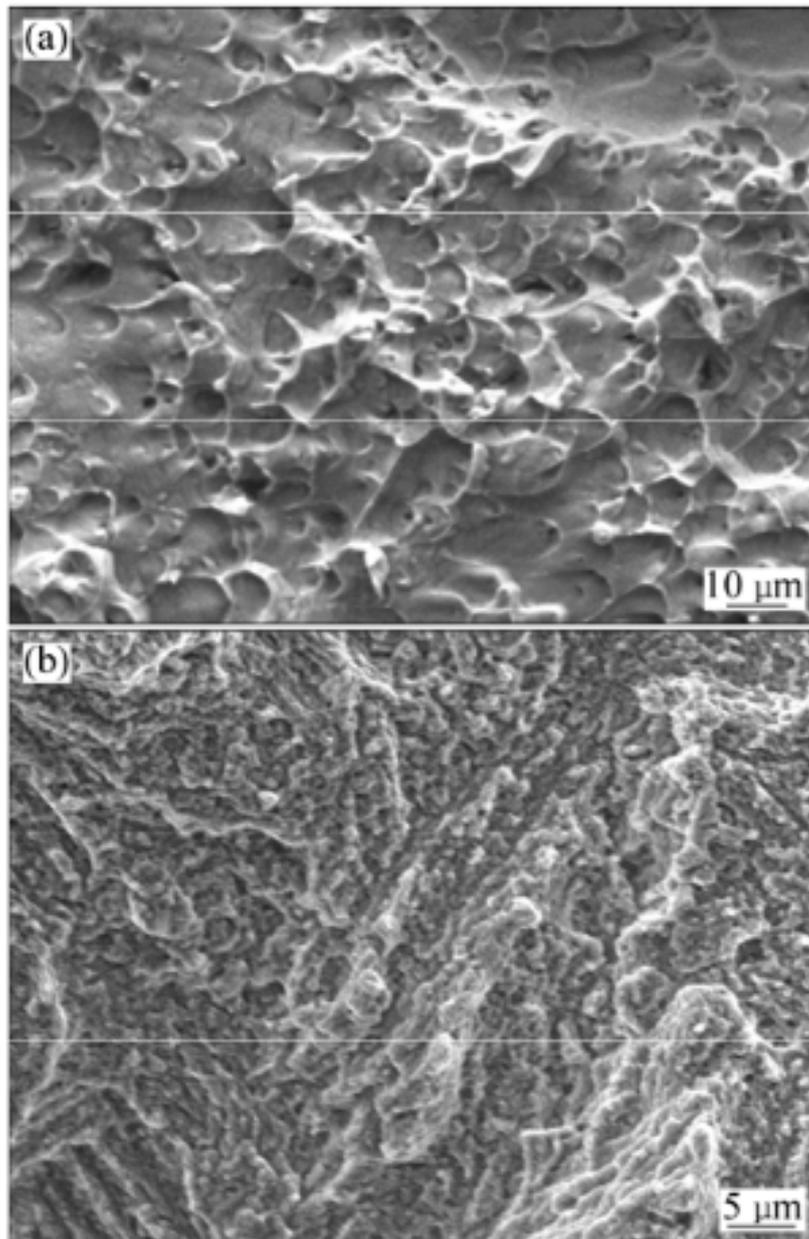
Η καμπύλη φανερώνει ότι η κατεργασία με micro-laser μπορεί να δώσει αποτελέσματα υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, για τους συνδέσμους συγκόλλησης. Το ποσοστό παραμόρφωσης του τεμαχίου στο οποίο παρατηρείται ρωγμή, είναι 5,8%, τιμή που πλησιάζει στο 95% αυτή του αρχικού, μη συγκολλημένου κράματος. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων είναι ομαλή και συνεχής σε όλα τα εύρη της φόρτισης [76].

Και στις εννέα ομάδες παραμέτρων που δοκιμάστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία (ποσοστό ισχύος, συχνότητα παλμών και διάρκεια παλμών), παρουσιάστηκε το φαινόμενο ρωγμής κοντά στην ακμή ραφή συγκόλλησης, κοντά στη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα κατεργασίας (heat affected zone HAZ), όπως φαίνεται για μία από αυτές στην Εικόνα 4.13 [76].



Εικόνα 4.13 : Συνήθης θέση ρωγμής που προκαλείται από δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό, συγκολλημένων φύλλων κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm με τη χρήση laser [76].

Ρήγματα που έχουν τη μορφή μικρών λάκκων είναι το χαρακτηριστικό της επιφάνειας των ρωγμών στο αρχικό, μη συγκολλημένο φύλλο κράματος Ni-Ti που φαίνεται στην Εικόνα 4.14a, γεγονός που παραπέμπει σε όλκιμο τύπο ρωγμών και η επιφάνεια θραύσης έχει μορφή που δείχνει να περιλαμβάνει συνδυασμό ρωγμών που προέρχονται από διάτμηση και εφελκυσμό. Αντίθετα με το αρχικό, μη συγκολλημένο κράμα, το συγκολλημένο τεμάχιο παρουσιάζει μεν μορφολογία ρωγμών όλκιμου τύπου, στην επιφάνεια θραύσης, όμως, δεν υπάρχουν εμφανή σημάδια ή λάκκοι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14b.



Εικόνα 4.14 : Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης SEM από δοκιμαζόμενα σε αντοχή εφελκυσμού: α) φύλλα κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm και β) συγκολλημένα φύλλα κράματος Ni-Ti πάχους 0,2mm με τη χρήση laser [76].

#### 4.5.3.2 ΜΙΚΡΟ-ΔΟΜΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΩΝ ΦΥΛΛΩΝ ΝΙ-ΤΙ

Λόγω της μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας της συγκόλλησης με laser και του μικρού χρόνου επαφής του laser με τη ζώνη συγκόλλησης, μόνο ένα μικρό μέρος της ζώνης συγκόλλησης θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Εάν προσθέσουμε και τον γρήγορο ρυθμό ψύξης της ζώνης συγκόλλησης, έχουμε ως αποτέλεσμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

να μην είναι προφανής η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (heat affected zone HAZ). Ο ρυθμός αύξησης της θερμότητας στο κέντρο της ζώνης HAZ του συγκολλημένου τεμαχίου είναι ο μικρότερος και αυτός κοντά στη ζώνη τήξης ο μεγαλύτερος, λόγω της μικρής αγωγιμότητας του κράματος Ni-Ti. Αποτέλεσμα είναι να προάγεται η διύλιση των κόκκων υλικού στο κέντρο της ραφής ενώ κοντά στη ζώνη τήξης, οι κόκκοι στοιχίζονται σε στήλες κρυστάλλων υλικού [76].

#### **4.5.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟ-ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΦΥΛΛΩΝ NI-TI ΠΑΧΟΥΣ 0,2mm ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ MICRO-LASER**

Τα κύρια σημεία που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ως αναφορά για τη μικρο-συγκόλληση με laser, είναι τα ακόλουθα:

- εξασφαλίζοντας καλές και σταθερές συνθήκες κατεργασίας μικρο-συγκόλλησης, μπορούμε να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα με καλής ποιότητας επιφάνεια συγκόλλησης και ραφής. Η μικρο-δομή του εσωτερικού της ζώνης συγκόλλησης αποτελείται από μεμονωμένους κόκκους υλικού ενώ η εξωτερική, κοντά στη ζώνη τήξης, στοιχίζεται σε στήλες κρυστάλλων [63,76]
- η αντοχή σε εφελκυσμό του συγκολλημένου τεμαχίου μπορεί να φθάσει έως και 97% της αντοχής του αρχικού, μη συγκολλημένου κράματος [63,76]
- όταν το συγκολλημένο τεμάχιο ανοπτηθεί στο κενό μετά το πέρας της κατεργασίας, η διαδικασία των φάσεων [63,76]
- μετασχηματισμού παραμένει όμοια με αυτή του αρχικού κράματος, όπως αποδεικνύουν οι δοκιμές με τη μηχανή θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης (differential scanning calorimetry DSC). Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει προφανής απώλεια των ιδιοτήτων μνήμης σχήματος του συγκολλημένου τεμαχίου σε σχέση με το αρχικό κράμα Ni-Ti [63,76].

## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ [77]

---

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην πράξη, πλήθος εφαρμογών οι οποίες χρησιμοποιούν ξεχωριστά κάθε μία από τις μοναδικές ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος έχουν αναπτυχθεί, κατοχυρώσει τη μοναδικότητά τους και εμπορευθεί σε όλον τον κόσμο. Η ενότητα αυτή παρουσιάζει παραδείγματα των εφαρμογών αυτών εξηγώντας παράλληλα τις σχεδιαστικές επιλογές και τη λογική που αυτές έγιναν, τους περιορισμούς επιλογής υλικών που τέθηκαν και τη συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA). Τα ακόλουθα παραδείγματα είναι ταξινομημένα κατά εργοστασιακό κλάδο για να γίνεται φανερή η ποικιλία και το εκτεταμένο εύρος χρήσης των εφαρμογών [77].

### 5.2 ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ – ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ

Πολλές από τις πρώτες ιδέες προϊόντων και εφαρμογών που χρησιμοποιούσαν κράματα μνήμης σχήματος (SMA) ήταν πρωτοπόρες στους τομείς της αεροναυπηγικής και της αεροδιαστημικής. Τα κράματα μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αυτών των εργοστασιακών κλάδων για να επωφεληθούμε από ιδιότητες όπως υψηλή αναλογία ισχύος προς μάζα και ιδανική συμπεριφορά αντίδρασης σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας. Σχεδιασμοί που αξιοποιούν τις ιδιότητες αυτές, αντικαθιστούν βαρύτερους, πιο πολύπλοκους μηχανισμούς χάρη στο μειωμένο βάρος, την απλότητά και την αξιοπιστία τους [77].

#### 5.2.1. Cryofit® ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

Οι υδραυλικοί σύνδεσμοι αποτέλεσαν την πρώτη εμπορικά επιτυχημένη εφαρμογή κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA). Το 1969 η Raychem Corporation εισήγαγε τον υδραυλικό σύνδεσμο σωλήνων τύπου shrink-to-fit που χρησιμοποιήθηκε στα μαχητικά αεροσκάφη F-14 κατασκευασμένα από την Grumman Aerospace Corporation. Ο σύνδεσμος αυτός αποτελείται από ένα κράμα νικελίου-τιτανίου-

σιδήρου Ni-Ti-Fe του οποίου η μαρτενσιτική θερμοκρασία μετασχηματισμού (Ms) είναι κάτω από τους  $-120^{\circ}\text{C}$ . Είναι κατεργασμένος σε θερμοκρασία δωματίου, με εσωτερική διάμετρο περίπου 4% μικρότερη από την εξωτερική διάμετρο της σωλήνωσης πάνω στην οποία θα κληθεί να εφαρμόσει. Όταν ψύχεται κάτω από τους  $-120^{\circ}\text{C}$  από ψυχρό άζωτο, ο σύνδεσμος ωθείται σε διάμετρο 4% μεγαλύτερη από τη σωλήνωση, επιτυγχάνοντας συνολική εσωτερική παραμόρφωση περίπου 8%. Όταν θερμανθεί πέρα από το εύρος θερμοκρασιών μετασχηματισμού του κράματος (Transformation temperature range TTR), η διάμετρος του συνδέσμου μειώνεται και τελικά έχουμε μια σφιχτή σφράγιση του με τη σωλήνωση [78].

Αυτή η εφαρμογή περιορισμένης ανάκτησης των κραμάτων μνήμης σχήματος συνεχίζει και σήμερα να είναι επιτυχημένη εμπορικά και οικονομικά. Παρά τις αντικειμενικές δυσκολίες ψύξης των συνδέσμων σε θερμοκρασίες ψυχρού αζώτου για λόγους επέκτασης και αποθήκευσης, ο αεροδιαστημικός κλάδος απολαμβάνει τα πολλαπλά προτερήματα σε σχέση με τις κλασσικές τεχνικές συνένωσης σωληνώσεων, όπως η απλή και η σκληρή συγκόλληση. Η υλοποίησή τους είναι απλή, λιγότερο δαπανηρή και δεν απαιτεί υψηλά επίπεδα ικανότητας του χρήστη. Η αντικατάσταση των συνδέσμων και των υδραυλικών γραμμών μιας σωλήνωσης είναι απλή και η πιθανότητα ανόπτησης και καταστροφής των υδραυλικών γραμμών, σε αντίθεση με τις απλές συγκολλήσεις, εκμηδενίζεται [3].

### 5.2.2. Frangibolt® ΚΟΧΛΙΕΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ

Οι κοχλίες απελευθέρωσης αποτελούμενες από κράμα μνήμης σχήματος σχεδιάστηκαν από την TiNi Alloy Company για να αντικαταστήσουν τις συμβατικές συσκευές κοχλιών στους μηχανισμούς αεροδιαστημικής απελευθέρωσης. Οι κοχλίες χρησιμοποιούνται για την προσθήκη αξεσουάρ του διαστημοπλοίου κατά την εκτόξευση και την απόρριψή τους μετά από αυτήν, χρησιμοποιώντας ένα ενεργοποιούμενο θερμαινόμενο στοιχείο [79]. Ένας κύλινδρος, από κράμα μνήμης σχήματος ευρισκόμενο στη μαρτενσιτική φάση λειτουργίας του, συμπιέζεται και συναρμολογείται σε έναν οδοντωτό κοχλία. Όταν ενεργοποιείται από έναν ηλεκτρικό θερμαντήρα, ο κύλινδρος αυξάνει το μήκος του και εφαρμόζει δύναμη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

μεγαλύτερη από 22kN (5000lb), ώστε να πετύχει θραύση στην εγκοπή του κοχλία [80].

Αυτοί οι κοχλίες απελευθέρωσης χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία στο διαστημόπλοιο Clementine το 1994 και έκτοτε έχουν βελτιωθεί μετά από σχεδιασμούς που έγιναν με σκοπό τον εκμηδενισμό:

- των κινδύνων από έκλυση αερίων
- την τυχαία ενεργοποίηση κατά την αποστολή και
- των καταστροφών στο διαστημόπλοιο από τις εκρήξεις,

για τους συμβατικούς εκρηκτικούς μηχανισμούς.

### **5.2.3. ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗΣ ΚΙΝΗΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ SOJOURNER ΣΤΟΝ ΑΡΗ**

Κατά τη διάρκεια της πιο πρόσφατης αποστολής Pathfinder/Sojourner στον Άρη, ένα σύρμα από κράμα μνήμης σχήματος χρησιμοποιήθηκε για να ενεργοποιήσει μια γυάλινη πλάκα πάνω από ένα ηλιακό κύτταρο της κινητής μονάδας που πάτησε στον πλανήτη. Ένα πείραμα συγκόλλησης υλικού που εκτελέστηκε κατά της διάρκεια της αποστολής, χρησιμοποίησε τον ενεργοποιητή για να αντικαταστήσει μεγάλους και βαρείς κινητήρες. Ένα απλό σύρμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti θερμαίνεται και, μέσω μηχανισμού, ασκεί δύναμη στη γυάλινη πλάκα μετακινώντας την, για να καταστεί δυνατή η σύγκριση της έντασης του ηλιακού φωτός με και χωρίς την πλάκα. Το ποσοστό συλλογής σκόνης προσδιορίστηκε στη συνέχεια και τα δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό μεθόδων καθαρισμού για τις μελλοντικές αποστολές στον Άρη [81].

### **5.2.4. ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ**

Ένα πρωτότυπο κατασκευής διαστημικής κεραίας κατασκευάστηκε από την Goodyear Aerospace Corporation. Ήταν σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει διπλωμένο συμπαγώς σε θερμοκρασία δωματίου και, όταν θερμαίνεται με ηλιακή ενέργεια, να απλώνεται σε μια πολύ εκτεταμένη μορφή κεραίας. Παρόλο που δεν έγινε μεγάλη εμπορική επιτυχία, το σενάριο ήταν εφικτό και το πρωτότυπο αποτέλεσε τη βάση για παρόμοια σχέδια που εφαρμόζονται στην αεροδιαστημική βιομηχανία [3].

### 5.2.5. ΕΞΥΨΗΝΑ ΦΤΕΡΑ ΑΕΡΟΠΛΑΝΩΝ

Σύνθετες δομές με ενσωματωμένα σύρματα κραμάτων μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται για την αλλαγή του σχήματος φτερών αεροπλάνων. Τα σύρματα μπορούν να ενεργοποιούνται:

- είτε βελτιώνοντας έτσι τα χαρακτηριστικά του φτερού, απορροφώντας τις δονήσεις, μεταβάλλοντας τον σχετικό συντελεστή τους
- είτε να αλλάζουν το σχήμα του φτερού, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά.

Οι ιδιότητες αυτές μπορούν χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενός ευπροσάρμοστου φτερού που μεταβάλλεται ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες βελτιώνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητά του και μειώνοντας τα επίπεδα θορύβου εντός της καμπίνας [77].

### 5.2.6. ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΙ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΕΣ ΔΟΝΗΣΗΣ

Οι αποσβεστήρες δόνησης αποτελούνται από σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούν ενσωματωμένα, προτεταμένα καλώδια ή κορδέλες κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA) και μπορούν να μειώσουν τις ανεπιθύμητες κινήσεις σε διάφορα διαστημικά συστήματα. Ένας αισθητήρας ανιχνεύει τους κραδασμούς στο σύστημα και στέλνει σήμα που ενεργοποιεί το ενσωματωμένο σύνθετο υλικό, το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλει τη δομή της δυναμικής του συστήματος, απορροφώντας ή ακυρώνοντας την υφιστάμενη δόνηση [82].

## 5.3 ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Οι συσκευές και τα συστατικά τους που αποτελούνται από κράματα μνήμης σχήματος (SMA) βρίσκονται σε προϊόντα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για περισσότερο από 20 χρόνια. Παρόλο που πολλοί καταναλωτές που τα χρησιμοποιούν είναι απληροφόρητοι για τα SMA συστατικά τους, υπάρχει μια αυξανόμενη ευαισθητοποίηση του κοινού για τα SMA λόγω πρόσφατων εμπορευομένων προϊόντων που προβάλλουν τα προτερήματά τους [77].

### **5.3.1. Flexon® ΥΠΕΡ-ΕΛΑΣΤΙΚΟΙ ΣΚΕΛΕΤΟΙ ΟΠΤΙΚΩΝ**

Οι υπερ-ελαστικοί σκελετοί γυαλιών που κατασκευάζονται από την Marchon Eyewear, Inc. είναι μια από τις πιο ευρέως γνωστές χρήσεις των κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA). Διαφημίζονται συχνά και μπορεί κανείς να τους αγοράσει στα περισσότερα καταστήματα λιανικής πώλησης οπτικών. Τα συστατικά των σκελετών που είναι τα πιο επιρρεπή σε κάμψη, η γέφυρα και τα στηρίγματα, είναι από σύρμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti και τα υπόλοιπα μέρη τους από συμβατικά υλικά για την εξοικονόμηση κόστους. Λόγω της υψηλής ικανότητας ανάκτησης του σχήματος τους, τα πλαίσια αυτά είναι πολύ ανθεκτικά στην παραμόρφωση και τη στρέψη. Η Marchon Eyewear, Inc. είναι γνώστης των υψηλών παραμορφώσεων και ορίων κόπωσης του κράματος και τα προβάλλει ανάλογα στα φυλλάδια του προϊόντος, όπου αναφέρεται ότι υψηλές κάμψεις και στρέψεις του υλικού είναι εντός των προδιαγραφών σχεδιασμού του [77].

### **5.3.2. ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΗΛΕΦΩΝΩΝ**

Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για κινητά τηλέφωνα έχει οδηγήσει σε εφαρμογή εκτεταμένου όγκου του υπερελαστικού κράματος νικελίου τιτανίου Ni-Ti, καθώς οι περισσότερες κεραίες κινητών τηλεφώνων που παράγονται σήμερα αποτελούνται από σύρματα νικελίου -τιτανίου Ni-Ti επικαλυμένα με πολυουρεθάνη. Η ιδιότητα της υπερελαστικότητας του κράματος αντιστέκεται στις μόνιμες στρεβλώσεις και αντέχει τις καταχρήσεις κατά τη διάρκεια ζωής του τηλεφώνου [77].

### **5.3.3. ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ**

Ένα κράμα μνήμης σχήματος που εκμεταλλεύεται την ιδιότητα αλλαγής σχήματος ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, λειτουργεί ως ενεργοποιητής για να ανοίξει ή να κλείσει τα παράθυρα θερμοκηπίου σε προκαθορισμένες θερμοκρασίες. Η συσκευή αποτελείται από ένα ελατήριο χαλκού-ψευδαργύρου-αργιλίου Cu-Zn-Al με μνήμη σχήματος και ένα συμβατικό μεταλλικό ελατήριο ωθήσεως. Το ελατήριο κράματος συμπιέζεται από το συμβατικό σε θερμοκρασίες κάτω των 18°C, οπότε το παράθυρο παραμένει κλειστό.

Το ελατήριο ενεργοποιείται στους 25°C και υπερνικώντας την αντίσταση του συμβατικού, ανοίγει το παράθυρο. Ο σχεδιασμός βασίζεται σε ενεργοποιητή με μειωμένη θερμική υστέρηση, χρησιμοποιώντας μια δύναμη ωθήσεως. Καθώς το κράμα χαλκού-ψευδαργύρου-αργιλίου Cu-Zn-Al ψύχεται στους 18°C, αν και δεν είναι τόσο ψυχρό ώστε να μετασχηματιστεί εντελώς στην εύκαμπτη μαρτενσιτική του φάση, είναι επαρκώς μετασχηματισμένο για να προκαλέσει παραμόρφωση μέσω φόρτισης και να ενεργοποιήσει τον πιο πάνω μηχανισμό [83].

#### **5.3.4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΥΡΟΜΕΝΗΣ ΠΟΡΤΑΣ**

Ένας οδηγός κίνησης μνήμης σχήματος σχεδιάστηκε από την The Foxboro Company στις αρχές της δεκαετίας του 1970, για να αντικαταστήσει τους συμβατικούς μηχανισμούς οδηγών, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν ένα γαλβανόμετρο για την ενεργοποίηση κάθε βραχίονα. Η συσκευή χρησιμοποιεί προτανυσμένα σύρματα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti σε κάθε μονάδα οδηγού, τα οποία ενεργοποιούνται θερμαινόμενα από ένα πηνίο επαγωγής ανταποκρινόμενο σε σήματα εισόδου. Η νέα σχεδίαση μείωσε τα κινούμενα μέρη του μηχανισμού και το κόστος κατασκευής ενώ παράλληλα αύξησε την αξιοπιστία του. Μέσα σε 10 χρόνια από την εμφάνισή του είχαν παραχθεί περισσότερες από 500.000 μονάδες προϊόντος [78,83].

#### **5.3.5. ΜΠΑΣΤΟΥΝΙΑ NICKLAUS GOLF CLUB**

Υπερ-ελαστικά ένθετα κραμάτων μνήμης σχήματος σχεδιάστηκαν από την Memry Corporation για μια σειρά μπαστουνιών του διάσημου Nicklaus golf club. Οι ιδιότητες απόσβεσης του κράματος κρατά περισσότερο χρόνο την μπάλα σε επαφή με το μπαστούνι επιτυγχάνοντας καλύτερα spin και ακριβέστερο έλεγχο του χτυπήματος [84].

#### **5.3.6. ΘΕΡΜΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΑΛΟΡΙΦΕΡ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ**

Ενεργοποιητές κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA) χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση θερμοκρασίας οικιακών καλοριφέρ. Όταν η θερμοκρασία του χώρου υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή, ο

ενεργοποιητής διαστέλλεται και υπερνικά μια δύναμη ωθήσεως ελατηρίου κλείνοντας τη βαλβίδα ζεστού νερού του καλοριφέρ. Βοηθούμενη από την ώθηση του ελατηρίου, η θερμοκρασία υστέρησης του κράματος μπορεί να γίνει πολύ μικρή, ακόμη και 1,2°C. Η θερμοστατική βαλβίδα μπορεί να προσαρμοστεί μέσω ενός κομβίου που μεταβάλλει την πίεση που ασκεί το ελατήριο (όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση που ασκεί, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί ο SMA ενεργοποιητής και να κλείσει τη βαλβίδα ζεστού νερού) [78,83].

### 5.3.7. ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΒΡΑΣΤΗΡΑ ΡΥΖΙΟΥ

Μηχανισμοί βαλβίδων από κράμα μνήμης σχήματος (SMA) χρησιμοποιούνται επιτυχώς για τη βελτίωση της απόδοσης βραστήρων ρυζιού. Ο μηχανισμός, που αποτελείται από ένα ελατήριο SMA και ένα ακόμη ελατήριο ωθήσεως, εισάγεται στην κορυφή του καπακιού ενός βραστήρα ρυζιού. Η βαλβίδα είναι ανοικτή όσο το ρύζι μαγειρεύεται και παράγεται ατμός, όταν, όμως, ολοκληρωθεί το βράσιμό του, το SMA ελατήριο ψύχεται, υπερνικά την αντίσταση του ελατηρίου ωθήσεως και κλείνει τη βαλβίδα, διατηρώντας το ρύζι ζεστό. Κράμα νικελίου-τιτανίου-χαλκού Ni-Ti-Cu χρησιμοποιείται για την κατασκευή του SMA ελατηρίου, λόγω της χαμηλής του φόρτισης και την υψηλή του αντοχή σε κόπωση. Αν και η δυνατότητα επανάκαμψης μειώνεται με τους επαναλαμβανόμενους κύκλους, η εφαρμογή έχει επιδείξει αντοχή για περισσότερους από 30.000 κύκλους, που αντιστοιχεί σε καθημερινές δραστηριότητες για 10 περίπου χρόνια [85].

### 5.3.8. ΡΟΜΠΟΤ ΜΕ ΑΝΘΡΩΠΙΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Καλώδια ενεργοποίησης από κράματα μνήμης σχήματος SMA χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση χεριών και ποδιών του ρομπότ, ώστε να προσεγγίσουν τις κινήσεις του ανθρώπινου σώματος. Η εφαρμογή είναι τεχνικά εφικτή και το πρωτότυπο ήταν επιτυχές, ωστόσο η ισχύς που απαιτείται για την ενεργοποίησή της είναι πολύ υψηλή. Οι αλλαγές μπαταρίας που απαιτεί η λειτουργία της συσκευής είχε ως αποτέλεσμα την περιορισμένη εμπορική αποδοχή του προϊόντος [77].

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

### 5.3.9. ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Η Furukawa Electric Co. Ltd. της Ιαπωνίας κατασκεύασε γρίλιες από SMA για air-condition μηχανήματα, οι οποίες διοχετεύουν τον αέρα με φορά προς τα πάνω ή κάτω ανάλογα με τη θερμοκρασία του.

Επίσης, κατασκευάζουν καφετιέρες που χρησιμοποιούν βαλβίδες ελέγχου θερμοκρασίας από SMA, οι οποίες αποφασίζουν την εκκίνηση της παραγωγής καφέ όταν το νερό αρχίσει να βράζει [86].

Άλλα προϊόντα που παράγονται με τη χρήση SMA είναι υπερ-ελαστικά καλάμια αλιείας, υπερ-ελαστικά ακουστικά για το minidisk Walkman® από την SONY Eggo™ καθώς και κουταλάκια ανάδευσης ζεστών ροφημάτων, τα οποία αποκτούν λυγισμένο σχήμα όταν έρχονται σε επαφή με το ζεστό υγρό.

## 5.4 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Πολλές συσκευές ασφαλείας, ελέγχου (πχ. θερμοκρασίας) και ενεργοποιητή κάποιας συσκευής παράλληλα, έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τα παραδείγματα που ακολουθούν έχουν γίνει αντικείμενο εμπορίου λιανικής ή βιομηχανικής πώλησης [77].

### 5.4.1. ΒΑΛΒΙΔΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΕΓΚΑΥΜΑ (Antiscald MemrySafe® Valve)

Μια βαλβίδα από κράμα μνήμης σχήματος σχεδιάστηκε από την Memry® για τη διακοπή παροχής νερού από μια βρύση όταν η θερμοκρασία του νερού γίνει πολύ υψηλή (συνήθως πάνω από 50°C). Η βαλβίδα ανοίγει πάλι όταν το νερό αποκτήσει χαμηλότερη θερμοκρασία, προστατεύοντας τον χρήστη από πιθανό έγκαυμα. ShowerGard®, BathGard® και Flow-Gard® είναι παρόμοια προϊόντα και όλα διατίθενται στην αγορά [77].

### 5.4.2. ΒΑΛΒΙΔΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Πρόκειται για μια συσκευή ασφαλείας που χρησιμοποιεί έναν ενεργοποιητή από κράμα μνήμης σχήματος για να κλείσει μια παροχή αερίου σε περίπτωση πυρκαγιάς, που συναντάται συχνά σε βιομηχανικές γραμμές παραγωγής. Η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

θέτει σε λειτουργία τη βαλβίδα SMA και διακόπτει την πνευματική πίεση μέσω της οποίας ελέγχονται φιάλες εύφλεκτων αερίων [87].

#### **5.4.3. ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ**

Κράματα μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αυτόματων διακοπών κυκλωμάτων, για να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς. Λόγω των υψηλών δυνάμεων που απαιτούνται σε διακόπτες μεγάλων κυκλωμάτων, χρησιμοποιείται μια σειρά μοχλών για να ενισχύσουν τις δυνάμεις που δημιουργούνται από τους διακόπτες. Κράμα χαλκού-αργιλίου-νικελίου Cu-Al-Ni χρησιμοποιείται κυρίως, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ενεργοποίησης και της χαμηλής υστέρησής τους. Απλές διατάξεις δέσμης μοχλών πολλαπλασιάζουν την παρεχόμενη δύναμη από τον διακόπτη και καλύπτουν την ανάγκη χωρίς την λειτουργία μεγάλων μοχλών [77].

#### **5.4.4. ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ Proteus®**

Σε μια τέτοια συσκευή ένας κρίκος της κατασκευάζεται από κράμα χαλκού-ψευδαργύρου-αργιλίου Cu-Zn-Al για να αλλάξει σχήμα σε υψηλές θερμοκρασίες και να ενεργήσει ως μηχανισμός απελευθέρωσης. Η απελευθέρωση μπορεί να ενεργοποιεί συστήματα πυρόσβεσης ή πόρτες στεγανών ώστε να κλείσουν, ανάλογα με τη διάταξη που την χρησιμοποιεί [88].

#### **5.4.5. ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ**

Διακλαδώσεις από κράμα χαλκού-ψευδαργύρου-αργιλίου Cu-Zn-Al σε συνδυασμό με ασφάλειες υψηλής ευαισθησίας χρησιμοποιούνται σε όλη την Ευρώπη για την προστασία των συστημάτων επικοινωνίας από τους κεραυνούς. Κατά την κανονική λειτουργία, η ασφάλεια θερμαίνεται πιο γρήγορα από την SMA διακλάδωση, η οποία παραμένει ανενεργή. Υπό βαριά χρήση, όμως, η διακλάδωση ανεβάζει πολύ γρήγορα τη θερμοκρασία της, ενεργοποιεί το SMA και διοχετεύει τη ροή στον εναλλακτικό κλάδο της, μακριά από την ασφάλεια, για να την προστατέψει από μια καταστροφική θερμοκρασία [88].

#### 5.4.6. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΔΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΩΝ

Μία συσκευή από κράμα μνήμης σχήματος έχει σχεδιασθεί για την κατάσβεση πυρκαγιών στους δημόσιους κάδους απορριμάτων. Το καπάκι του κάδου διαθέτει μηχανισμό SMA που το κρατάει ανοικτό σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Όταν, όμως, θερμαίνεται από πυρκαγιά στο εσωτερικό του κάδου, το κράμα μεταβάλλει το σχήμα του, απελευθερώνοντας το στήριγμα του καπακιού, το οποίο πέφτει και βοηθάει στην κατάσβεση της φωτιάς [77].

### 5.5 ΙΑΤΡΙΚΗ

Ο ιατρικός κλάδος έχει ραγδαία αποδοχή των κραμάτων μνήμης σχήματος, σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Από απλές βελόνες μέχρι σύνθετα επιθέματα που εμφυτεύονται στην κυκλοφορία του αίματος, το κράμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti έχει υιοθετηθεί από τη βιομηχανία για την ικανότητά του να προσφέρει μοναδικές και ιδανικές λύσεις σε παραδοσιακές ιατρικές προκλήσεις. Γνωστό για την εξαιρετική του βιοσυμβατότητα και αντίσταση στη διάβρωση, το κράμα Ni-Ti έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλές ιατρικές συσκευές και είναι πλέον ευρέως αποδεκτό από την ιατρική επιστήμη.

Η πλειοψηφία των SMA εφαρμογών στην ιατρική χρησιμοποιούν την υπερ-ελαστική ιδιότητα του κράματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti και πολλές από αυτές βρίσκονται στον αναπτυσσόμενο τομέα της μικρο-επεμβατικής χειρουργικής. Λόγω της ικανότητας επαναφοράς των στελεχών του κράματος Ni-Ti από υψηλές φορτίσεις, τα συστατικά του μπορούν να απορροφήσουν ακραίες αλλαγές του σχήματός τους διερχόμενα από οπές πολύ μικρού πλάτους κατά την επέμβαση και στη συνέχεια να αναπτυχθούν σε συσκευές πλήρους σχήματος, ευρισκόμενα εντός του ανθρωπίνου σώματος. Η χρήση των συσκευών αυτών έχει ελαχιστοποιήσει την ανάγκη χειρουργείων ανοιχτής καρδιάς και, ως εκ τούτου, τον κίνδυνο για τους ασθενείς και την περίοδο ανάρρωσης εντός των νοσοκομείων [77].

#### 5.5.1. ΟΡΘΟΔΟΝΤΙΚΑ ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΑ ΚΥΡΤΑ ΣΥΡΜΑΤΑ

Μία από τις πρώτες εφαρμογές κραμάτων μνήμης σχήματος SMA, σχεδιάστηκε το 1977 για να αντικαταστήσει τα σύρματα από

ανοξειδωτο χάλυβα που χρησιμοποιούνταν έως τότε για την ευθυγράμμιση των δοντιών. Τα σύρματα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στη μαρτενσιτική τους φάση, εργαζόμενα σε ψυχρές θερμοκρασίες, οπότε και παραμορφώνονταν γύρω από το δόντι. Αν και τα αποτελέσματα επαναφοράς των δοντιών ήταν ενθαρρυντικά, αργότερα χρησιμοποιήθηκαν σύρματα από κράμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti στην ωστενιτική του φάση, για βελτίωση της απόδοσης του προϊόντος. Το υπερ-ελαστικό σύρμα σχεδιάζεται πλέον για να εκμεταλλεύεται την περιοχή της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων όπου η πίεση που ασκείται στα δόντια είναι σχεδόν σταθερή, καθώς το σύρμα ανακτά το σχήμα του και ευθυγραμμίζει την οδοντοστοιχία [77].

### 5.5.2. ΣΥΡΜΑ – ΒΕΛΟΝΑ Mitek Homer Mammalok®

Η Mitek Surgical Products Inc. σχεδίασε το 1985 ένα υπερ-ελαστικό σύρμα-βελόνα που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της θέσης και της υφής όγκων μαστού, ώστε να καταστήσει τη χειρουργική επέμβαση λιγότερο επεμβατική. Η βελόνα παίζει το ρόλο καθετήρα για τον πλήρη προσδιορισμό της θέσης του όγκου, αφού πρώτα έχει ανιχνευθεί με μαστογραφία. Οι χειρουργοί δυσκολεύονται να διακρίνουν τον όγκο από τον περιβάλλοντα ιστό κατά τη διάρκεια μιας επέμβασης, έτσι η σηματοδότηση της ακριβούς θέσης του διευκολύνει τη χειρουργική διαδικασία [89].

### 5.5.3. Mitek ΑΓΚΥΡΕΣ ΡΑΜΜΑΤΩΝ

Αποτελούνται από σώμα τιτανίου Ti ή κράμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti που έχει δύο ή περισσότερα τόξα υπερ-ελαστικού κράματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti. Είναι αξιόπιστα, ασφαλή και κρατούν τα ράμματα σε ακριβή θέση για την επανατοποθέτηση τενόντων, συνδέσμων και μαλακών ιστών στα οστά. Οι άγκυρες γαντζώνουν σε μια οπή που διανοίγεται εντός των οστών του ασθενούς και κλειδώνουν τη θέση τους με τα τόξα Ni-Ti.

Το 1989 η Mitek Surgical Products, Inc. εισάγει τις άγκυρες σε χειρουργική επέμβαση στον ώμο, για να σταθεροποιήσει τα ράμματα στα οστά. Από τότε η εταιρία έχει επεκτείνει τη σειρά προϊόντων για χρήση σε πλήθος άλλων χειρουργικών εφαρμογών, όπως για την επανατοποθέτηση προσθίου χιαστού συνδέσμου στο γόνατο [90].

#### 5.5.4. ΠΥΡΗΝΑΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ - ΟΔΗΓΟΥ

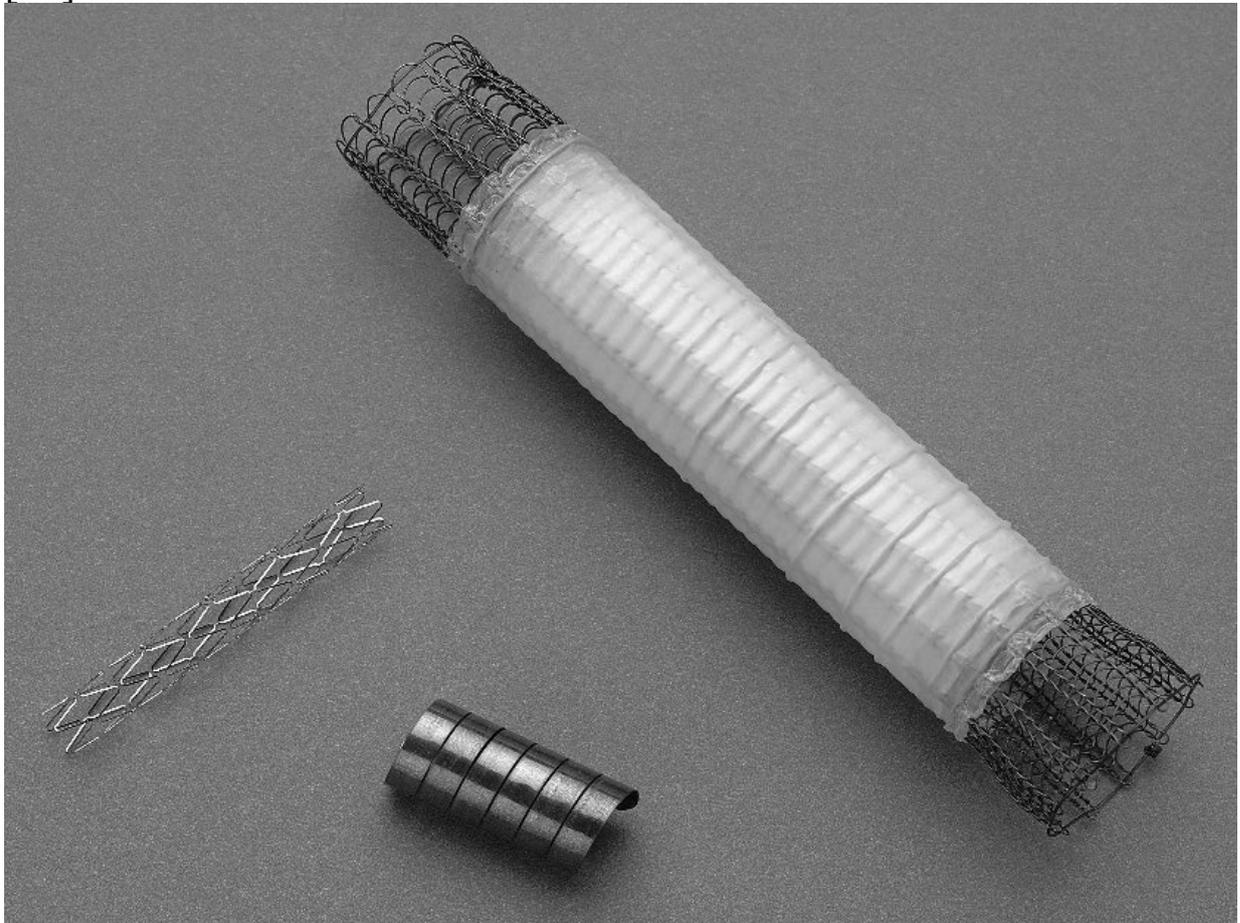
Τα σύρματα-οδηγοί νικελίου-τιτανίου Ni-Ti ταξιδεύουν στα ελικοειδή μονοπάτια του ανθρωπίνου σώματος για να παραδώσουν εργαλεία ή συσκευές για ενδιάμεσες διαδικασίες. Αυτά τα υπερ-ελαστικά σύρματα-οδηγοί είναι τα βέλτιστα για χρήση στην ελάχιστη επεμβατική χειρουργική, όπου οι επεμβάσεις εκτελούνται μέσω μιας μικρής διάνοιξης σε μια μεγάλη αρτηρία και προσφέρουν μεγάλη ευελιξία, αντίσταση στην κάμψη και στη στρέψη για μέγιστη ακρίβεια και ευκολία στην επέμβαση [91].

#### 5.5.5. ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΑ ΕΝΔΟΠΡΟΣΘΕΤΙΚΑ (STENTS)

Τα ενδοπροσθετικά χειρουργικά stents από κράματα μνήμης σχήματος γίνονται συνεχώς πιο δημοφιλή στον ιατρικό χώρο. Τα διαρθρωτικά, αυτά, κυλινδρικά εξαρτήματα σχεδιάστηκαν για να διατηρήσουν ανοικτά και να υποστηρίξουν τα τοιχώματα ροής, αγωγών και άλλων διόδων του ανθρώπινου αίματος και εμφυτεύονται για να αποφευχθεί η κατάρρευση ή η απόφραξη τους αλλά και για να επιδιορθωθούν οι αλλοιώσεις τους. Κράματα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti χρησιμοποιούνται έναντι πιο συμβατικών μετάλλων για τοποθέτηση στη στεφανιαία αρτηρία, αλλά πιο συχνή είναι η χρήση τους σε περιφερειακές θέσεις, όπως η αρτηρία της καρωτίδας, του οισοφάγου και του χοληδόχου πόρου. Διάφορα σχήματα και μορφές των Ni-Ti stents φαίνονται στην Εικόνα 5.1.

Οι ενδοπροσθέσεις που βρίσκονται σήμερα στην αγορά αλλά και σε πειραματικό στάδιο, αξιοποιούν ποικιλία από λειτουργικές ιδιότητες των κραμάτων μνήμης σχήματος SMA: την υπερ-ελαστικότητα της ωστενιτικής φάσης, τη θερμική μνήμη σχήματος και το αποτελεσματικό χαμηλό μέτρο ελαστικότητας της μαρτενσιτικής φάσης του κράματος. Πολλά από τα stents χρησιμοποιούν συνδυασμό υπερ-ελαστικότητας και μνήμης σχήματος. Για παράδειγμα, ένα stent μπορεί να ψύχεται σε κρύο νερό για να μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη, να συμπιέζεται στη μαρτενσιτική φάση, να καλύπτεται με προστατευτικό περίβλημα για να έχει ελάχιστες διαστάσεις προφίλ και τελικά να εισέρχεται εντός του ανθρωπίνου σώματος μέσω οπής ελαχίστων διαστάσεων. Όταν εγκατασταθεί στην τελική του θέση, το

κάλυμμα αποσύρεται, το stent θερμαίνεται στη θερμοκρασία του σώματος και ανακτά το αρχικό του σχήμα. Όταν μετασχηματιστεί σε ωστενίτη, οι υπερ-ελαστικές ιδιότητες έχουν αποτέλεσμα την εφαρμογή ήπιων και σταθερών ακτινικών δυνάμεων επί του τοιχώματος του αγγείου. Στη περίπτωση που το stent είναι μαρτενσιτικό σε θερμοκρασία δωματίου και σώματος, πρέπει να συμπιεστεί (και συνεπώς να θερμανθεί) εντός μπαλονιού για να μεταβεί στην ωστενιτική του φάση και να διασταλεί όταν παραδοθεί στη τελική του θέση. Το Paragon Coronary Stent που σχεδιάστηκε από την Vascular Therapies είναι ένα παράδειγμα μαρτενσιτικού stent που διατίθεται στο εμπόριο με πλεονέκτημα τη συμμετρική επέκτασή του και την ευελιξία του αφού έχει εγκατασταθεί εντός του σώματος [77].



Εικόνα 5.1 : Stents Ni-Ti Nitinol. Από αριστερά: 1) Υπερ-ελαστικό stent (5mm διάμετρος × 40mm μήκος) κομμένο με laser από σωλήνα Ni-Ti, 2) Κορδέλα Ni-Ti εφαρμοσμένη σε ελικοειδές ελατήριο, 3) Ultraflex™ οισοφάγου πλεκτό stent με υφασμάτινο κάλυμμα [77].

#### 5.5.6. Simon Nitinol Filter®

Ένα φίλτρο θρόμβων αίματος εφευρέθηκε από τον Dr. Morris Simon της Nitinol Medical Technologies, Inc. Αποτελείται από σύρμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti διαμορφωμένο σε σχήμα πλαισίου ομπρέλας ή συρμάτινου καλάθιού. Για να εισαχθεί στο ανθρώπινο σώμα, το φίλτρο ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία μετασχηματισμού του και συρρικνώνεται, ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή του σε έναν μικρό σωλήνα. Το φίλτρο ψύχεται από ροή διαλύματος ψυχρού φυσιολογικού ορού κατά την εισαγωγή του στον ασθενή. Στη συνέχεια θερμαίνεται σε θερμοκρασία σώματος και αναπτύσσεται στο αρχικό του σχήμα, την ομπρελοειδή μορφή, η οποία έχει σχεδιασθεί για να παγιδεύει τους θρόμβους στην κυκλοφορία του αίματος και να αποτρέψει το ενδεχόμενο πνευμονικής εμβολής του ασθενούς [92].

#### 5.5.7. ΔΙΑΦΡΑΓΜΑ ΑΠΟΦΡΑΞΕΩΣ AMPLATZER®

Οι συσκευές αποφράξεως έχουν σχεδιασθεί για να χρησιμοποιούνται ως επίδεσμοι κάλυψης των οπών για τη θεραπεία της καρδιάς, χωρίς να απαιτείται επέμβαση ανοιχτής καρδιάς και κατασκευάζονται συνήθως από παραδοσιακά υλικά. Το διάφραγμα αποφράξεως AMPLATZER® αποτελείται από ένα σύρμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti που υφαίνεται και διαμορφώνεται σε δύο επίπεδα καλύμματα τα οποία συνδέονται μέσω μικρού, σωληνοειδούς τμήματος. Η συσκευή τοποθετείται μέσω τομής στη μηριαία αρτηρία και εφαρμόζεται στο κέντρο της οπής που πρόκειται να επιδιορθωθεί. Το κάλυμμα αποσύρεται και οι δύο επίπεδες πλάκες εφαρμόζουν δύναμη εκατέρωθεν της οπής, κλείνοντάς την και σφραγίζοντας την επιφάνεια [93].

#### 5.5.8. ΟΡΘΟΠΕΔΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Τα SMA χρησιμοποιούνται για την ιδιότητες υπερ-ελαστικότητας και μνήμης σχήματός τους σε πληθώρα ορθοπεδικών συσκευών που έχουν σχεδιασθεί για την επιτάχυνση των σχηματισμών οστών και χόνδρων, υπό τη συνεχή φόρτιση θλιπτικών τάσεων. Προτεταμένες πλάκες SMA χρησιμοποιούνται για τη θεραπεία καταγμάτων των οστών. Όταν εφαρμόζονται στις δύο πλευρές ενός κατάγματος και

βιδώνονται μεταξύ τους, παράγουν θλιπτική δύναμη που βοηθά στην συγκόλληση του οστού [94].

Συνδετήρες επίσης χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση καταγμάτων. Ένας συνδετήρας νικελίου-τιτανίου Ni-Ti στη μαρτενσιτική του φάση τοποθετείται με τέτοιον τρόπο, ώστε τα πόδια του να μπορούν να κινηθούν στα τμήματα του οστού γύρω από το κάταγμα, μέχρι αυτό να θεραπευθεί. Όταν θερμαίνεται, τα πόδια του συνδετήρα κάμπτονται εσωτερικά και τραβούν μαζί τους τα τμήματα του οστού, ασκώντας σε αυτά θλιπτική δύναμη.

Διαχωριστές νικελίου-τιτανίου Ni-Ti χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του νωτιαίου μυελού κατά τη διάρκεια χειρουργικών επεμβάσεων. Κατά τη διαδικασία, ένας αποστάτης SMA εισάγεται ως συμπιεσμένος δακτύλιος και στη συνέχεια, θερμαινόμενος, επεκτείνεται και διανοίγει χάσμα μεταξύ των σπονδύλων. Στη συνέχεια, θραύσματα οστών τοποθετούνται στο διάκενο και με την πάροδο του χρόνου μετατρέπονται σε στερεό κόκκαλο.

SMA σε στερεά μορφή ράβδου έχουν χρησιμοποιηθεί για τη θεραπεία της κύρτωσης σπονδυλικής στήλης. Προ-παραμορφωμένες μαρτενιτικές ράβδοι εφαρμόζουν τέλεια και δένονται επάνω στην αρχικά κυρτωμένη σπονδυλική στήλη του ασθενούς. Όταν σταδιακά ανακτούν το αρχικό, επιθυμητό για τη σπονδυλική στήλη, σχήμα τους, την παρασύρουν να αποκτήσει το ιατρικά αποδεκτό σχήμα [82].

#### 5.5.9. ΔΙΑΦΟΡΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Χιλιάδες ακόμη ιατρικές συσκευές έχουν σχεδιασθεί για να εκμεταλλευθούν τη μοναδική συμπεριφορά των κραμάτων μνήμης σχήματος. Μερικά κλασσικά παραδείγματα είναι οι καθετήρες, τα ενδοδοντικά εμφυτεύματα, τα κλιπ ανευρύσματος, οι χειρουργικές βελόνες και οι ανασυρόμενες αρπάγες [77].

### 5.6 ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η εφαρμογή των κραμάτων μνήμης σχήματος SMA είναι μια πρόκληση για την αυτοκινητοβιομηχανία για δύο λόγους, το ακραίο φάσμα των αναμενομένων θερμοκρασιών λειτουργίας και την απαίτηση της αγοράς για οικονομικά εξαρτήματα. Οι περισσότερες συσκευές αυτοκινήτου καλούνται να αποδώσουν ενώ εκτίθενται σε

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

υψηλές θερμοκρασίες ακραίων κλιμάτων σε όλον τον κόσμο. Η επιτυχία των SMA στον κλάδο των αυτοκινήτων έχει περιοριστεί σημαντικά λόγω της επιδείνωσης των ιδιοτήτων μνήμης σχήματος των κραμάτων που έχει παρατηρηθεί σε βάθος χρόνου, που προκαλείται από την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες [83]. Οι συσκευές SMA που παρουσιάζουν επιτυχία έχουν εκμεταλλευθεί τα οφέλη μιας ελαφριάς και απλής λύσης. Για παράδειγμα, ενεργοποιητές SMA χρησιμοποιούνται ως αντικαταστάτες διμεταλλικών ελασμάτων και ενεργοποιητών κεριού και ο λόγος που προτιμώνται είναι ότι αποτελούν μια ενιαία μεταλλική συσκευή έναντι πολύπλοκων μηχανισμών. Οι απλές συσκευές SMA βελτιώνουν περαιτέρω τις επιδόσεις σχεδιασμού καθώς ενεργοποιούνται τάχιστα, λόγω της δυνατότητάς τους να βυθίζονται πλήρως σε υγρή ή αέρια ροή [86].

#### 5.6.1. ΒΑΛΒΙΔΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΣΗΣ

Μια βαλβίδα ελέγχου από κράμα μνήμης σχήματος σχεδιάστηκε το 1989 από την Raychem Corporation and Mercedes-Benz AG και εφαρμόστηκε στα αυτοκίνητα της Mercedes για να βελτιώσει την τραχεία αυτόματη μετάδοση σε πολύ κρύο καιρό. Οι βαλβίδες χρησιμοποιούν ελατήρια νικελίου-τιτανίου Ni-Ti για να αντισταθμίσουν τις επιπτώσεις του αυξημένου ιξώδους του λαδιού. Ένα πηνίο νικελίου-τιτανίου Ni-Ti βυθίζεται στο ρευστό μεταφοράς. Σε χαμηλές θερμοκρασίες το ελατήριο βρίσκεται στη μαρτενσιτική του φάση και ωθείται από χαλύβδινο ελατήριο για να μετακινεί ένα έμβολο, το οποίο ενεργοποιεί έναν μηχανισμό για τη μείωση της πίεσης και τη διευκόλυνση της αλλαγής ταχυτήτων. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες το ελατήριο νικελίου-τιτανίου Ni-Ti είναι πολύ πιο ισχυρό, στην ωστενιτική του φάση, και υπερνικά το χαλύβδινο ελατήριο, σπρώχνοντάς το προς την αντίθετη κατεύθυνση για να βελτιώσει την πίεση αλλαγής ταχυτήτων στις θερμοκρασίες αυτές [86].

Λόγω των ιδανικών παραμέτρων απόδοσης της εφαρμογής, οι βαλβίδες ελέγχου πίεσης είναι από τις λίγες τεχνικά και οικονομικά επιτυχίες των SMA στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας βρίσκονται εντός των προδιαγραφών του υλικού, η απαιτούμενη δύναμη εξόδου είναι χαμηλή και η επιθυμητή διάρκεια ζωής είναι μικρότερη από 20.000 κύκλους. Αυτές οι συνθήκες

μειώνουν την πιθανότητα κόπωσης και υποβάθμισης της ποιότητας των ιδιοτήτων των SMA, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του προϊόντος [95].

#### **5.6.2. ΤΟΥΥΟΤΑ ΡΟΔΕΛΕΣ SMA ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΘΟΡΥΒΟΥ**

Ροδέλες κράματος νικελίου-τιτανίου Ni-Ti σχεδιάσθηκαν από την Toyota Motor Corporation και χρησιμοποιήθηκαν σε αυτοκίνητα τύπου Sprinter/Carib για τη μείωση των κραδασμών και του έντονου θορύβου σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα μηχανικά μέρη αυτοκινήτων, όπως κιβώτια ταχυτήτων, είναι συχνά συνδυασμοί πολλών ανόμοιων μετάλλων. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας οπότε και αυξάνεται ραγδαία η θερμοκρασία, η διαφορά στο επίπεδο της θερμικής διαστολής των διαφόρων μετάλλων προκαλεί χαλάρωση των μεταξύ τους συνδέσεων και θόρυβο (κουδούνισμα). Οι ροδέλες έχουν σχεδιασθεί για να αλλάζουν σχήμα σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιώντας δυνάμεις έως 1000N (225lb), οι οποίες είναι αρκετές για τη σύσφιξη των συνδέσεων και τη μείωση του ανεπιθύμητου θορύβου [86].

#### **5.6.3. ΡΟΔΕΛΕΣ SMA ΑΜΟΡΤΙΣΕΡ**

Αυτό το στοιχείο έχει σχεδιαστεί για να αντισταθμίζει το υψηλό ιξώδες του πετρελαίου σε ψυχρότερες θερμοκρασίες και η λειτουργία του μοιάζει με αυτή των βαλβίδων ελέγχου πίεσης. Οι ροδέλες από υλικό SMA τοποθετούνται σε αμορτισέρ για να μεταβάλλουν αποτελεσματικά την απόδοσή τους μεταξύ θερμών και ψυχρών θερμοκρασιών [86].

#### **5.6.4. ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ ΣΥΜΠΛΕΚΤΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ**

Μια συσκευή SMA η οποία αναπτύχθηκε ως μηχανισμός επιλεκτικής μετάβασης για αερόψυκτους κινητήρες. Βασίζεται στην ενεργοποίηση ενός πηνίου κράματος μνήμης σχήματος με βάση τον χαλκό Cu για τον έλεγχο της λειτουργίας ενός ανεμιστήρα συμπλέκτη. Το πηνίο ενεργοποιείται σε ορισμένη θερμοκρασία κοντά στους 50°C και μετακινεί έναν συμπλέκτη για να τροφοδοτήσει τον ανεμιστήρα του κινητήρα. Ο ανεμιστήρας επιταχύνει για να ψύξει τον κινητήρα και η θερμοκρασία μειώνεται μέχρι το σημείο, όπου η σπείρα του πηνίου

SMA δέχεται δύναμη και αναγκάζει τον συμπλέκτη να απεμπλακεί από τον κινητήρα, μέσω μιας σειράς από τέσσερα χαλύβδινα ελατήρια που ασκούν δύναμη ωθήσεως. Η συσκευή έχει σχεδιαστεί για να μειώσει θόρυβο του κινητήρα και την κατανάλωση καυσίμου όταν το αυτοκίνητο είναι σε αδράνεια [83].

## 5.7 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ - ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑ

Πολλές εφαρμογές κραμάτων μνήμης σχήματος SMA έχουν σχεδιασθεί και υλοποιηθεί για να ικανοποιήσουν μερικές από τα πιο αυστηρές, μεγάλης κλίμακας απαιτήσεις των πολεοδομικών έργων και διαφόρων άλλων βιομηχανικών εφαρμογών. Παρά το γεγονός ότι οι περιορισμοί των ιδιοτήτων των SMA θέτουν όρια στο εύρος χρήσης τους σε βιομηχανικές εφαρμογές, για παράδειγμα το περιορισμένο αποδεκτό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας τους, πολλές δημιουργικές λύσεις και αποτελεσματικές εφεδρικές επιλογές έχουν σχεδιασθεί επιτυχώς και έχουν αντικαταστήσει παραδοσιακές συσκευές και σχεδιασμούς [77].

### 5.7.1. ΖΕΥΞΕΙΣ ΑΓΩΓΩΝ

Οι σύνδεσμοι ζεύξης αγωγών Cryogenic που σχεδιάστηκαν από την Raychem Corporation για την αεροδιαστημική βιομηχανία έχουν προσαρμοστεί για χρήση σε επιχειρήσεις βαθιάς θάλασσας, όπως και στην πετρελαϊκή και χημική βιομηχανία. Το πλεονέκτημα ενός κράματος νικελίου-τιτανίου-νιοβίου Ni-Ti-Nb λόγω της μεγάλης του υστέρησης συνέβαλε στην επέκταση των χρήσεων αυτών των συζεύξεων SMA. Όταν τα συστατικά τους κατεργάζονται σε θερμοκρασία δωματίου και στη συνέχεια ψύχονται σε υγρό άζωτο για την ανάκτηση του σχήματός τους, δε θα αναπτυχθούν στο πλήρες σχήμα τους πριν η θερμοκρασία πλησιάσει τους 150°C, πράγμα που επιτρέπει τη μεταφορά και αποθήκευση των επεκτεταμένων συζεύξεων χωρίς να απαιτείται η χρήση υγρού αζώτου. Μόλις εφαρμοστούν στη σωλήνωση και θερμανθούν για να μεταβούν στην ωστενιτική φάση μετασχηματισμού τους, διατηρούν τη δύναμή τους σε θερμοκρασίες ψυχρότερες των -20°C [95].

### 5.7.2. ΔΙΑΡΘΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Κράματα μνήμης σχήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της αντοχής και της οικονομίας ενέργειας σε ένα κτίριο. Ένα τέτοιο έργο εκπονήθηκε στην Ιταλία, όταν ενισχύθηκε ο ναός της Βασιλικής του Αγίου Φραγκίσκου, στην Assisi, μετά από σοβαρές ζημιές που υπέστη από σεισμό το 1997. Σύρματα SMA τοποθετήθηκαν σε σειρά με οριζόντιους συμβατικούς χαλύβδινους συνδέσμους για να στηρίξουν τους τοίχους ως την οροφή του ναού. Η υπερ-ελαστική συμπεριφορά των συρμάτων θα προσδίδει αντοχή στην πίεση και ολκιμότητα στην πιθανή κίνηση των τοίχων από νέους σεισμούς και, κατά την ανάκαμψη, τα στελέχη τους, θα μετατρέψουν τη δύναμη που θα δεχτούν σε πιο ήπια και λιγότερο κρουστική (εκμεταλλεύομενη το κάτω μέρος της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων). Εκτιμήθηκε ότι η χρήση των SMA στη στατική μελέτη θα έχει ως αποτέλεσμα 50% αυξημένη αντοχή σε πιθανό σεισμό, σε σύγκριση με την περίπτωση που οι ράβδοι είχαν σχεδιασθεί από συμβατικό χάλυβα [96].

### 5.7.3. ΘΡΑΥΣΗ ΒΡΑΧΩΝ

Τα κράματα μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τα εκρηκτικά κατεδάφισης, με χρήση παρόμοια σε λειτουργία με τους μηχανισμούς απελευθέρωσης Frangibolt® που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Ένας προτεταμένος κύλινδρος SMA τοποθετείται μέσα σε μια ρωγμή μιας δομής προς καταστροφή. Θερμαινόμενος ηλεκτρικά, παράγει δυνάμεις αποκατάστασης που τείνουν να τον επαναφέρουν στο αρχικό του σχήμα. Οι δυνάμεις αυτές είναι επαρκείς για να καταστρέψουν τους βράχους και τις δομές τσιμέντου. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί στη Ρωσία για την παραγωγή δυνάμεων κατεδάφισης μεγαλύτερων από 100tn [82].

Οι θραύστες βράχων αποτελούνται από ράβδους νικελίου-τιτανίου Ni-Ti και χρησιμοποιούνται και στην Ιαπωνία. Η Nishimatsu Construction Co., Ltd. χρησιμοποιεί ράβδους μήκους 29mm και διαμέτρου 15mm, οι οποίες συμπιέζονται και εισάγονται σε βραχώδεις γεωτρήσεις με έναν μηχανισμό σφηνοειδών πλακών. Όταν θερμαίνονται από ηλεκτρικό θερμοσίφωνα που έχει τοποθετηθεί για το σκοπό αυτόν, προκαλείται η επαναφορά στο αρχικό τους σχήμα,

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ (SMA)

σπάζοντας τον βράχο. Έχει μετρηθεί εφαρμογή δύναμης 14tn όταν οι ράβδοι έχουν θερμανθεί στους 120°C [85].

#### **5.7.4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Τα υλικά SMA χρησιμοποιούνται συχνά για την αποφυγή χαλάρωσης ή κρεμάσματος εναερίων γραμμών μεταφοράς ενέργειας. Η χρήση τους έχει δοκιμαστεί επιτυχώς σε Καναδά, Ουκρανία και Ρωσία [97]. Όταν η θερμοκρασία αυξηθεί λόγω θερμής ατμόσφαιρας ή υψηλού φορτίου κατά μήκος των γραμμών, οι γραμμές χαλαρώνουν. Σύρματα νικελίου-τιτανίου Nitinol εφαρμόζονται στις άκρες τμημάτων των γραμμών και παραμορφώνονται στις ψυχρές θερμοκρασίες (ευρισκόμενα σε υψηλό επίπεδο έντασης), θερμαινόμενα, όμως, αυξάνουν το μήκος τους παρασύροντας μαζί τους τις γραμμές, μην επιτρέποντάς τους να χαλαρώσουν.

#### **5.7.5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΑΤΜΟΥ**

Παρόμοια με την εφαρμογή της γραμμής μεταφοράς ενέργειας, κρεμάστρες σωληνώσεων κατασκευάζονται από κράμα Ni-Ti για να μειώσουν τη χαλάρωση σωλήνων ατμού, που θερμαίνονται από αυτόν. Η διαφορά με τις γραμμές μεταφορές ενέργειας είναι ότι εδώ μειώνεται η παροχή ατμού στους σωλήνες και το σχήμα των σωλήνων επανέρχεται αυτόματα, αντί να εξομαλύνονται οι αλλαγές στη γεωμετρία των γραμμών, όπως στις γραμμές μεταφοράς ενέργειας [97].

#### **5.7.6. ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΠΥΡΗΝΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ**

Τα υλικά SMA βοηθούν στη συμπίεση πυρήνων μετασχηματιστών, μια κρίσιμη πτυχή της σωστής λειτουργίας τους. Κοιλίες από κράμα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti προ-συσφίγγουν αξονικά στο ζευγάρι φύλλων του πυρήνα μεγάλων μετασχηματιστών. Στη συνέχεια θερμαίνονται για να αναπτυχθούν στο πλήρες σχήμα τους, ασκώντας επιπλέον θλιπτικές δυνάμεις επί των φύλλων. Η λύση αυτή βελτιώνει τις υφιστάμενες παραδοσιακές με τη χρήση συμβατικών κοχλιών και περικοχλιών, όπου τα φύλλα του πυρήνα τοποθετούνταν σε κενό για να μην υπάρχει αέρας μεταξύ τους και στη συνέχεια μεταφέρονταν σε φυσικό ατμοσφαιρικό αέρα για να βιδωθούν τα περικόχλια. Αν και τεχνικά αποτελεί πρόοδο, η λύση SMA απαιτεί

κοχλίες διαμέτρου 2-3in, η οποία είναι μεγαλύτερη από την ιδανική για κράματα τέτοιου τύπου [97]. Το κόστος επεξεργασίας και κατεργασίας των κοχλιών μπορεί να υπερκαλύψει το όφελος που έχει αποκομιστεί από τη συναρμολόγηση.

#### **5.7.7. ΣΥΣΚΕΥΗ ΤΑΝΥΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΥΡΜΑΤΩΝ**

Συσκευές SMA χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αντοχή των σωληνώσεων. Προλαμβάνουν τη δημιουργία ρωγμών και τον πολλαπλασιασμό τους συμπιέζοντας τμήματα των σωληνώσεων εφαρμόζοντας την τεχνική της έντασης με πολλαπλά σύρματα (multiwire tension MWT) που σχεδιάστηκε από την ABB Nuclear Division στη Σουηδία. Μια σύζευξη σωλήνων τυλιγμένη με προτεταμένο σύρμα SMA, τα άκρα του οποίου είναι σταθερά, τοποθετείται πάνω από ένα σημείο συγκόλλησης σωλήνα. Όταν θερμαίνεται το σύρμα SMA αυξάνει τις διαστάσεις τους τείνοντας να επανέλθει στο αρχικό του σχήμα, σφραγίζοντας τη συναρμογή των σωληνώσεων. Η τεχνική MWT εφαρμόζεται για τη βελτίωση των συσφίξεων σε συγκολλημένες περιοχές, την πρόληψη της διάβρωσης σε ρωγμές που ήδη υπάρχουν και τη σύνδεση των σημείων σωληνώσεων που κινδυνεύουν με θραύση, αποτρέποντας την αστοχία του υλικού του σωλήνα [97].

#### **5.7.8. ΕΤΙΚΕΤΕΣ ΕΝΔΕΙΞΕΩΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ**

Κράματα μνήμης σχήματος χρησιμοποιούνται για την ένδειξη υψηλής θερμοκρασίας σε ένα σύστημα. Ομάδα συρμάτων σε σχηματισμό ετικέτας (επίπεδη πλάκα) κάμπτονται χειροκίνητα σε συνηθισμένες θερμοκρασίες λειτουργίας. Όταν η θερμοκρασία προσεγγίσει το κρίσιμο σημείο που το κράμα SMA αλλάζει σχήμα (θερμοκρασία  $A_f$ , χαρακτηριστική του κράματος), οι ετικέτες επανέρχονται σε ίσιο σχήμα, σηματοδοτώντας την άνοδο της θερμοκρασίας. Η ένδειξη αυτή αποτελεί την απαρχή αναζήτησης της αιτίας υπερθέρμανσης του συστήματος [97].

#### **5.7.9. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ Sentinel®**

Κράματα SMA επίσης χρησιμοποιούνται στην πλευρά της χαμηλής τάσης μετασχηματιστών υποβιβασμού για την ένδειξη της μέγιστης θερμοκρασίας και για το κλείσιμο ενός διακόπτη στις κρίσιμες θερμοκρασίες. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και την πρόληψη υπερθέρμανσης του συστήματος στο οποίο εφαρμόζεται [97].

#### 5.7.10. ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα κράματα SMA χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό θερμικών μηχανών, για τη μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανική, εκμεταλλευόμενοι τη θερμική μνήμη σχήματος. Θερμοδυναμική ανάλυση θεωρητικών, ιδανικών κινητήρων θερμότητας SMA έχουν οδηγήσει σε ένα ευρύ φάσμα αποδεδειγμένων πλεονεκτημάτων, αν και οι πιο ενδεδειγμένοι υπολογισμοί δείχνουν μέγιστη δυνατή θερμική απόδοση μόνο 2-4% [98]. Μεγάλος αριθμός κινητήρων έχουν σχεδιασθεί σε φάση πρωτοτύπου με χρήση κραμάτων SMA που αλλάζουν σχήμα περνώντας από θερμές σε ψυχρές δεξαμενές. Ωστόσο, λόγω απωλειών τριβής, εγγενούς υστέρησης του υλικού και απαιτούμενης ενέργειας εισόδου για τη διατήρηση της διαφοράς θερμοκρασίας της δεξαμενής, η πρακτική αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας μηχανής θερμότητας είναι πάρα πολύ μικρή για να χρησιμεύσει ως χαμηλού κόστους μετατροπέας υψηλής παροχής ενέργειας.

Η επιδίωξη μιας επαναστατικής θερμικής μηχανής SMA χαρακτηρίζει τις εφευρέσεις που σχετίζονται με τα SMA. Πολύ συχνά βρισκόμαστε στο κατώφλι μιας επαναστατικής ανακάλυψης που έχει χρησιμοποιήσει SMA, χωρίς να έχει ολοκληρωθεί η ανάλυση κόστους και οφελών της, η οποία μπορεί να είναι αποτρεπτική από την πλευρά απαιτήσεων ενέργειας και ασύμφορη ως προς το τελικό αποτέλεσμα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι και οι θερμικοί κινητήρες. Μια επιστημονικά καινοτόμος ιδέα που δεν έχει τη δυναμική, όμως, να δικαιολογήσει την αντικατάσταση των συμβατικών μεθόδων μετατροπής ενέργειας [77].

## 5.8 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Ο κλάδος της ηλεκτρονικής έχει υιοθετήσει τα υλικά SMA, κυρίως για μηχανισμούς σύνδεσης. Εφαρμογές των SMA σε όλους σχεδόν τους κλάδους εκμεταλλεύονται την ικανότητα των κραμάτων αυτών να ενεργοποιούνται ηλεκτρονικά και να αλλάζουν το σχήμα τους. Ωστόσο, μερικά παραδείγματα είναι πολύ συγκεκριμένα και μοναδικά στον κλάδο της ηλεκτρονικής [77].

### 5.8.1. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΝΩΣΗ Cryocon®

Το βύσμα αυτό έχει σχεδιασθεί για να διοχετεύει τα ηλεκτρονικά καλώδια που περιέχονται στο περίβλημα πλεξούδας, σε ένα τερματικό βύσμα. Έχει σχήμα δαχτυλιδιού, είναι κράμα SMA και, λόγω των ακτινικών δυνάμεων που δέχεται όταν ψύχεται, διαστέλλεται. Όταν θερμαίνεται σε θερμοκρασία δωματίου, το δαχτυλίδι ανακτά το αρχικό του σχήμα, ελαττώνοντας τη διάμετρό του και συσφίγγοντας την ένωση του με το αντίστοιχο δαχτυλίδι του εξαρτήματος που μαζί δημιουργούν τη σύνδεση, σφραγίζοντας την σταθερά [4,99].

### 5.8.2. ZIF (Zero insertion force) Connector– ΒΥΣΜΑ ΜΗΛΕΝΙΚΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ

Έναν ηλεκτρικό συνδετήρα χωρίς παρεμβολές σχεδίασε η Beta Phase, Inc. για την απλοποίηση των εγκαταστάσεων κυκλωμάτων και την αύξηση της ποιότητας των συνδέσεών τους. Μια λωρίδα νικελίου-τιτανίου Ni-Ti σε σχήμα U, σε θερμοκρασίες λειτουργίας βρίσκεται στη μαρτενσιτική της φάση μετασχηματισμού, εξαναγκασμένη από ένα συμβατικό ελατήριο να συγκρατεί μια κάρτα του κυκλώματος. Όταν χρειαστεί να αποσπάσουμε την κάρτα για επισκευή ή τοποθέτηση άλλης στη θέση της, θερμαίνουμε ηλεκτρικά τον σύνδεσμο και αυτός τείνει να πάρει το αρχικό του σχήμα, υπερνικώντας τη δύναμη του ελατηρίου και ανοίγοντας την σχήματος U επαφή του, απελευθερώνοντας την κάρτα χωρίς να απαιτείται εφαρμογή δύναμης. Έτσι, η εγκατάσταση παραμένει απλή στη λειτουργία της, διατηρώντας την σφιχτή επαφή των καρτών του κυκλώματος με την μητρική [100].

### 5.8.3. ΜΙΚΡΟΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ

Κράματα SMA έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως λεπτού φιλμ ενεργοποιητές, για συσκευές μικροενεργοποιητών, όπως μικροσκοπικές βαλβίδες, διακόπτες και μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) [101]. Είναι ταινίες νικελίου-τιτανίου Ni-Ti πάνω σε υποστρώματα πυριτίου Si, λιθογραφικά και χημικά κατεργασμένες. Συσκευές διαμέτρου 1mm και πάχους 3μ έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή μικροσκοπικών βαλβίδων για υγρή ροή και πνευματικό έλεγχο. Οι ενεργοποιητές Ni-Ti εξασφαλίζουν πλήρη ανάκαμψη από φορτίσεις που έχουν προκαλέσει έως 3% παραμόρφωση στα στελέχη του κράματος [102].

## 5.9 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Οι εφαρμογές κραμάτων μνήμης σχήματος συνεχίζουν να κερδίζουν την αποδοχή σε μια ποικιλία βιομηχανιών σε όλον τον κόσμο. Έχουν εισαχθεί ως αντικείμενο σπουδών σε ολοένα και αυξανόμενο αριθμό φοιτητών και πανεπιστημιακών σχολών μηχανικών και μεταλλουργών και ως αντικείμενο εμπορίου με συνεχώς περισσότερα διαθέσιμα καταναλωτικά προϊόντα. Παρόλο που η αξιοποίηση των ιδιοτήτων τους και οι σχεδιαστικές τεχνικές τους δεν είναι προσβάσιμες όπως αυτές των συμβατικών υλικών, υπάρχει η τάση να αντικαθίστανται τα συμβατικά υλικά σταδιακά από τα SMA υλικά. Ο ιατρικός κλάδος έχει προσαρμόσει την τυποποίηση της παραγωγής υλικών, τον έλεγχο και τη μηχανική τους συμπεριφορά, ώστε να χρησιμοποιούνται κράματα Ni-Ti στην κατασκευή των ιατρικών συσκευών και μηχανημάτων. Το άνοιγμα και η υποστήριξη σε τέτοιο βαθμό από ένα τόσο εκτεταμένο και σημαντικό κλάδο σηματοδοτεί την αύξηση της χρήσης τους στη μηχανική και τον σχεδιασμό [77].

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Carolyn Rice, Encyclopedia of Smart Materials (Vol 1&2), Shape Memory Alloys, Applications, Cordis-NDC, Fremont, CA, Pages 921-925, 2002
- [2] S.M.Jani, M.Leary, A.Subic, M.A.Gibson, “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”, Materials and Design, 56, 1078-1117, 2014
- [3] C.M. Jackson, H.J.Wagner, and R.J.Wasilewski, NASA Report SP-5110, Washington, DC, pp. 74, 78, 79, 1972
- [4] H. Funakubo, ed., Shape Memory Alloys. Gordon and Breach, NY, pp. 201, 206, 1987.
- [5] T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stoeckel, and C.M. Wayman, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. Butterworth-Heinemann, London, 1990.
- [6] D.E. Hodgson, M.H. Wu, and R.J. Biermann, Shape Memory Alloys, Vol. 2. 10, pp. 897–902, 1990
- [7] J.V. Humbeeck, Manside Project Workshop Proc. Rome, Italy, pp. II-1, II-2, II-22. II-28, 1999.
- [8] M.H. Wu, Proc. Shape Memory Alloys Power Syst. Palo Alto, CA, pp. 2.1–2.2, 1994.
- [9] T.W. Duerig and K.N. Melton, MRS Int. Meet. Adv. Mater., Tokyo, Japan, Vol. 9, p. 583, 1988.
- [10] D.E. Hodgson and R.C. Krumme, Proc. 1st Int. Conf. Shape Memory Superelastic Technol. Pacific Grove, CA, pp. 371–376, 1994,
- [11] Hysteretic Damping Apparatus and Methods, US Pat. 5, 842, 312, Dec. 1, R.C. Krumme and D.E. Hodgson, 1998.
- [12] R.H. Richman, C.A. Zimmerly, O.T. Inal, D.E. Hodgson, and A.S. Rao, Proc. 1st. Int. Conf. Shape Memory Superelastic Technol., Pacific Grove, CA, pp. 175–180, 1994.
- [13] M.Manjaiah, S. Narendranath, S. Basavarajappa, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Review on non-conventional machining of shape memory alloys, 24 Pages 12-21, 2014.
- [14] Ming H W U, Schetky, Industrial applications for shape memory alloys, Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, California, 171-182, 2000.
- [15] Qin Chang-jun, Ma Pei-sun, Yao Qin., A prototype micro-wheeled-

robot using sma actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 113: 94-99, 2004.

[16] Winzek B, Schmita S, Rumpf H, Sterzl T, Hassdorf R, Thienhaus S, et al. Recent developments in shape memory thin film technology, Materials Science and Engineering A, 378: 40-46, 2004,

[17] Thienhaus S, Savan A, Ludwig A., Combinatorial fabrication and high-throughput characterization of a Ti-Ni-Cu shape memory thin film composition spread, Materials Science and Engineering A, 482: 151-155, 2008,

[18] Zhang H J, Qiu C, A TiNiCu thin film micropump made by magnetron co-sputtered method, Materials Transactions, 47: 532-535, 2006

[19] Lin H C, Lin K M, Chen, A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys, Journal of Materials Processing Technology, 105: 327-332, 2000.

[20] Kong M C, Axonte D, Voice W., Challenges in using waterjet machining of NiTi shape memory alloys: An analysis of controlled-depth milling, Journal of Materials Processing Technology 211: 959-971, 2011.

[21] Weinert K, Petzoldt V., Machining of NiTi based shape memory alloys, Materials Science Engineering A, 378: 180-184, WU S K, 2004.

[22] Lin H C, Chen C C., A study on the machinability of a Ti<sub>49.6</sub>-Ni<sub>50.4</sub> shape memory alloy, Materials Letter, 40: 27-32, 1999.

[23] Lin H C, Lin K M, Chen Y C., A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys, Journal of Materials Processing Technology, 105: 327-332), 2000.

[24] Boyer R R, An overview on the use of titanium in the aerospace Industry, Materials Science and Engineering A, 213: 103-114, 1996

[25] Kong M C, Axinte D, Voice W., Challenges in using waterjet machining of NiTi shape memory alloys: An analysis of controlled-depth milling, Journal of Materials Processing Technology 211: 959-971, 2011.

[26] Askeland D R, Phue P P., The science and engineering of Materials, Gengage Learning, 2006.

[27] Craciunescu C M, Miranda R M, Silva R J C, Assunc E, Braz Fernandes F M., Laser beam interaction with Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys, Optics and Lasers in Engineering, 49: 1289-1293, 2011,

[28] Chen S L, Hsieh S F, Lin H C, Lin M H, Huang J S. Electrical discharge machining of a NiAlFe ternary shape memory alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 464: 446-451, 2008,

[29] Han Fu-zhu, Jiang Jun, Yu Ding-wen. Influence of discharge current on machined surfaces by thermo-analysis in finish cut of

- WEDM, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47: 1187-1196, 2007,
- [30] Li C, Nikumb S, Wong F., An optimal process of femtosecond laser cutting of NiTi shape memory alloy for fabrication of miniature devices, 44: 1078-1087, 2006.
- [31] Tung A T, Park B, Liang D H. Laser-machined shape memory alloy sensors for position feedback in active catheters, Sensors and Actuators A, 147: 83-92, 2008.
- [32] Tung A T, Member S, Park B, Liang D H., Laser-machined shape memory alloy actuators for active catheters, ASME Transactions on Mechatronics, 12: 439-446, 2007.
- [33] Lee E S, Shin T H., An evaluation of the machinability of nitinol shape memory alloy by electrochemical polishing, Journal of Mechanical Science and Technology, 25: 963-969, 2011,
- [34] Lee E, Shin T, Kim B, Baek S., Investigation of short pulse electrochemical machining for groove process on Ni-Ti shape memory alloy, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11: 113-118, 2010.
- [35] Frotscher M, Kahleyss F, Simon T, Biermann D, Eggeler G., Achieving small structures in thin NiTi sheets for medical applications with water jet and micro machining: A comparison, Journal of Materials Engineering and Performance, 15: 776-782, 2011.
- [36] Chen S L, Hsieh S F, Lin H C, Lin M H, Huang J S., Electrical discharge machining of a NiAlFe ternary shape memory alloy, Journal of Alloys and Compounds, 464: 446-451. 2008.
- [37] Haddad M J, Tehrani A F., Material removal rate (MRR) study in the cylindrical wire electrical discharge turning (CWEDT) process, Journal of Material Processing Technology, 9: 369-378, 2007.
- [38] Chen S L, Hsieh S F, Lin H C, Lin M H, Huang J S., Electrical discharge machining of TiNiCr and TiNiZr ternary shape memory alloys, Materials Science and Engineering A, 446: 486-492, 2007.
- [39] Chen S L, Yan B H, Huang F Y., Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V, Journal of Materials Processing Technology, 87: 107-111, 1999.
- [40] Lin Y C, Yan B H, Chang Y S. Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM, Journal of Materials Processing Technology, 104: 171-177, 2000.
- [41] Lin H C, Lin K M, Cheng I S., The electro-discharge machining characteristics of TiNi shape memory alloys, Journal of Materials Science, 36: 399-404, 2001.

- [42] Hsieh S F, Chen S L, Lin H C, Lin M H, Chiou S Y., The machining characteristics and shape recovery ability of Ti-Ni-X (X=Zr, Cr) ternary shape memory alloys using the wire electro-discharge machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49: 509-514, 2009.
- [43] Jahan M P, Rahman M, Wong Y S. A review on the conventional and micro-electric discharge machining of tungsten carbide, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 51: 837-859, 2011.
- [44] Theisen W, Schuermann A., Electro discharge machining of nickel–titanium shape memory alloys, *Materials Science and Engineering A*, 378: 200-204, 2004,
- [45] Lin H, Lin K, Chen Y, Chu C. The wire electro-discharge machining characteristics of Fe-30Mn-6Si and Fe-30Mn-6Si-5Cr shape memory alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 161: 435-43, 2005.
- [46] K. Weinert, V. Petzoldt, *Materials Science and Engineering, Machining NiTi micro-parts by micro-milling A*, Volume 481-482, Pages 672-675, 2008
- [47] H. Kahn, M.A. Huff, A.H. Heuer, *Micromechanics - Microengineering* 8, 213–221, 1998
- [48] M. Kohl, E. Just, W. Pfleging, S. Miyazaki, *Sensitive Actuators* 83, 208-213, 2000
- [49] L.G. Machado, M.A. Savi, *Braz., Medical Biological Research* 86, 683–691, 2001
- [50] H. Haferkamp, S. Paschko, F. von Alvensleben, K. Lindemann, *MICRO.tec 2000, Applications–Trends–Visions*, VDE World Microtechnologies Congress, Proceedings, Berlin, VDE-Verlag Offenbach, Germany, pp. 13–17, 2000,
- [51] H. Huang, H.Y. Zheng, Y. Liu, *Smart Mater. Struct.* 14 S297–S301, 2005
- [52] Y. Fu, H. Du, W. Huang, S. Zhang, M.M. Hu, *Sensitive Actuators A* 112, 395–408, 2004,
- [53] J.J. Gill, K. Ho, G.P. Carman, *Microelectromechanical Systems* 11 68–77, 2002.
- [54] M.H. Wu, in: Y.Y. Chu, L.C. Zhao (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies—SMST Kunming, China*, Materials Science Forum, Trans Tech Publications Inc., Uetikon-Z, Zurich, Switzerland, pp. 285–292, 2002.
- [55] K. Weinert, V. Petzoldt, D. Kotter, *Annual CIRP* 53 65–68, 2004.

- [56] Heinz Haferkamp, Stefan Paschko, Martin Goede New laser machining processes for shape memory alloys, *Smart Materials*, 94 doi:10.1117/12.424393, 2001.
- [57] Gong Wei-huai, Chen Yu-hua, Ke Li-ming, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 378, Issues 1–2, 25 July 2004, Pages 200-204, Electro discharge micromachining of nickel-titanium shape memory alloys
- [58] M. Buschka, in: K. Weinert (Ed.), *Spanende Fertigung*, Hrsg, Vulkan Verlag Essen, pp. 323–334, 2001.
- [59] K. Otsuka, C.M. Wayman, *Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 27–48, 1998.
- [60] W. Theisen, *Bearbeiten verschleißbeständiger Legierungen aus werkstofftech-nischer Sicht*, Fortschritt-Ber. VDI Reihe 2, No. 428, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [61] I. Hucklenbroich, *Abtragendes Bearbeiten von Hartlegierungen*, Fortschritt Ber. VDI Reihe 2, No 409, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [62] M. Pohl, Ch. Heßing, J. Frenzel, *Material Corrosion* 53: 673–679, 2002
- [63] Gong Wei-huai, Chen Yu-hua, Ke Li-ming, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Microstructure and properties of laser micro welded joint of TiNi shape memory alloy, 21Pages 2044-2048, 2011.
- [64] Kazuhiro O, Ren Xiao-bing, Recent developments in the research of shape memory alloys, *Intermetallics*, 7: 511-520, 1999.
- [65] Shinoda T, Takeshi T, Tsuchiya H. ,Functional characteristics of friction welded near-equiatomic TiNi shape memory alloy, *Transactions of the Japan Welding Society*, 22(2): 30-36, 1991.
- [66] Yan Xiao-jun, Yang Da-zhi, Liu Li-ming, Microstructures and properties of laser spot-welded joint of superelastic NiTi alloy wire, *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 15(1): 19-23, 2005.
- [67] Man H C, Cui Z D, Yue T M., Corrosion properties of laser surface melted NiTi shape memory alloy, *Scripta Materialia*, 45: 1447-1453, 2001,
- [68] Qiu X M, Li M G, Sun D Q, Liu W H., Study on brazing of TiNi shape memory alloy with stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 176: 8-12, 2006.
- [69] Ikai A, Kimura K, Tobusch H., TIG welding and shape memory effect of TiNi shape memory alloy, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7: 646-655, 1996.

- [70] Xu Yue-lan, Cheng Zhi-fu, Fan Xiao-long, Plasma beam welding of shape memory alloy, Transactions of the China Welding Institution, 12: 26-29, 2006.
- [71] Hu Y T, Wang Y R, Wu S K., Effect of CO<sub>2</sub> laser welding on the shape memory and corrosion characteristics of TiNi alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, 3: 69-576, 2001.
- [72] Tuissi A, Besseghini S, Ranucci T., Effect of Nd:YAG laser welding on the functional properties of the Ni<sub>49.6</sub>at%Ti, Materials Science and Engineering A, 273-275: 813 and 818, 1999.
- [73] Falvo A, Furgiuele F M, Maletta C., Functional behaviour of a NiTi-welded joint: Two-way shape memory effect, Materials Science and Engineering A, 481-482: 647-650, 2008.
- [74] Yan Xiao-jun, Yang Da-zhi, Liu Xiao-peng, Electrochemical behavior of YAG laser-welded NiTi shape memory alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16(3): 572-576, 2006.
- [75] Gugel H, Schuermann A, Theisen W., Laser welding of NiTi wires, Materials Science and Engineering A, 481-482: 668-671, 2008.
- [76] Chen Yu-hua, Ke Li-ming, Huang Yong-de, Xu Shi-long, Laser butt welding of TiNi shape memory alloy sheet, Transactions of the China Welding Institution, 31(8): 37-40, 2010.
- [77] Carolyn Rice, Encyclopedia of Smart Materials (Vol 1&2), Shape Memory Alloys, Applications, Cordis-NDC, Fremont, CA, Pages 928-936, 2002
- [78] L.McD. Schetky, Sci. Am., 241(5): 79, 81, 1979.
- [79] <http://www.sma-mems.com/aero.htm>.
- [80] J.D. Busch, Proc. 1st. International Conference Shape Memory Superelastic Technology Pacific Grove, CA, pp. 259–264, 1994.
- [81] <http://www.robotstore.com/mwmars.html>.
- [82] L. McD. Schetky, Proc: Shape Memory Alloys Power Systems, Palo Alto, CA, pp. 4.1–4.11, 1994.
- [83] C.M. Wayman, J. Met. pp. 129–137, 1980.
- [84] <http://www.techtran.smfc.nasa.gov/new/memmetal.html>.
- [85] H. Tamura, Proc.: Shape Memory Alloys Power Systems, Palo Alto, CA, pp. 8–3, 8–5, 1994.
- [86] D. Stoeckel, Adv. Material Process, pp. 35, 38, 1990.
- [87] <http://www.techtran.smfc.nasa.gov/new/memmetal.html>.
- [88] W.V. Moorlegghem, Proc.: Shape Memory Alloys Power Systems, Palo Alto, CA, pp. 9–1, 9–3, 1994.
- [89] J.P.O’Leary, J.E. Nicholson, R.F. Gattorna, In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, London, p. 477, 1990.
- [90] Mitek Surgical Products, Inc. Company Brochure, 1995.

- [91] J. Stice, in Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, London, p. 483, 1990.
- [92] <http://www.nitinolmed.com/products/>
- [93] <http://www.agamedical.com/patients/index.html>
- [94] J. Haasters, In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, London, pp. 426–444, 1990.
- [95] D. Stoeckel, Proc.: Shape Memory Alloys Power Systems, Palo Alto, CA, pp.1–9, 1994.
- [96] <http://www.alphagalileo.org>, 1999.
- [97] J. Cederstrom, Proc.: Shape Memory Alloys Power Systems, Palo Alto, CA, pp. 6–2 to 6–7, 1994.
- [98] P. Wollants, M. De Bonte, L. Delaey, J.R. Roos, Proc. Nintinol Heat Engine Configuration Silver Spring, M, pp. 6.1–6.22, 1978.
- [99] E. Cydzik, In Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, London, pp. 149–157, 1990.
- [100] J.F. Krumme, Connection Technology Lake, 1987.
- [101] <http://www.sma-mems.com/t film.htm>
- [102] A.D. Johnson, J.D. Busch, Proc. 1st International Conference Shape Memory Superelastic Technology, Pacific Grove, CA, pp. 299–304, 1994.